



Системы связи

**с использованием
искусственных
спутников
Земли**

ИЗДАТЕЛЬСТВО

«МИР»

COMMUNICATIONS SATELLITES

*Proceedings
of a Symposium held in London
on 12 May 1961*

Advisory editor L. J. Carter

1962
ACADEMIC PRESS
London and New York

СИСТЕМЫ СВЯЗИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ
Земли

Под редакцией Л. Картера

*Перевод с английского
Б. С. Кукиса и В. А. Повзнера*

Под редакцией канд. техн. наук В. В. Маркова

Издательство „МИР“

МОСКВА 1964

Книга содержит переводы материалов симпозиума по системам связи с использованием искусственных спутников Земли, проведенного в Лондоне Британским обществом межпланетных сообщений, а также две статьи из журнала «Point to Point Telecommunications», v. 6, № 3, 1962 г. В предлагаемых читателю материалах освещается широкий круг вопросов, в том числе экономических, касающихся построения систем связи, использующих активную ретрансляцию через искусственные спутники Земли.

Целью книги является ознакомление радиоинженеров и научных работников со взглядами иностранных специалистов на некоторые вопросы систем связи через искусственные спутники Земли. Книга будет полезна также студентам старших курсов радиотехнических вузов.

Редакция литературы по вопросам техники

Системы связи с использованием искусственных спутников Земли

(Вступительная статья редактора перевода)

1. Введение

В 1955 г. были опубликованы расчетные данные, позволившие оценить параметры системы дальней радиосвязи с использованием искусственных спутников Земли (ИСЗ) [1]. Однако до 1957 г., несмотря на давно уже доказанную возможность запуска ИСЗ, применение их для дальней радиосвязи считалось научной фантазией.

В Советском Союзе 4 октября 1957 г. был успешно выведен на орбиту первый ИСЗ, положивший начало не только новому этапу исследования космического пространства, но и использованию ИСЗ для целей дальней радиосвязи. За короткий срок в Советском Союзе были достигнуты в направлении развития ИСЗ выдающиеся успехи, позволившие 12 апреля 1961 г. запустить на орбиту вокруг Земли космический корабль «Восток» с космонавтом Ю. А. Гагариным на борту. Эти достижения являются основой превращения научной фантазии — использования ИСЗ для целей связи — в реальную действительность.

Принцип использования ИСЗ для обеспечения дальней радиосвязи состоит в том, что в линии связи, работающей в диапазоне УКВ, они выполняют, как и в обычной радиорелейной линии связи, роль промежуточной станции, ре-

транслирующей сигналы от одной наземной станции к другой. Так как ИСЗ может находиться на большой высоте, то это дает возможность осуществления связи на расстояниях до десяти тысяч километров и более. При нескольких ретрансляциях может быть достигнута практически любая дальность связи.

Поскольку такие линии радиосвязи могут быть многоканальными и через них могут быть переданы телевизионные сигналы, они привлекли к себе серьезное внимание своей экономичностью, несмотря на сравнительно высокую стоимость запуска ИСЗ. Проблеме ретрансляции сигналов через ИСЗ и построения систем связи, использующих такую ретрансляцию, посвящено большое количество журнальных статей и докладов на конференциях. Этими же вопросами занимается специально созданная IV (исследовательская) комиссия Международного консультативного комитета по радиосвязи (МККР).

В настоящей книге вниманию читателей предлагается перевод материалов симпозиума по системам связи с использованием ИСЗ, состоявшегося в Лондоне 12 мая 1961 г. В книгу включены также две статьи из журнала «Point to Point Telecommunications», 1962, v. 6, № 3, дополняющих, по нашему мнению, материалы симпозиума.

В статьях рассматриваются достаточно сложные вопросы построения систем связи с использованием ИСЗ. Для того чтобы читателю было легче в них разобраться, ниже приводятся основные сведения, касающиеся ретрансляции через ИСЗ.

2. Орбиты искусственных спутников Земли

ИСЗ могут быть запущены на орбиты, характеризующиеся следующими параметрами: углом наклона плоскости орбиты к плоскости экватора, формой орбиты и высотой орбиты над поверхностью Земли.

По углу наклона орбиты разделяются на экваториальные (угол наклона равен нулю), полярные (угол наклона 90°) и наклонные (угол наклона больше нуля, но меньше 90°). По форме орбиты разделяются на круговые и эллиптические. Последние характеризуются апогеем (наибольшее расстояние ИСЗ от поверхности Земли) и перигеем (наименьшее

расстояние ИСЗ от поверхности Земли). По высоте орбиты разделяются на низкие с высотой 150—5000 км с малым периодом обращения (1—3 час) и высокие — с высотой более 5000 км и с большим периодом обращения.

Орбита с периодом обращения 24 час называется стационарной. Стационарная экваториальная орбита называется синхронной, если ИСЗ движется в сторону вращения Земли (такой ИСЗ будет неподвижным по отношению к точке на Земле). Последняя орбита отличается высокой стабильностью. Наклонная орбита с углом наклона $63,5^\circ$ и с тем же периодом обращения, называемая полустационарной орбитой, также высокостабильна. Проекция этой орбиты описывают на поверхности Земли повторяющиеся восьмерки.

Выбор орбиты ИСЗ, предназначенного для ретрансляции, определяется расстоянием между конечными станциями линии связи, их земными координатами, допустимыми перерывами связи и другими требованиями, предъявляемыми к линии связи.

С точки зрения числа запускаемых ИСЗ и времени перерывов связи наиболее выгодными являются синхронные орбиты. При помощи трех ИСЗ, расположенных под углом 120° на синхронной орбите, и трех наземных ретрансляционных станций, установленных на границах зон прямой видимости ИСЗ, можно создать систему связи, охватывающую 98% всей поверхности Земли. Однако запуск ИСЗ на синхронную орбиту сопряжен с рядом трудностей. Ввиду большой высоты синхронной орбиты (35 810 км) в такой системе связи необходимо применять антенны больших размеров и передатчики большой мощности. Проблеме создания систем связи с использованием ИСЗ, находящихся на синхронной орбите, посвящена статья Хэвиленда «Использование стационарных ИСЗ для связи».

В отличие от ретрансляторов обычных радиорелейных линий ИСЗ на других, не синхронных орбитах является подвижным. Он будет «виден» одновременно на конечных станциях связи только в течение определенного времени, и, следовательно, в подобной системе неизбежны перерывы связи. Устранение этих перерывов возможно при запуске нескольких ИСЗ на приблизительно одинаковые орбиты через произвольные промежутки времени [2, 3], так как при достаточно большом числе ИСЗ всегда будет сущест-

воват вероятность нахождения хотя бы одного из них над заданными пунктами связи. При этом должен быть решен вопрос перехода с одного ИСЗ на другой без перерыва связи.

Продолжительность связи между двумя пунктами через ИСЗ может быть увеличена при использовании наклонных сильно вытянутых эллиптических орбит, апогей которых находится над пунктами связи [4]. Эллиптические орбиты, кроме того, с точки зрения запуска больших по весу ИСЗ при заданной мощности ракеты-носителя более удобны, чем круговые орбиты с высотой, равной апогею эллиптической орбиты.

Необходимо отметить, что ИСЗ не может двигаться по любой орбите вокруг Земли. Он может находиться лишь на такой орбите, плоскость которой проходит через центр массы Земли.

На выбор орбиты влияет наличие в околоземном пространстве радиационных поясов, состоящих из протонов и электронов с высокой энергией. При движении ИСЗ через эти пояса могут произойти серьезные нарушения в работе электронной аппаратуры ИСЗ, в особенности солнечных батарей. Поэтому стараются не использовать орбиты с высотой от 2000 до 20 000 км. При применении эллиптических орбит ИСЗ неизбежно попадают в пояса радиации.

Вопрос о выборе оптимальной орбиты для системы связи через ИСЗ в настоящее время изучен еще не полностью, однако представляется очевидным, что найти орбиту, которая будет оптимальной для всех случаев, невозможно. В зависимости от конкретных требований, предъявляемых к данной линии связи, могут быть использованы те или иные орбиты.

Выбор орбиты также во многом зависит от средств доставки ИСЗ на эту орбиту. В некоторой степени этот вопрос затрагивается в статье Пардо «Техника и экономика системы связи с помощью искусственных спутников Земли».

3. Используемый диапазон частот

Поскольку на ИСЗ нельзя установить передатчики большой мощности, приходится значительно увеличивать чувствительность наземных приемных устройств. Чувстви-

тельность в данном случае необходимо характеризовать не коэффициентом шума, а эффективной температурой шума, которая доводится до нескольких десятков градусов Кельвина.

При наличии приемных устройств со столь высокой чувствительностью приходится считаться с внешними шумами: космическими и шумами атмосферы, а также шумами Земли. Поэтому для связи через ИСЗ должен быть выбран диапазон частот, в котором указанные шумы минимальны. Оптимальным диапазоном для систем связи с помощью ИСЗ оказывается диапазон 1–10 Гц, и, в частности, диапазон 4–6 Гц. Нижний предел этого диапазона ограничивается шумами космического происхождения, а верхний — шумами поглощения в атмосфере. Атмосферные шумы, кроме того, зависят от угла подъема главного лепестка диаграммы направленности антенны над горизонтом. При малых углах эти шумы увеличиваются. Поэтому считается, что связь целесообразно вести тогда, когда ИСЗ поднялся над горизонтом на $7,5 \div 10^\circ$.

В настоящее время в спроектированных системах связи через ИСЗ прием и передача ведутся на различных частотах. Так, например, в системе «Телстар» прием ведется на частоте 4170 МГц, а передача — на 6390 МГц [5]; в системе связи «Реле» прием ведется также на частоте 4170 МГц, а передача — на 1725 МГц [6]. Такой большой разнос частот приема и передачи позволяет упростить фильтры, разделяющие в аппаратуре ИСЗ приемный тракт от передающего.

При проектировании линий связи с использованием ИСЗ приходится считаться с эффектом Фарадея — вращением плоскости поляризации, возникающим при прохождении радиоволн через ионосферу. Так как электронная концентрация ионосферы непрерывно меняется, то ориентировка плоскости поляризации также меняется, что приводит к замираниям сигнала. Для устранения этих замираний применяют антенны с круговой поляризацией.

4. Виды ретрансляции через искусственные спутники Земли. Системы связи

Как и в обычных радиорелейных линиях, различают пассивную и активную ретрансляцию.

При пассивной ретрансляции усиление сигнала в пункте ретрансляции, в данном случае на ИСЗ, не производится. ИСЗ при этом является простым отражателем, например имеющим форму сферы, как это было принято в проекте «Эхо» [7]. Очевидно, что при такой ретрансляции мощность передатчика наземной станции должна быть велика, чувствительность приемников высока, размеры антенн большие, а высота орбиты ИСЗ не может быть большой. Поэтому, несмотря на то что данный вид ретрансляции имеет ряд преимуществ (более высокая надежность, широкополосность, возможность работы большого числа корреспондентов через один ИСЗ одновременно), она не считается перспективной, хотя полностью от нее не отказываются.

При активной ретрансляции на ИСЗ производится усиление принятого с наземной станции сигнала и передача его на другую наземную станцию. В свою очередь активная ретрансляция подразделяется на мгновенную (или ретрансляцию в реальном масштабе времени) и на задержанную. При мгновенной ретрансляции сигнал на ИСЗ усиливается и мгновенно передается далее. При этом, как правило, усиление сигнала производится без демодуляции. В случае задержанной ретрансляции при прохождении ИСЗ над наземной станцией принятый на нем сигнал запоминается в устройстве памяти; при прохождении над другой станцией-корреспондентом сигнал на ИСЗ считывается и передается на нее.

Задержанная ретрансляция применена в системе «Курьер» [8]. Эта система описана в статье Зинглина и Сенна «Искусственный спутник Земли «Курьер». Все остальные статьи посвящены в основном системам связи с мгновенной активной ретрансляцией.

Могут быть созданы различные системы связи, использующие ИСЗ. Простейшей из них является система магистральной связи, в которой ИСЗ ретранслирует сигналы, проходящие только между двумя наземными станциями.

Более сложной является система связи, в которой производится ответвление групп каналов, обеспечивающих связью определенную территорию. В такой системе ИСЗ ретранслирует сигналы, проходящие между несколькими парами наземных станций или одной центральной и несколькими

периферийными. Такая система рассмотрена в статье Сандемана «Системы связи с использованием искусственных спутников Земли, обеспечивающие разделение групп каналов».

Наконец, при сравнительно малом числе каналов для обслуживания определенной территории может быть применена так называемая адресная система по типу системы RASEP, в которой используется статистика речевых сообщений [9].

5. Системы модуляции

При проектировании систем связи с использованием ИСЗ большое внимание уделяется системам модуляции.

Как во всякой многоканальной радиорелейной линии, линии связи с использованием ИСЗ имеют две степени модуляции и демодуляции. Выбор видов модуляции для этих ступеней представляет собой немаловажную задачу. Каждая система модуляции характеризуется выигрышем, который она дает в отношении сигнала к шуму на входе приемного устройства, а также порогом, т. е. тем минимальным отношением сигнала к шуму на входе приемника, при котором данный выигрыш еще сохраняется.

Поскольку энергетика линии связи, использующей ИСЗ, напряжена, необходим выбор такой системы модуляции, которая имеет максимальный выигрыш при минимальном пороге. При этом ширина полосы частот приемного устройства не должна быть слишком большой.

Считается, что оптимальной системой модуляции является система с однополосной амплитудной модуляцией в первой степени при частотном разделении каналов и частотной модуляцией во второй степени (ОБ—ЧМ). При этом для увеличения выигрыша применяют большой индекс модуляции. Однако при этом вследствие расширения полосы пропускания увеличивается порог. Для устранения этого противоречия в наземных радиоприемных устройствах применяют обратную связь по частоте (ОСЧ), предложенную Чейффи в 1939 г., позволяющую сузить полосу, уменьшив при этом порог.

Систему модуляции ОБ—ЧМ нельзя считать последним словом для линий связи, использующих ИСЗ. В настоящее время обращают внимание на системы с ИКМ в сочетаниях

ИКМ—ЧМ [10] или ИКМ—ОБ. Последняя система имеет потенциальную возможность для разделения групп каналов и рассматривается в упомянутой выше статье Сандемана, а возможный принцип построения аппаратуры кодирования — в статье Брэдли «Система кодирования и декодирования при импульсно-кодовой модуляции», помещенной в настоящем сборнике.

6. Особенности мгновенной активной ретрансляции через искусственный спутник Земли

В отличие от обычных радиорелейных линий ретранслятор, помещенный на ИСЗ (кроме случая, когда ИСЗ находится на синхронной орбите), является подвижным. При движении ретранслятора необходимы: его сопровождение наземными антеннами и учет эффекта Доплера. Даже в случае ИСЗ на синхронной орбите необходимость сопровождения остается, так как под воздействием ряда возмущающих факторов ИСЗ на синхронной орбите может изменять свою скорость.

Необходимость сопровождения значительно усложняет наземные антенные устройства, тем более что скорости сопровождения должны быть велики, особенно при использовании ближних орбит. Точность сопровождения должна быть высока вследствие весьма малых углов раствора главного лепестка диаграммы направленности антенны. Антенное устройство наземной станции линии связи через ИСЗ представляет собой сложное и наиболее дорогостоящее сооружение наземного комплекса; например, диаметр параболических антенн достигает нескольких десятков метров.

Для перемещения антенны используется система координат: азимут — угол места. Сопровождение антенной ИСЗ осуществляется обычными методами, применяемыми в радиолокации. Может быть применен суммарно-разностный метод или пространственная развертка.

В качестве сигнала, по которому осуществляется слежение, используется сигнал специального радиомаяка, расположенного на ИСЗ. В некоторых системах частота радиомаяка весьма близка к рабочей частоте ретранслятора; например, в системе «Телстар» частота радиомаяка равна

4080 Мгц при частоте передатчика ретранслятора ИСЗ 4170 Мгц.

Некоторые сведения о наземных антенных системах связи с использованием ИСЗ можно почерпнуть из статьи Тодда «Антенные устройства наземных станций в системах связи с помощью искусственных спутников Земли».

Влияние эффекта Доплера на связь с помощью ИСЗ проявляется в следующем. Во-первых, возникает общее смещение спектра на величину доплеровского сдвига частоты, во-вторых, изменение в $(1 + v/c)$ раз частоты каждой спектральной составляющей (где v — составляющая скорости ИСЗ относительно наземной станции по прямой, соединяющей ИСЗ и наземный пункт, а c — скорость распространения электромагнитной энергии). Общее смещение спектра приводит к необходимости расширения полосы пропускания приемника или применения автоматической подстройки частоты, а изменение частот составляющих спектра — к искажениям передаваемого сигнала.

Одной из особенностей ретрансляции через ИСЗ является относительно большая задержка передаваемого сигнала, появляющаяся из-за большой длины трассы Земля — ИСЗ — Земля. Для ИСЗ, находящегося на синхронной орбите, эта задержка доходит до 270 мсек. Такая величина задержки не существенна при передаче телеграфных, фототелеграфных и телевизионных сигналов; однако при передаче телефонных сообщений она вызывает появление вынужденных пауз при разговоре и сильное воздействие на него эхо-сигналов. Наиболее неприятным является влияние эхо-сигналов. Для борьбы с ними применяют специальные эхо-заградители.

В отличие от радиорелейных линий линии связи с использованием ИСЗ имеют различные в энергетическом отношении интервалы Земля — ИСЗ и ИСЗ — Земля. Поскольку мощность передатчика на ИСЗ не может быть большой, интервал ИСЗ — Земля является наиболее напряженным, что заставляет в наземных приемниках применять малошумящие усилители, например парамагнитные или охлаждаемые параметрические.

Линия радиосвязи, использующая ретрансляцию через ИСЗ, для нормального ее функционирования дополняется телеметрической линией, передающей на Землю данные о состоянии аппаратуры ИСЗ и об окружающих условиях,

а также командной линией, по которой на ИСЗ передаются команды, управляющие работой аппаратуры ИСЗ. Указанные линии обычно работают на более низких частотах по сравнению с частотами основной линии связи.

Одним из важных вопросов при создании ИСЗ — ретранслятора является вопрос о стабилизации его положения в пространстве. Стабилизация дает возможность использовать на ИСЗ направленные антенны и ориентировать солнечные батареи на Солнце. В большинстве случаев предлагается использовать антенны с главным лепестком диаграммы направленности, освещающим всю поверхность Земли. Кроме системы стабилизации, ИСЗ может содержать двигатели, корректирующие его орбиту.

Из сказанного выше следует, что ИСЗ содержит большой комплекс устройств, от которых зависит нормальная работа линии связи.

7. Вопросы надежности

Считается, что линия связи, использующая ИСЗ, будет экономически оправдана в том случае, если продолжительность безотказной работы ИСЗ будет составлять несколько лет. Это предъявляет весьма жесткие требования к надежности устройств, установленных на ИСЗ. Эти требования особенно трудно выполнить в связи с тем, что аппаратура ИСЗ работает в весьма сложных космических условиях, а именно: при глубоком вакууме, в условиях резко изменяющейся температуры, при воздействии солнечного излучения, микрометеоров и радиации, а также невесомости [12]. Аппаратура должна выдерживать механические сотрясения, ускорение и вибрацию в момент запуска [13]. Особенно сильно воздействие внешних условий на солнечные батареи, используемые в настоящее время для питания аппаратуры ИСЗ [14]. С течением времени эффективность солнечных батарей из-за этого обычно падает. Насколько серьезна проблема надежности для связных ИСЗ, можно судить по тому, что запущенные ИСЗ «Телстар» и «Реле» в скором времени выходили из строя. Ввиду этого аппаратуру ИСЗ стремятся делать предельно простой и не применять на нем передатчиков мощностью более 10 *вт*.

8. Нормы на телефонные каналы

Пока нормы на телефонные каналы линий связи, использующих ИСЗ, не выработаны. Этими нормами занимается IV Исследовательская комиссия МККР. Считается, что они должны быть близки к нормам телефонных каналов радиорелейных линий. Однако, учитывая, что длина линии связи, использующей ИСЗ, значительно больше, чем длина гипотетической радиорелейной линии (2500 км), предполагается смягчить нормы на шумы телефонного канала, доведя их до 30 000 *пвт* в точке с нулевым относительным уровнем в течение любого часа. Рекомендуется при этом вводить предварительную коррекцию, как в обычных радиорелейных линиях связи.

В. В. Марков

ЛИТЕРАТУРА

1. Pierce J. R., Orbital radio relays «Jet Propulsion», 1955, v. 30, № 6.
2. Pierce J. R., Kompfer R., Transoceanic Communication by Means of Satellites, *Proc. IRE*, 47, 3 (1959).
3. Pierce J. R., Exotic Radio Communications, *Bell Laboratories Record*, 37, 9 (1959).
4. Buss B., Millburk J. A., A proposal for an active communication satellite based on inclined elliptic orbits, *Brit. IRE Conv. on Radio Techn. Space Res.*, № 7, Séc. 7, 1961.
5. Ross I., The Telstar satellite, *Signal*, 26, 12 (1962).
6. The project «Relay» communication satellite system, *Electronics and Communications*, 10, 6 (1962).
7. Jakes W. C., Participation of Bell Telephone Laboratories in Project Echo and Experimental Results, *Bell System Techn. J.*, 40, 4 (1961).
8. Courier to speed new communications era, *Electronics*, 33, 36 (1960).
9. Martin Military Combat Network Proposal, *Interavia Air Letter*, № 5086 (September 1962).
10. Pollack L., Radio communication using earth-satellite repeaters *Electrical Communication*, 36, 3 (1960).

11. Bray W., Satellite communication system, *Post Office Electr. J.*, 55, Pt. 2 (July 1962).
12. Tochlin E., Space radiation and communication satellites, *Naval Res. Rev.*, № 2 (1962).
13. Dummer G. W. A., The reliability of components in satellites, *J. Brit. IRE*, 22, 6 (1961).
14. Smits F. M. and oth., Solar cells for communication satellites in the Van Allen Belt, *Brit. IRE Conv. on Radio Techn. and Space Res.*, E., 3 (1961).

1. Линии связи с помощью искусственных спутников Земли¹

Джоллифф С., Райт У.

1. Введение

После запуска первого советского искусственного спутника Земли (ИСЗ) в октябре 1957 г. последовала целая серия запусков ИСЗ. За этот период научные эксперименты с помощью ИСЗ углубили наше понимание природы космоса и привели к огромным достижениям, кульминационным пунктом которых был запуск на орбиту ИСЗ с космонавтом Ю. А. Гагариным на борту и его благополучное возвращение на Землю². События показали, что для дальнейшего прогресса в исследовании космоса жизненно необходима эффективная связь. При отсутствии связи значение ИСЗ как средства научных исследований резко снижается.

Соревнование двух великих держав в области космических исследований продолжается и в настоящее время, причем это соревнование способствует прогрессу науки и техники. События показывают, что чисто научные исследо-

¹ Jolliffe S. A. W., Wright W. L., Point to Point Telecommunications, v. 6, № 3, 1962, 6—28.

² Первый запуск космического корабля с космонавтом Ю. А. Гагариным был осуществлен в Советском Союзе в апреле 1961 г. — Прим. ред.

вания через небольшой промежуток времени приводят к новым достижениям в области техники. Сейчас уже видны некоторые практические результаты изучения космоса. Одним из таких результатов явится радиосвязь посредством ИСЗ; за разрешение этой проблемы с большой готовностью принялись инженеры-связисты.

Существующая глобальная радиосвязь осуществляется в основном с помощью узкополосных передач в сильно перегруженном коротковолновом диапазоне; регламентация связи в этом диапазоне частот имеет лишь частичный успех. Ограниченная полоса частот и случайности отражения от ионосферы не позволяют серьезно рассматривать такую радиосвязь в качестве основного перспективного вида связи, способного удовлетворить растущие потребности; необходимость иной, улучшенной системы связи в настоящее время общепризнана.

Возможность осуществления дальней радиосвязи с помощью ИСЗ была предсказана еще до первого запуска [1]. В настоящее время или в ближайшем будущем реализация такого проекта будет вполне возможна, хотя и в ограниченном объеме. В течение ближайшего десятилетия первым практическим результатом больших затрат на исследование космоса, безусловно, будет разработка усовершенствованных систем связи и навигации.

Связь с помощью ИСЗ должна стать важной составной частью глобальной системы связи и навигации, организованной военным ведомством, так как безопасность страны может зависеть от своевременного поступления важного сообщения в определенный отдаленный пункт. В системах военной связи стоимость не имеет решающего значения. Однако будущие системы дальней коммерческой связи должны обеспечивать необходимое количество качественных каналов связи при минимальной стоимости. В настоящее время из-за отсутствия достаточного фактического материала довольно трудно провести сравнительную экономическую оценку этих двух систем. Тем не менее представляется очевидным, что системы связи с помощью ИСЗ дадут возможность увеличить число высококачественных каналов связи.

В настоящее время мощность передатчика, установленного на ИСЗ, может быть лишь весьма ограниченной. Таким

образом, определяющими факторами при построении систем связи, использующих ИСЗ, являются проблемы усиления сигналов и снижения уровня шумов. Весьма важно обеспечить также надежность бортовой аппаратуры, так как запуск ИСЗ обходится дорого, а обслуживание аппаратуры ИСЗ на орбите невозможно. Следовательно, надежность играет определяющую роль при расчете стоимости системы.

В глобальной системе связи с помощью ИСЗ необходимо использовать несколько спутников. При этом желательно сохранение взаимного расположения ИСЗ в космосе, а также их точная ориентация. И то и другое возможно; остается доказать, что при этом сохраняется надежность.

Емкость линии радиосвязи определяется шириной занимаемой полосы частот и отношением сигнал/шум на выходе приемника. В свою очередь отношение сигнал/шум определяется мощностью сигнала на входе приемника, которая зависит от мощности передатчиков, усиления приемной и передающей антенн и потерь при распространении. Обеспечение большого объема передаваемой информации потребует установки на некоторых ИСЗ остронаправленных антенн. В таких системах необходимо точное управление положением и ориентацией ИСЗ.

ИСЗ, запускаемые в настоящее время, имеют малый вес; это объясняется значительными затратами на запуск на орбиту единицы веса и ограниченными возможностями существующих ракет-носителей. При этом общий вес ИСЗ должен быть распределен между конструктивными элементами, системой ориентации, источниками питания, аппаратурой связи и, возможно, системами регулирования температуры и ориентации ИСЗ относительно других ИСЗ. Желательно, конечно, возможно большую часть веса использовать для аппаратуры связи и источников питания, но это допустимо лишь до определенного предела. Со временем появится возможность выведения на орбиту ИСЗ большего веса, что позволит создать системы с увеличенным объемом передаваемой информации.

Ниже подробно рассматриваются факторы, влияющие на эффективность систем связи с помощью ИСЗ.

2. Типы спутника и параметры его орбиты

Существуют два основных типа ИСЗ, ретранслирующие сигналы наземных передатчиков в отдаленные пункты:

1. Пассивный спутник с орбитой малой высоты, отражающий радиосигналы и представляющий собой либо металлизированную сферу большого диаметра, либо пояс из большого числа диполей.

2. Активный спутник, аппаратура которого усиливает принятый сигнал и ретранслирует его в другую точку земной поверхности.

Системы пассивных спутников благодаря простоте устройства обладают высокой надежностью. Ими может пользоваться каждый располагающий наземным оборудованием. Однако даже при сравнительно небольших расстояниях в таких системах необходимо применение больших следящих антенн и мощных передатчиков для получения приемлемого отношения сигнал/шум на входе приемника. Эти системы, без сомнения, весьма перспективны для военной связи из-за большой помехозащищенности, несмотря на сложность и дороговизну наземной аппаратуры. Стоимость аппаратуры приемного наземного пункта такой системы исключает целесообразность ее применения для радиовещания; габариты и стоимость могут сделать нецелесообразным их применение и на подвижных объектах.

Активные ИСЗ делятся на два основных вида — с высокой орбитой и с низкой орбитой. Использование высокой орбиты, расположенной на высоте 35 810 км над Землей, дает возможность создать систему со стационарным ИСЗ. В такой системе перекрытие практически всей земной поверхности может быть достигнуто с помощью трех ИСЗ. Эта система весьма интересна, но ее использование затруднено по причине следующих четырех недостатков: запаздывание сигнала, нестабильность орбиты, ограничения в мощности передатчика и перегруженность спектра частот. Наиболее важным из этих недостатков является запаздывание сигналов.

Запаздывание ответного сигнала, посланного через стационарный ИСЗ, составляет 0,48 сек, что при определенных обстоятельствах может вызвать перерыв в разговоре, т. е. серьезное неудобство для абонентов. Вполне может случить-

ся, что полоса частот, отводимая для связи, будет меньше необходимой, поскольку в случае использования стационарного ИСЗ более целесообразно применение широкополосной модуляции, чем при ИСЗ на орбитах малой высоты.

Система связи с помощью ИСЗ, находящихся на низких орбитах, потребует использования большого числа ИСЗ, расположенных на разных орбитах, с тем чтобы по крайней мере один ИСЗ всегда находился в поле зрения двух наземных станций. (Эта задача до некоторой степени облегчается возможностью предварительного расчета всех орбит и планирования перерывов связи.)

Характеристики орбиты ИСЗ (высота над поверхностью Земли, период обращения, форма и наклон орбиты к плоскости земного экватора) определяют точки на земной поверхности, между которыми можно установить связь, и период времени, в течение которого ИСЗ находится одновременно в поле зрения обеих станций.

Число ИСЗ, находящихся на несинхронных орбитах, необходимое для обеспечения непрерывной связи двух наземных станций, может быть резко уменьшено, если взаимное положение ИСЗ будет поддерживаться постоянным. Положение ИСЗ относительно других ИСЗ может сохраняться неизменным только путем непрерывной коррекции его орбиты с помощью расположенных на нем реактивных двигателей.

Можно использовать для связи также ИСЗ на эллиптических орбитах. Хотя для стабилизации положения ИСЗ на эллиптической орбите требуется большая мощность, чем на круговой орбите, все же для запуска ИСЗ, обеспечивающих перекрытие всей земной поверхности, в этом случае потребуются ракеты меньшей общей мощности, чем в случае запуска ИСЗ на круговые орбиты.

Связь между наземными станциями, расположенными в ограниченном диапазоне широт, может быть обеспечена более экономично с помощью ИСЗ на эллиптических орбитах, нежели на круговых орбитах. Если наклон орбиты взят равным $63,4^\circ$, то высота в апогее остается постоянной и может быть выбрана такой, чтобы обеспечить необходимое перекрытие. Поскольку ИСЗ движется вблизи перигея с максимальной скоростью, то большую часть периода он

находится на больших высотах вблизи нужной широты. Для установления связи между Северной Америкой и Европой наиболее экономичной системой, по-видимому, будет система с ИСЗ на эллиптических орбитах.

Основные характеристики двух систем связи с помощью активных ИСЗ приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Система связи с ИСЗ на синхронной орбите

Преимущества	Недостатки
<ol style="list-style-type: none"> 1. Необходимость малого числа ИСЗ для перекрытия всей земной поверхности (исключая полярные области) 2. На каждой наземной станции необходима лишь 1 антенна без системы слежения 3. Минимальный сдвиг частоты из-за эффекта Доплера 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Низкая надежность (выход из строя одного ИСЗ нарушает работу всей глобальной системы связи) 2. Необходимость больших мощностей передатчиков ИСЗ 3. Необходимость аппаратуры стабилизации и ориентации ИСЗ 4. Для обеспечения правильности вывода на заданную орбиту необходим строгий контроль за условиями запуска 5. Необходимость ракет большой мощности 6. Задержка сигнала во времени 7. Невозможность перекрыть полярные области

Таблица 2

Система связи с ИСЗ на низких орбитах

Преимущества	Недостатки
<ol style="list-style-type: none"> 1. Относительная простота связной аппаратуры на ИСЗ 2. Выход из строя одного ИСЗ не приводит к полному нарушению работы системы 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Необходимо значительное количество ИСЗ 2. На каждой наземной станции необходимо иметь две следящие антенны

Продолжение

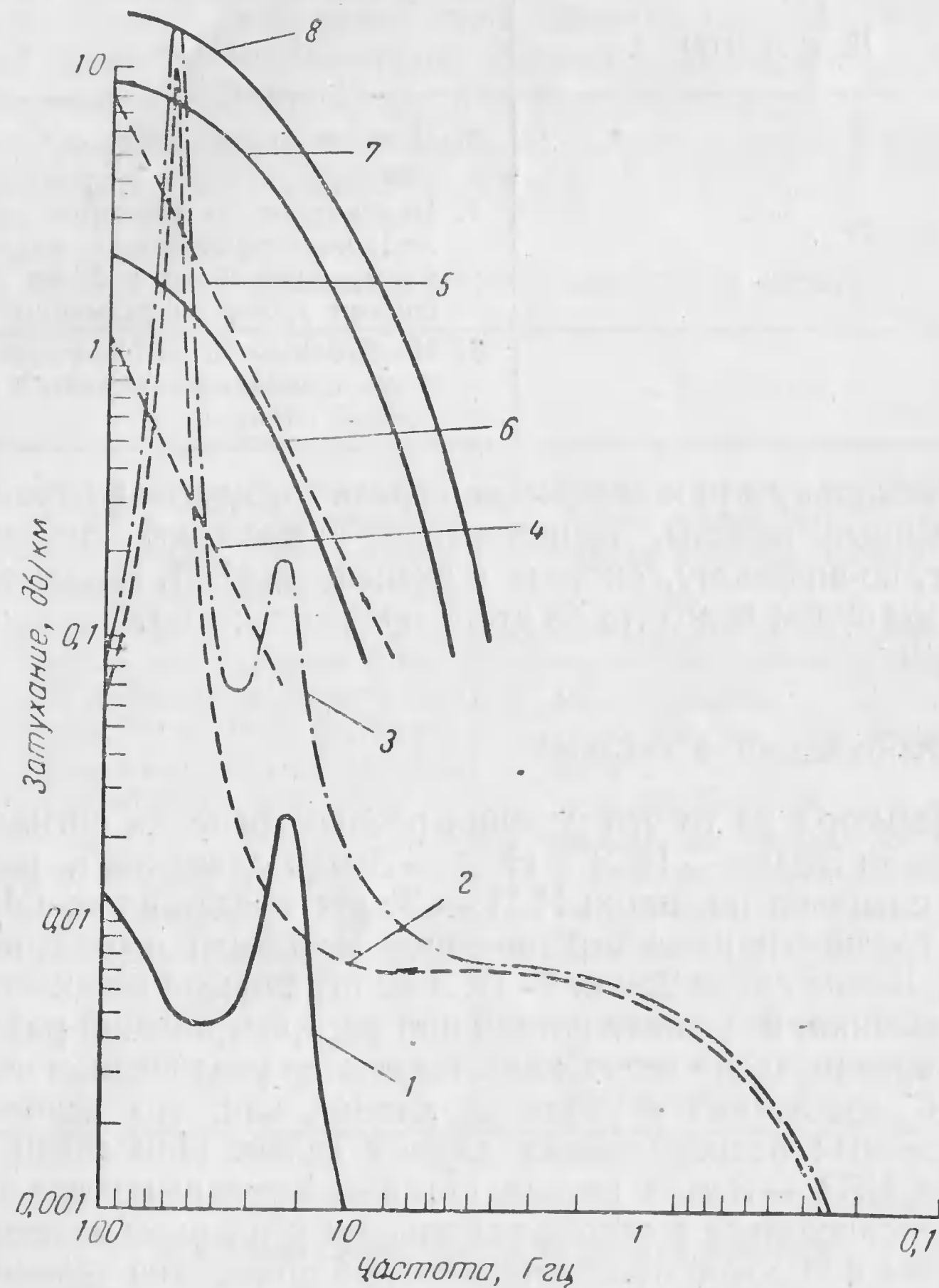
Преимущества	Недостатки
	<ol style="list-style-type: none"> 3. Необходимость точного слежения 4. Необходимость решения проблем конструирования аппаратуры, связанных с более высокими уровнями радиации 5. Необходимость автоподстройки и синхронизации частоты в наземной аппаратуре

Поскольку для коммерческой связи требуются высококачественные каналы, единственной приемлемой системой будет, по-видимому, система с активными ИСЗ. В дальнейшем мы будем исходить из этого предположения.

3. Соображения о системе

Несмотря на то что условия распространения сигналов по линии Земля — ИСЗ и ИСЗ — Земля одинаковы, передача сигналов по линии ИСЗ — Земля представляет большие трудности из-за ограниченной мощности передатчика ИСЗ. Линия связи Земля — ИСЗ не ограничена мощностью передатчика, и поэтому потери при распространении радиоволн сравнительно легко компенсируются увеличением мощности передатчика и усиления антенн, как это делается в наземных радиорелейных линиях связи. При связи по линии ИСЗ — Земля потери при распространении должны компенсироваться в основном большим усилением наземной антенны и высокой чувствительностью приемника наземной станции.

Определение для линии связи с помощью ИСЗ оптимальной частоты как частоты, обеспечивающей при заданных мощностях передатчика, усилении антенн и ширине полосы максимальное отношение сигнал/шум на входе приемника, неполно, поскольку при этом не принимаются во внимание зависимость к. п. д. и веса передатчика от частоты. По-видимому, правильнее понимать под оптимальной частотой



Фиг. 1. Затухание в атмосфере:

1—водяные пары, $7,5 \text{ г/м}^3$; 2—кислород при давлении 760 мм рт. ст. и 20°С ; 3—средняя атмосфера летнего дня в умеренной зоне, т. е. $7,5 \text{ г/м}^3$ водяных паров и кислород при давлении 760 мм рт. ст. и 20°С ; 4—легкий туман или облака с содержанием водяного пара $0,32 \text{ г/м}^3$ (видимость около 120 м); 5—густой туман или облака с содержанием водяного пара $2,3 \text{ г/м}^3$ (видимость около 30 м); 6—средний дождь, 4 мм/час ; 7—сильный дождь, 25 мм/час ; 8—ливень, 50 мм/час .

такую частоту, при которой достигается необходимая разборчивость сигнала на выходе приемника при минимальном потреблении мощности от источника питания на ИСЗ с учетом веса аппаратуры и ее надежности на различных частотах. Таким образом, вопрос о выборе оптимальной частоты для связи ИСЗ с наземными станциями оказывается весьма сложным, поскольку на этот выбор оказывают влияние практически все параметры системы. Некоторые из этих параметров будут кратко рассмотрены ниже.

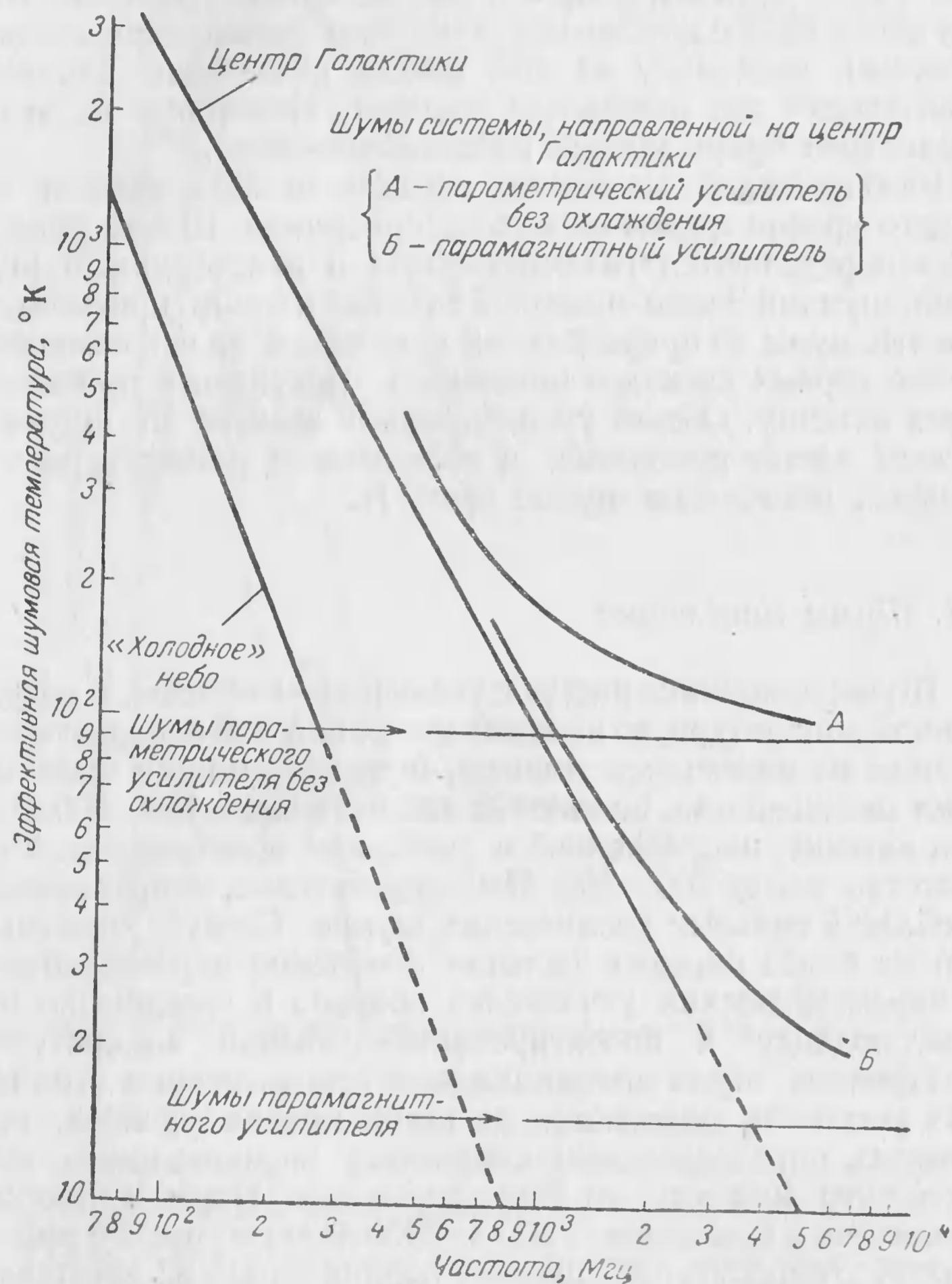
Разборчивость выходного сигнала отчасти зависит от общего уровня шумов на выходе приемника. Шумы приемника определяются галактическими и атмосферными шумами, шумами Земли, наземной антенны и самого приемника. Все эти шумы по природе своей тепловые и за исключением шумов первых каскадов приемника поступают в приемник через антенну. Общий уровень шумов зависит от ширины полосы частот приемника и эффективной температуры отдельных источников шумов (фиг. 1).

3.1. Шумы приемника

Шумы приемника растут с увеличением частоты. В современной аппаратуре, во входных цепях которой используются лучшие из имеющихся триодов, шумы приемника преобладают над внешними шумами на частотах выше $150\text{--}200 \text{ МГц}$ при антенне, направленной в свободное пространство, а на частотах выше $300\text{--}400 \text{ МГц}$ при антенне, направленной в область сильных космических шумов. Следует отметить, что на более высоких частотах появление парамагнитных и параметрических усилителей привело к совершенно новому подходу к проектированию связной аппаратуры. Внутренние шумы приемника при использовании этих новых устройств снижаются до таких низких уровней, при которых определяющими становятся внешние шумы космического или земного происхождения. Параметрические усилители в диапазоне от 500 до 3000 МГц работают с эффективной температурой шумов порядка 100°К ; изготовлены парамагнитные усилители (мазеры) на частоту в несколько тысяч мегагерц с температурой шумов порядка 15°К .

3.2. Внешние шумы

Путь распространения сигнала с ИСЗ на Землю частично проходит в частотно-селективной атмосфере Земли. Пре-



Фиг. 2. Температура шумов отдельных элементов и системы в целом.

делы полосы частот, свободно проходящих сквозь земную атмосферу, задаются, с одной стороны, явлениями в ионосфере, препятствующими прохождению частот ниже 100 МГц, и, с другой стороны, поглощением водяными парами и кислородом тропосферы, которое заметно сказывается на частотах выше 10 000 МГц. Большие потери вызываются осадками в виде дождя, снега или града. Предсказать эти потери очень трудно, так как сильно изменяется как интенсивность осадков, так и частота их выпадения в зависимости от географического местоположения. При мощностях передатчика, которые можно ожидать в настоящее время, верхний предел диапазона ограничивается частотами порядка 6—10 ГГц (см. фиг. 1). Необходимо принимать во внимание также галактические или космические шумы, имеющие различную интенсивность в различных областях неба и уменьшающиеся с ростом частоты, что указывает на желательность использования более высоких частот (фиг. 2).

Если приемная антенна направлена на Солнце, то радиошумы Солнца могут серьезно ухудшить качество связи или даже полностью нарушить ее.

Индустриальные помехи от линий электропередачи или обширных населенных областей можно, как правило, свести к минимуму выбором такого места расположения приемной антенны, при котором складки местности между ней и источником шумов обеспечивают необходимое ослабление последних.

При использовании сверхвысоких частот атмосферные помехи от дальних грозных очагов никакого значения не имеют.

3.3. Шумы системы

Объем информации, могущей передаваться по линии связи, частично определяется величиной отношения сигнал/шум на выходе приемника, которое изменяется обратно пропорционально шумовой температуре приемной системы. Шумы системы выражаются шумовой температурой T_s , причем $T_s = T_r + T_e$, где T_r — шумовая температура приемника и T_e — температура внешних шумов, поступающих в систему через антенну. В полосе частот 1—7 ГГц имеются три основных источника внешних шумов — шумы Земли, Галактики и Солнца. Температура внешних шумов,

воспринимаемых наземной приемной антенной, зависит от того, на какую часть неба направлены главный и боковые лепестки диаграммы направленности антенны и каковы свойства отражающей земной поверхности. Уровень шумов, воспринимаемых антенной, зависит от ее ориентации, примененной поляризации, ширины главного луча, уровня боковых лепестков, отражающей способности окружающей поверхности Земли и от времени.

Земля также излучает шумы определенной интенсивности, поскольку она нагрета до некоторой температуры и не является идеальным проводником; эти шумы воспринимаются боковыми лепестками антенны. Снижение уровня этих шумов может быть достигнуто путем конструирования антенн с уровнем лепестков, много меньшим, чем у обычных направленных антенн, или, как предлагалось, путем покрытия Земли отражающим металлическим слоем. Простым методом уменьшения шумов Земли является прекращение работы радиолинии при малых углах места спутника. Такое предложение, может быть, придется принять, хотя оно и снижает продолжительность сеанса связи с каждым ИСЗ, находящимся на низкой орбите. Температура галактических шумов может изменяться на частоте 1 Гц в пределах от 10 до 110° К , в зависимости от того, направлена ли антенна в «холодное» небо или на центр Галактики. Это изменение температуры внешних шумов может происходить за время пролета ИСЗ по низкой орбите. Оно может происходить за счет вращения Земли также и в системе со стационарным ИСЗ.

В системах, использующих как высокие, так и низкие орбиты, в известные моменты главный лепесток диаграммы направленности приемной антенны будет направлен на Солнце; в это время будут наблюдаться шумовые температуры в $250\,000$ и $30\,000^\circ \text{ К}$ на частотах в 1 и 5 Гц соответственно.

Таким образом, очевидно, что эффективность работы системы в те периоды времени, когда приемная антенна направлена на экватор Галактики или на Солнце, значительно ниже, чем тогда, когда антенна направлена на «холодное» небо.

При проектировании системы связи с помощью ИСЗ необходимо остановиться на определенном значении шумовой температуры системы. В связи с этим следует заметить, что

работа хорошо спроектированной наземной радиорелейной линии гарантирует надежную связь в течение $99,9\%$ рабочего времени. Здесь перерыв связи по времени, не превышающий $1 \frac{1}{4} \text{ мин}$ за сутки, может происходить вследствие заранее известных явлений, связанных с распространением сигнала. На некоторых радиорелейных линиях могут наблюдаться дополнительные перерывы связи, связанные с попаданием в систему шумов восходящего или заходящего Солнца, которые также можно предвидеть заранее. В системе связи с помощью ИСЗ влияние распространения радиоволн в атмосфере будет ничтожным, но в определенные периоды времени система будет подвержена воздействию шумов, связанных с высокой температурой Солнца и галактического экватора. Шумы галактического происхождения будут 2 раза в сутки давать сильные помехи системам связи, использующим ИСЗ. Шумы Солнца будут вызывать перерывы связи на несколько минут в течение нескольких дней ежегодно. Например, в линии связи, использующей ИСЗ, имеющей приемную антенну с шириной основного лепестка диаграммы направленности 1° и работающей на частоте 1000 Мгц , температура внешних шумов будет превышать $30\,000^\circ \text{ К}$ в течение 4 мин ежедневно в течение 20 дней в году. Если предположить, что боковые лепестки ослаблены на 30 дб относительно основного, то получим, что температура внешних шумов будет равна 30° К в течение значительно больших промежутков времени. При работе на частоте 5000 Мгц шумовая температура системы будет соответственно 4000 и 4° К .

4. Соображения об аппаратуре

Осуществление надежной связи с помощью ИСЗ потребует решения целого ряда проблем, связанных с аппаратурой. Вероятно, основной из этих проблем является проблема мощности передатчика на ИСЗ.

Существующее в настоящее время ограничение мощности первичных источников питания (такое положение вряд ли существенно изменится в ближайшем будущем) особенно подчеркивает необходимость высокого промышленного к. п. д. передатчика (вычисляемого как отношение выходной мощности к мощности, потребляемой от источника питания

постоянного тока). Транзисторы обладают высокой надежностью, но могут дать мощность лишь в несколько ватт на частотах до нескольких сот мегагерц. Повышения полезной мощности и граничной частоты транзисторов в ближайшие годы ожидать трудно.

Надежность электровакуумных приборов подвергается серьезному испытанию во время запуска ИСЗ, когда возникают большие ускорения и перегрузки. Достаточная полезная мощность может быть получена от триодов с малыми межэлектродными расстояниями и от ламп бегущей волны (ЛБВ), однако в обоих случаях необходимо применять охлаждение. Все же наиболее перспективны, по-видимому, ЛБВ, особенно на частотах 1—5 Гц. Ограничение мощности первичных источников питания в ближайшие годы не позволит получить выходную мощность передатчика на ИСЗ больше нескольких ватт.

5. Антенные устройства

Антенные устройства играют важную роль во всякой системе радиосвязи, поскольку от них зависит объем передаваемой информации. В системе связи, использующей ИСЗ, весьма необходимы антенные устройства с высоким к. п. д. в связи с малой выходной мощностью передатчика на ИСЗ.

5.1. Антенные устройства на ИСЗ

Если ИСЗ стабилизирован в системе земных или пространственных координат, то на нем можно использовать антенну, обладающую некоторым усилением. У ИСЗ первого типа антенна должна быть направлена к центру Земли и ширина ее диаграммы направленности должна быть больше угла, образуемого у ИСЗ касательными к земной поверхности. Антенну стабилизированного ИСЗ можно направить в любом заданном направлении, но для этого, кроме аппаратуры стабилизации ИСЗ, потребуются еще и приборы ориентации антенн. Уменьшение надежности системы от введения дополнительной сложной аппаратуры стабилизации положения ИСЗ и, возможно, аппаратуры ориентации может оказаться неоправданным; более оправданным может оказаться использование дополнительного веса за счет

этой вспомогательной аппаратуры для увеличения выходной мощности передатчика на ИСЗ. Поэтому предпочтение, возможно, будет отдано всенаправленным антеннам, по крайней мере в первом поколении связных ИСЗ.

Если на ИСЗ нет остронаправленных ориентируемых антенн с большим коэффициентом усиления, то для связи двух наземных пунктов, с которых ИСЗ виден одновременно, антенны на спутниках должны иметь изотропную или полуизотропную диаграмму излучения. Так как изотропная диаграмма не может иметь линейную поляризацию, то под изотропным излучением понимается излучение в любом направлении от ИСЗ при некоторой определенной мощности, частоте и с определенной поляризацией.

С точки зрения надежности предпочтительнее использование жестко укрепленных антенн, а не антенн с механическим управлением. Если корпус ИСЗ изготовлен из проводящего материала, то его можно использовать в качестве излучателя, «заземления» или отражателя. Частота, на которой можно возбудить корпус ИСЗ, используемый в качестве излучателя, зависит от его размеров и формы. Другой возможностью является установка антенны на некотором расстоянии от ИСЗ с тем, чтобы затененные участки освещались за счет дифракции.

Для получения изотропного излучения при одном излучающем элементе проще всего использовать турникетную антенну. При наличии нескольких отдельных излучателей получение от каждого из них изотропного излучения не обязательно, но желательно. Если на ИСЗ установлены три взаимно перпендикулярных излучателя, то для получения нужной поляризации их необходимо питать от трех передатчиков с несколько различными частотами. Утрое число передатчиков выгодно также и с точки зрения надежности. Используемые в этом случае излучатели могут быть турникетными, изотропными, дипольными, щелевыми или резонаторными; они могут располагаться как непосредственно на самом ИСЗ, так и вблизи него.

Необходимо отметить, что антенну с изотропным излучением легче осуществить на более низких частотах.

Поляризация излучения в направлении наземной приемной станции будет зависеть от положения ИСЗ, находящегося в поле зрения наземной станции. Плоскость поляриза-

ции излучения поэтому будет изменяться при пролете спутника, находящегося на низкой орбите, и будет различной для различных наземных станций. Следует, однако, заметить, что принимаемый сигнал всегда будет иметь линейную поляризацию, если ИСЗ излучает линейно-поляризованный сигнал равномерно во всех направлениях.

5.2. Наземные антенны для систем связи через ИСЗ, находящиеся на низких орбитах

Если принять, что ИСЗ излучает сигналы на какой-то частоте с определенной плоскостью поляризации равномерно во всех направлениях, то, очевидно, необходимо иметь наземное антенное устройство, способное принимать такие сигналы. Поскольку желательнее осуществлять связь с ИСЗ в течение возможно большего промежутка времени, то наземная антенна должна, очевидно, обладать полуизотропной характеристикой излучения. Такую характеристику можно получить либо с неподвижной антенной, либо с направленной антенной, следящей за ИСЗ по заданной программе.

Неподвижная всенаправленная антенна привлекает своей простотой и отсутствием системы слежения. Однако вследствие ограничения мощности, излучаемой ИСЗ, и необходимости обеспечения передачи большого объема информации наземная антенна должна обладать некоторым коэффициентом усиления. Если требуемое усиление не превышает 15 дБ, то может быть использована антенна типа «волновой канал». При усилении 20 дБ и выше предпочтение следует отдать чашеобразной антенне. В любом случае необходимо использование двух антенн со взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации или двух антенн с круговой поляризацией в обоих направлениях.

5.3. Наземные антенны для системы связи через «синхронные» ИСЗ

Конструкция наземной антенны, предназначенной для связи со стабилизированным ИСЗ на синхронной орбите, должна обеспечить прием сигналов только одной поляризации, поскольку поляризация сигналов такого ИСЗ не изменяется. Практически эта антенна должна все же допускать небольшие угловые перемещения для компенсаций

тех небольших изменений положения ИСЗ, которые неизбежны по крайней мере в первых образцах стабилизированных связных ИСЗ.

Требования большой пропускной способности радиолинии приведут к необходимости уменьшения боковых лепестков диаграммы направленности антенн в системах, использующих спутники как на высоких, так и на низких орбитах. По-видимому, необходимо будет применять более сложные конструкции параболических или рупорно-параболических антенн.

5.4. Оптимальная (по мощности на входе приемника) частота при различных типах антенных устройств

Мощность на входе приемника P_R пропорциональна мощности передатчика P_T , усилению приемной и передающей антенн G_R и G_T и обратно пропорциональна квадратам частоты f и дальности связи d , т. е.

$$P_R = \alpha \frac{P_T G_T G_R}{f^2 d^2}.$$

Частотная зависимость мощности сигнала на входе наземного приемника при распространении энергии в свободном пространстве может быть охарактеризована следующим образом:

1. При ненаправленных антеннах на Земле и ИСЗ или при заданной ширине их диаграммы направленности мощность сигнала на входе приемника обратно пропорциональна квадрату частоты.

2. Мощность сигнала на входе приемника на зависит от частоты, если антенна ИСЗ — всенаправленная или имеет неизменную ширину диаграммы направленности, а направленная наземная антенна имеет заданные размеры. Поскольку G_R пропорционально f^2 , то P_R пропорционально P_T/d^2 .

3. Мощность сигнала на входе приемника прямо пропорциональна квадрату частоты, если при заданных размерах антенн на Земле и ИСЗ они обеспечивают возможность работы с более острыми диаграммами направленности на более высоких частотах. Поскольку G_T пропорционально f^2 и G_R пропорционально f^2 , то P_R пропорционально $P_T f^2/d^2$.

Первые связные ИСЗ, по всей вероятности, не будут иметь системы ориентации их положения, и поэтому излучение их антенн должно быть изотропным. Мощность сигнала на входе приемника не будет зависеть от частоты (до некоторого верхнего предела, когда поглощение в атмосфере станет заметным), и выбор рабочей частоты будет всецело определяться условиями работы аппаратуры. Большие потери при распространении, связанные с использованием ИСЗ, находящегося на синхронной орбите, могут быть отчасти скомпенсированы за счет повышения мощности передатчика или ориентации ИСЗ (в этом случае можно получить усиление антенны спутника порядка 7 дБ). Использование следящей антенны на ориентированном ИСЗ позволит получить повышенное значение коэффициента усиления на более высоких частотах.

6. Оптимизация параметров системы

Из вышеизложенного ясно, что необходимость оптимизации всех параметров линии связи ИСЗ — Земля вызывается очень ограниченной мощностью первичных источников питания на ИСЗ.

Поскольку диаграмма излучения антенн первых связных ИСЗ будет, по всей вероятности, изотропной, а наземные антенны будут следящими, общее затухание сигналов будет по существу независимым от частоты. В таких условиях частота, при которой получается максимальное отношение сигнал/шум системы, определяется точкой с минимальными шумами. Это отношение благодаря применению усилителей с чрезвычайно низким уровнем шума ограничивается лишь природными шумами. Упомянутая частота находится в диапазоне 1—7 Гц. Для устранения периодического ухудшения качества связи системы с высокой пропускной способностью шумами Галактики и Солнца желательно использование более высокочастотной части этого диапазона.

Внутри диапазона частот 1—7 Гц выбор рабочей частоты будет в основном определяться техническими соображениями, связанными с изготовлением аппаратуры и наличием незанятых частот. В настоящее время более вероятно применение антенн с изотропным излучением и передатчиков с высоким к. п. д. для низкочастотного участка диапазона.

7. Характеристика системы

По соображениям экономики целесообразно проектировать систему связи с помощью ИСЗ не менее чем на 600 дуплексных телефонных каналов или 1 телевизионный канал. Желательно доведение числа телефонных каналов до 1 200, что заняло бы полосу частот, равную 5 Мгц, что эквивалентно полосе частот сигналов высококачественного телевидения.

Для передачи таких сигналов по обычным радиорелейным линиям необходима полоса частот порядка 20 Мгц (нормы МККР предусматривают полосу частот 20 Мгц на каждый ствол). Расстояние между станциями наземной радиорелейной линии составляет 50—65 км, в то время как в системе связи с помощью ИСЗ оно достигает ~5 600 км.

В настоящее время на радиорелейных линиях допускается полная мощность шумов не выше 3 пвт на 1 км, что соответствует мощности шумов в 7 500 пвт за счет аппаратуры гипотетической линии длиной 2 500 км.

В этой цифре учитываются как тепловые шумы, так и шумы нелинейных переходов; она соответствует величине отношения сигнал/шум 47,7 дБ в канале шириной 4 кгц. Совершенно очевидно, что характеристики системы связи с помощью ИСЗ должны быть такого же порядка.

Коэффициент шума приемника на ИСЗ может быть примерно на 20 дБ больше, чем коэффициент шума наземного приемника. Увеличение коэффициента шума приемника на ИСЗ компенсируется мощностью наземного передатчика, которая примерно на 30 дБ больше мощности передатчика на ИСЗ; таким образом, уровень шума при передаче с Земли на ИСЗ приблизительно на 10 дБ ниже, чем уровень шума при передаче с ИСЗ на Землю. Поэтому при оценке работы всей системы шумами передачи с наземной станции на ИСЗ можно пренебречь. Шумы нелинейных переходов на обоих участках могут быть одинаковыми. В этих условиях допустимые тепловые шумы на участке ИСЗ — Земля соответствуют отношению сигнал/шум, равному ~ 50 дБ.

Рассмотрим в качестве примера систему, использующую ориентированный по положению ИСЗ на круговой орбите высотой 4 800 км, и систему, использующую ориентирован-

ный по положению ИСЗ на синхронной орбите высотой 35 810 км.

Затухание сигнала в свободном пространстве между изотропными антеннами на частоте 4 Гц равно ~ 183 дБ для ИСЗ на низкой орбите и 197 дБ для ИСЗ на синхронной орбите. Мощность передатчика на ИСЗ с низкой орбитой прием равной 4 Вт, а на ИСЗ, находящемся на синхронной орбите, равной 10 Вт, что, во-видимому, недалеко от истины для ближайшего будущего. При этом качество передачи на участке ИСЗ — Земля будет зависеть от возможности ориентации положения спутника (при этом можно будет реализовать более высокое усиление антенн) и от других параметров системы, включая вид модуляции. Возможно применение трех основных видов модуляции: частотной с большой девиацией частоты, импульсно-кодовой и однополосной амплитудной.

7.1. Широкополосная частотная модуляция

Проводимые в настоящее время эксперименты основаны на применении широкополосной частотной модуляции (ЧМ), поскольку этот вид модуляции хорошо отработан и согласуется с существующими методами уплотнения. Однако такой вид модуляции требует очень широкой полосы частот. Поэтому сейчас рассматриваются и другие виды модуляции; некоторые из них обладают как оперативными, так и техническими преимуществами.

Можно показать, что использование широкополосной ЧМ и применение наземных приемников с обратной связью по частоте позволяет теоретически получить нужное качество передачи на участке ИСЗ — Земля. По рабочим характеристикам участок ИСЗ — Земля вне зависимости от его протяженности можно сравнить с радиорелейной линией длиной 2 500 км, удовлетворяющей требованиям МККР. Для передачи 1 200 телефонных каналов в этом случае необходима полоса частот, равная 50 МГц. Распределение частот в настоящее время предусматривает отведение такой полосы частот; однако перегруженность частотного спектра заставляет внимательно рассматривать любые предложения, позволяющие сузить используемую полосу частот.

7.2. Импульсно-кодовая модуляция

Системы с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ), так же как и системы с ЧМ, являются широкополосными. Обычно при передаче по радиолинии информации в виде речи, музыки или телевизионного изображения непосредственно на вход модулятора передатчика подается напряжение, пропорциональное модулирующему сигналу. Оно модулирует излучаемые передатчиком колебания по амплитуде, частоте или фазе. Существенное отличие систем с ИКМ заключается в том, что модулирующее напряжение обрабатывается до подачи на передатчик: оно превращается в последовательность импульсов, в которой каждая группа импульсов характеризует величину напряжения в дискретные моменты времени. В зависимости от типа используемого передатчика эти импульсы модулируют его по амплитуде, частоте или фазе. Импульсная последовательность состоит из групп импульсов: число импульсов в группе зависит от принятого количества дискретных уровней, при помощи которых аппроксимируется уровень передаваемого сигнала. Число групп импульсов в 1 сек определяется максимальной частотой в передаваемом сигнале. Требуемая при ИКМ ширина полосы частот определяется этими двумя числами.

Для передачи сигналов с ИКМ может быть применен простой и высокоэффективный способ передачи, при котором «единицы» и «нули» двоичного кода передаются путем изменения фазы колебаний передатчика на 180° . Такой вид модуляции получил название фазоразностной модуляции.

Восстановление двоичного кода на фоне шумов и помех может быть произведено с гораздо меньшей вероятностью ошибки, чем при определении мгновенного значения модулирующего сигнала, из которого получены значения кодовых комбинаций. Если приемник при заданном уровне шумов правильно воспроизводит кодовые знаки, то информация может быть воспроизведена, несмотря на сильное затухание при распространении. Более того, импульсы могут быть регенерированы для дальнейших ретрансляций без ухудшения отношения сигнал/шум так, что при ретрансляции шумы в каждом интервале не накапливаются и не добавляются к шумам соседнего интервала.

Можно показать, что при прочих равных условиях и использовании передатчика мощностью 2 *вт* качество работы системы с ИКМ при минимальной ширине полосы частот сравнимо с качеством работы системы с широкополосной ЧМ. Уменьшение выходной мощности передатчика на 3 *дб* связано в рассматриваемом случае с уменьшением передаваемой полосы частот с 50 до 37 *Мгц*.

7.3. Системы с одной боковой полосой частот

Известно, что системы с одной боковой полосой частот занимают полосу, равную полосе передаваемого сигнала. Эта экономия полосы является основным преимуществом таких систем. Другими преимуществами являются отсутствие порога приема и возможность одновременной работы нескольких передатчиков в одном общем стволе. Это позволяет с помощью одного ретранслятора на ИСЗ обеспечить связь по нескольким линиям (в системе ЧМ этого можно достигнуть только разделением канала на поддиапазоны, каждый из которых имеет собственную частотно-модулированную несущую).

Однако при жестких ограничениях мощности передатчика ИСЗ, существующих на сегодняшний день, невозможность увеличения мощности передатчика за счет уменьшения полосы передаваемых частот является основным недостатком системы с одной боковой полосой частот. При такой системе предъявляются также очень высокие требования к пиковой мощности передатчика. Расчет показывает, что для передачи такого же количества информации, как в приведенном выше примере с ЧМ, система с одной боковой полосой должна иметь следующие параметры:

Средняя мощность передатчика на ИСЗ

С низкой круговой орбитой высотой 4 800 <i>км</i>	20 <i>вт</i>
С синхронной орбитой высотой 35 810 <i>км</i>	51 <i>вт</i>
Полная ширина полосы частоты	5 <i>Мгц</i>
Отношение сигнал/тепловые шумы в канале	50 <i>дб</i> (при 1200 каналах)

При этом предполагается, что пиковая мощность передатчика на ИСЗ с низкой орбитой может достигать 115 *вт*, а на ИСЗ с синхронной орбитой — 288 *вт* при пиках много-

канального сигнала; пик-фактор сигнала (превышаемый в течение 1% времени) принят равным 2,4 (т. е. + 7,6 *дб*).

7.4. Краткое сравнение различных видов модуляции

Нельзя сказать, чтобы выбор вида модуляции для связи на участке ИСЗ — Земля был очевидным. Наиболее многообещающими системами в настоящее время являются системы с ЧМ и обратной связью по частоте и системы с ИКМ, передаваемой с помощью фазо-разностной модуляции с подавлением одной боковой полосы частот.

Системы с ЧМ хорошо известны и почти повсеместно применяются в аппаратуре наземных радиорелейных линий связи; поэтому вполне вероятно, что в течение ближайших нескольких лет благодаря ограничениям выходной мощности передатчика ИСЗ будут широко применяться системы широкополосной ЧМ с обратной связью по частоте в приемнике, которые могут быть осуществлены уже в настоящее время.

По мере накопления опыта работы с импульсно-кодовыми системами такие системы, возможно, будут находить все большее применение. При определенных условиях эти системы дают значительный выигрыш в мощности и занимаемой полосе частот.

Ввиду столь высоких требований к мощности передатчика на ИСЗ при передаче одной боковой полосы (средняя мощность 20—50 *вт*), по крайней мере в первом поколении связанных ИСЗ, такой метод позволяет передать только примерно $\frac{1}{5}$ часть информации. Относительные рабочие параметры систем приведены в табл. 3.

Непригодность системы с одной боковой полосой для участка ИСЗ — Земля не исключает возможности ее применения на участке Земля — ИСЗ, где требования больших пиковых мощностей могут быть удовлетворены. При этом, конечно, на ИСЗ потребуется дополнительная аппаратура для преобразования вида модуляции; тем не менее такая система заслуживает внимательного рассмотрения в тех случаях, когда необходима работа через ИСЗ одновременно многих наземных станций.

Системы с большой пропускной способностью будут необходимы для осуществления связи между двумя пунктами

Таблица 3

Теоретические требования к мощности и ширине полосы частот при наличии на участке ИСЗ — Земля 1200 телефонных каналов с отношением сигнал/шум 50 дБ в каждом канале шириной 4 кГц

Модуляция	Полоса частот, Мгц	Мощность бортового передатчика, Вт			
		круговая орбита высотой 4800 км		синхронная орбита	
Амплитудная с одной боковой полосой частот	5	20	средняя пиковая	51	средняя пиковая
Широкополосная частотная с обратной связью по частоте	50	4		10	
Импульсно-кодовая с фазоразностной модуляцией несущей	37	2		5	

с большим обменом информации, например для трансатлантической связи. Во многих других случаях, когда общий обмен информацией будет очень большим, система, вероятно, будет состоять из нескольких стволов, по которым одновременно будет осуществляться связь с помощью одного ИСЗ. Только применение многоканального уплотнения, используемого при многоканальной передаче с одной боковой полосой, дает возможность с помощью одного приемника осуществить прием нескольких сигналов, одновременно передаваемых в различных участках общей полосы частот. Демодуляция принятого сложного сигнала не представляет трудности, поскольку она осуществляется простым выделением нужных частот из общей полосы с помощью фильтров и в случае необходимости коррекцией сдвига частоты возникающего из-за эффекта Доплера. Если, кроме этого, учесть еще экономию полосы частот, то система с одной боковой полосой окажется привлекательной и заслуживающей внимания, несмотря на жесткие требования к линейности и необходимость больших пиковых мощностей.

8. Надежность и влияние условий окружающей среды в космосе

Условия среды, окружающей ИСЗ на орбите, являются весьма тяжелыми для аппаратуры. Аппаратура, по крайней мере первого поколения ИСЗ, будет ограничена по весу, габаритам и потребляемой мощности даже по сравнению с самолетной аппаратурой. Эта аппаратура должна выдерживать механические и тепловые удары, связанные с быстрым прохождением спутника сквозь земную атмосферу, и должна нормально работать в условиях окружающей среды на высоте до 35 810 км.

Условия окружающей среды могут вызывать электрические, магнитные или химические изменения в незащищенной аппаратуре на ИСЗ. Выход из строя детали будет зависеть от того, насколько рабочий режим данной детали чувствителен к изменению условий окружающей среды, что зависит от выбранной орбиты ИСЗ.

Наибольшую опасность для работы аппаратуры в космосе представляют радиация и высокий вакуум. Разрушения, производимые радиацией, пропорциональны энергии, проникающей способности и общему потоку радиации, которые зависят от высоты орбиты. Длительное облучение «жесткой» радиацией внутреннего радиационного пояса, максимум которой находится на высоте 2 400 км, может вызвать серьезные нарушения; облучение «мягкой» радиацией при высоком вакууме ведет к поверхностной эрозии.

Экранирование от «жесткой» радиации не окупает затрачиваемого на него веса, поскольку радиация с высокой энергией вызывает вторичное γ -излучение экрана, разрушительное действие которого, вероятно, превосходит действие первичной падающей радиации.

Защитой от «мягкой» радиации может служить металлический контейнер, в котором размещаются все элементы. Все элементы, за исключением движущихся частей, могут быть защищены от воздействия высокого вакуума путем герметизации в капсулах или заливки компаундом. Элементы, имеющие подвижные части, могут быть защищены от испарения только путем помещения их в герметичные коробки.

Аппаратура должна выдерживать ускорения в 15 g при вибрациях с частотой до 2 000 гц.

Поскольку отказ или неисправность аппаратуры на ИСЗ устранить невозможно, ухудшение параметров работы аппаратуры ИСЗ недопустимо, и так как параметры системы и без того находятся на пределе, а система связи с помощью ИСЗ должна работать безотказно, то надежность аппаратуры в таких системах имеет решающее значение.

В этих условиях наиболее оправданный подход к решению проблемы заключается в использовании возможно более простых элементов и цепей, удовлетворяющих требованиям эксплуатации. Все элементы и цепи должны быть подвергнуты испытаниям в камере, условия в которой должны по возможности воспроизводить условия полета ИСЗ. Весьма вероятно, что необходимая надежность может быть достигнута только за счет увеличения весов, габаритов и потребляемых мощностей и при двойном или тройном резервировании аппаратуры.

9. Заключение

В начале данной статьи были рассмотрены некоторые из факторов, определяющих пропускную способность системы связи, использующей ретрансляторы, расположенные на ИСЗ. В настоящее время можно сказать только, что такие системы теоретически осуществимы. Практические системы связи с помощью ИСЗ можно создавать только после того, как будет доказано, что аппаратура может длительное время работать в космических условиях. Если окажется, что срок службы ретранслятора, расположенного на ИСЗ, достаточен для более дешевой, чем при существующих методах, передачи информации, этот новый метод сможет конкурировать с существующей коммерческой связью в мировом масштабе.

Работа первых систем связи с помощью ИСЗ будет определяться в основном параметрами аппаратуры, расположенной на ИСЗ. Первоначально будут использоваться системы с частотной модуляцией; впоследствии возможно применение других видов модуляции, которые могут быть различными в различных частях системы.

2. Некоторые практические проблемы связи с помощью искусственных спутников Земли¹

Пирс Дж.

1. Введение

В области связи с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ) имеется множество нерешенных проблем². Целью данной статьи является краткое описание некоторых из них и изложение взглядов автора на эти проблемы.

Прежде всего необходимо отметить, что практическая связь с помощью ИСЗ может быть осуществлена без разработки каких-либо новых идей.

Возможно построение нескольких типов систем связи с помощью ИСЗ. Однако, чтобы любая из систем могла работать удовлетворительно, потребуются большие затраты и продолжительное время для исследований и разработок. При выборе типа системы необходимо уметь ответить на такие вопросы, как: сколь быстро может система быть

¹ Pierce J. R., Communication Satellites, Academic Press, Lnd.— N. Y., 1962, p. 85—94.

² Связь с помощью ИСЗ изучается лабораториями фирмы «Белл телефон» с 1954 г. Большая программа работ по практической связи с помощью спутников проводится уже более 2 лет. Первое большое экспериментальное исследование было проведено фирмой по проекту «Эхо». Фирма проводит обширные экспериментальные и проектные работы, которые должны привести к действующей системе связи с помощью активных ИСЗ.

введена в действие; насколько она сможет удовлетворить требованиям к ней; будет ли она экономически выгодной. Такие вопросы приводят к несколько более узким, но все же достаточно серьезным практическим проблемам, некоторые из которых будут кратко рассмотрены ниже.

Первая и жизненно важная проблема — как включить систему связи с помощью ИСЗ в уже существующие высокоразвитые системы связи для их расширения. Можно, конечно, представить себе систему связи с помощью ИСЗ, выполняющую какую-то частную задачу, однако подобное ограничение ее использования представляется совершенно неоправданным.

В настоящее время во всем мире имеется около 134 миллионов телефонных абонентов. Эти абоненты (особенно в Европе, Северной Америке и Японии) связаны между собой с помощью сложных и гибких средств передачи и коммутации. Наряду с этим существуют средства для передачи телеграфных, телевизионных и фототелеграфных сигналов.

Быстро растет количество сообщений, передаваемых по трансокеанским телефонным кабелям. Число этих кабелей будет все возрастать, поскольку общее число трансокеанских телефонных каналов (как кабельных, так и радио) недостаточно. Отсутствуют каналы с шириной полосы пропускания, достаточной для передачи телевизионных сигналов. Наивыгоднейшим и наиболее экономически целесообразным является использование ИСЗ для осуществления связи между крупными высокоразвитыми системами связи различных материков.

При этом приходится сталкиваться с целым рядом проблем. Уже существует большое число международных линий связи, для которых необходимы общие международные нормы. Этим вопросом в течение нескольких десятков лет занимается Международный союз дальней радиосвязи, в настоящее время входящий в состав Организации Объединенных Наций. В каждой стране организации, ведающие телефонной связью, имеют и эксплуатируют оконечные радиостанции трансатлантической связи. Международные телефонные кабели находятся в совместном владении организаций тех стран, которые они связывают.

Самым простым, надежным и, возможно, единственным путем построения обоюдовыгодной системы связи с помощью

ИСЗ является такого же рода установившееся международное сотрудничество в вопросах технических норм, совместного владения и эксплуатации средств связи. Всякий другой подход к решению этого вопроса может лишь вызвать появление множества ненужных новых проблем.

Другая, более узкая, проблема касается конкретных технических норм, которые должны быть выполнены. Существуют уже установившиеся нормы на такие параметры, как ширина полосы частот, отношение сигнал/шум и другие. Существует также практический допуск на время задержки телефонных сигналов — задержка в телефонной цепи при одностороннем распространении не должна превышать 0,25 сек. Это несколько меньше, чем время прохождения сигнала к спутнику, находящемуся на стационарной орбите, и обратно.

Такое время задержки было установлено много лет назад из соображений, в то время казавшихся разумными. Даже при использовании четырехпроводной линии влияние этой задержки при некоторых разговорах было заметным. Практически используются двухпроводные линии, которые при такой большой задержке имеют недопустимое эхо. Для его уменьшения в длинных линиях связи используются эхоградители, которые прерывают передачу сигнала на время приема. Применение эхоградителей может привести к перерывам или искажению речи.

Понижение качества передачи, свойственное большой задержке, которая неизбежна при связи с помощью стационарных ИСЗ, должно быть тщательно исследовано. Совершенно очевидно, однако, что линия связи с помощью стационарного ИСЗ никогда не сможет обеспечить телефонный канал такого же качества, как кабельная линия связи.

Запуск ИСЗ является очень трудным и дорогостоящим. Опыт показывает, что в настоящее время новые или модернизированные ракеты еще ненадежны; даже многократно проверенные ракеты иногда отказывают. Наряду с высокой стоимостью запуска и еще большей стоимостью разработки новых ракет это обстоятельство заставляет предположить, что экономически оправданным является лишь запуск ИСЗ посредством хорошо испытанной ракеты из числа имеющихся в наличии.

К счастью, потребности других отраслей космических исследований обеспечили нас ракетами, пригодными для запуска связных ИСЗ, и в будущем можно рассчитывать на получение еще лучших ракет. Необходимо воспользоваться этим положением вместо того, чтобы усложнять проекты систем связи с помощью ИСЗ весьма дорогостоящими разработками ракет.

Много дискуссий проведено по вопросу о сопровождении спутников. Часто высказывается мнение, что отсутствие необходимости сопровождения стационарного ИСЗ дает существенное экономическое преимущество. Предлагалось даже использование стационарных, неуправляемых антенн. Однако вряд ли целесообразно создавать экспериментальную систему, основанную на предположении, что стационарный ИСЗ будет всегда находиться в поле зрения главного лепестка диаграммы направленности стационарной антенны.

Сопровождение является трудной задачей. Во время эксперимента по проекту «Эхо» спутник сопровождался с точностью $\pm 0,2^\circ$ и иногда при более точных исходных данных с точностью $\pm 0,1^\circ$. Такая точность недостаточна для системы коммерческой связи с использованием больших антенн, однако получение более высоких точностей сопровождения возможно. Более того, при рассмотрении реальных затрат затраты на систему сопровождения окажутся малыми по сравнению с остальными затратами на строительство оконечных станций и тем более малыми по сравнению со стоимостью системы связи в целом, учитывая стоимость запуска и замены спутников.

2. Проблемы радиации

При связи через космическое пространство возникает множество мало исследованных проблем, оказывающих большое влияние на срок службы ИСЗ. Большинство активных ИСЗ в качестве источников питания используют солнечные батареи и аккумуляторы. Энергия солнечного света составляет $\sim 1450 \text{ вт/м}^2$ и солнечные батареи могут преобразовать в электроэнергию $\sim 10\%$ этой энергии, т. е. 145 вт .

Космическое пространство заполнено радиацией, которая оказывает влияние на солнечные батареи. Стекло,

кварц или сапфир толщиной в несколько миллиметров могут надежно защитить солнечные батареи от электронов внешнего радиационного пояса, обладающего наибольшей интенсивностью на высоте порядка 20 000 км над поверхностью Земли. Защита солнечных батарей от протонов внутреннего радиационного пояса, обладающего максимальной интенсивностью на высоте порядка 3 200 км и простирающегося до высоты приблизительно 8 000 км, по-видимому, невозможна.

Хотя открытие и исследование радиационных поясов является выдающимся научным достижением, их протяженность, интенсивность и состав их радиации, равно как и изменения этих параметров во времени, пока еще точно не изучены. Известно, какое ухудшение качества солнечной батареи вызывает радиация различной интенсивности, но точно не известна интенсивность радиации, которой подвергнется ИСЗ на орбите. Можно ошибиться примерно в 3 раза при оценке времени, за которое к. п. д. солнечного элемента упадет на какую-то заданную величину, например на 5%. Наибольшим сроком службы солнечных батарей ИСЗ, находящегося на орбите высотой порядка нескольких тысяч километров, на сегодняшний день считается срок от нескольких месяцев до нескольких лет. Срок службы солнечных батарей на ИСЗ с большей высотой орбиты будет больше.

Хотя все электронные полупроводниковые приборы подвержены влиянию радиации, они в меньшей степени чувствительны к ней, чем солнечные батареи. Кроме того, они лучше защищены от воздействия радиации как за счет собственной металлической оболочки, так и за счет оболочки самого ИСЗ. Это не означает, однако, что для электронной аппаратуры на ИСЗ, кроме солнечных элементов, не существует специальных проблем и опасностей в связи с пребыванием в космическом пространстве. Вся аппаратура должна выдерживать ускорения в десятки g во время запуска.

Охлаждение аппаратуры ИСЗ возможно только за счет излучения. Тепло необходимо передать излучающим поверхностям при посредстве теплопроводности; даже в герметизированном объеме охлаждения за счет конвекции не будет, если ИСЗ не вращается, поскольку в нем на орбите существует состояние невесомости.

При резко меняющихся условиях окружающей среды (спутник освещен или находится в тени) изменение температуры его внешней оболочки будет очень велико; однако теплоемкость его внутренних элементов, возможно, будет частично сглаживать колебания температуры этих элементов.

Вакуум, а также газ при атмосферном давлении являются хорошими изоляторами, однако во время подъема возникают такие давления, при которых для пробоя достаточно сравнительно небольшого напряжения. В герметизированных контейнерах после вывода на орбиту герметизация может быть нарушена. Испарения от аппаратуры могут привести к заметному давлению газа в замкнутых объемах, даже если эти объемы и не полностью герметичны.

Надежность и срок службы бортовой электронной аппаратуры имеют первостепенное значение для связи с помощью ИСЗ. Основная начальная стоимость системы связи с помощью ИСЗ будет определяться необходимостью запуска и замены спутников. Если срок службы спутника будет меньше нескольких лет, то основная часть затрат на эксплуатацию системы будет определяться затратами на замену спутников. Практичность связи с помощью ИСЗ будет зависеть от сроков службы аппаратуры в космических условиях.

Нет сомнения в том, что продолжительные сроки службы аппаратуры в космических условиях могут быть получены. Передатчик ИСЗ, запущенный на орбиту более трех лет тому назад по проекту «Авангард», работает до сих пор. Этот передатчик представляет собой простой генератор на транзисторах. На этом ИСЗ было установлено такое количество солнечных элементов, что их должно было хватить для питания передатчика даже при резком падении их к. п. д. Более сложная аппаратура работала на ИСЗ свыше одного года (весьма малый срок службы с точки зрения связного спутника). Аппаратура многих других ИСЗ отказала через несколько недель или месяцев пребывания на орбите, а в некоторых случаях частично или полностью вышла из строя во время запуска.

Особенно ненадежной оказалась аппаратура, включающаяся по команде с Земли. Как и следовало ожидать, наибольшей надежностью отличалась аппаратура, работающая непрерывно.

3. Проблемы ориентации

До сих пор рассматривался только минимальный комплект электронной аппаратуры, который необходимо иметь на борту ИСЗ. Этой аппаратуры достаточно для связных ИСЗ, поскольку ИСЗ, находящиеся на низкой орбите, не требуют точной ориентации в пространстве или довольствуются лишь грубой ориентацией. Конечно, стабилизация любого ИСЗ дает определенные преимущества, поскольку в этом случае заметно снижается требуемая мощность передатчика ИСЗ, находящегося на низкой орбите, и весьма существенно уменьшается необходимая мощность передатчика ИСЗ, находящегося на высокой орбите. Ориентация ИСЗ может, однако, стать невыгодной, если при этом снижается срок его службы.

Посмотрим, каково современное состояние техники ориентации и стабилизации положения. Носовой конус ракеты «Атлас» успешно ориентировался в течение десятков минут; ИСЗ «Дисковерер» поддерживался при заданной ориентации в течение нескольких дней. Если мы хотим, чтобы связные ИСЗ могли экономически конкурировать с кабельными линиями связи, необходимо добиться ориентации ИСЗ в течение нескольких лет.

Могут ли газоразрядные лампы работать несколько лет без утечки газа? Могут ли подшипники работать несколько лет в вакууме, не замерзая? Какова вероятность, что небольшая неисправность в приводе системы ориентации не заставит ИСЗ вращаться вокруг своей оси? Какова надежность систем ориентации и стабилизации положения? Если эта аппаратура будет работать по командам с Земли, можно ли рассчитывать на то, что она подчинится только нашим командам и не будет реагировать на другие сигналы? Сегодня мы можем строить только предположения. На эти вопросы ответы дадут только эксперимент и опыт работы.

Если мы хотим ориентировать ИСЗ, находящийся на орбите небольшой высоты, то для этой цели можно использовать магнитное поле Земли. Магнитное поле на высоте 35 810 км весьма слабо и сильно меняется во времени, так как оно зависит не только от магнитного поля Земли, но и от потока заряженных частиц, исходящих от Солнца. При высоте орбиты в несколько тысяч километров магнитное

поле Земли достаточно сильно, и оно может служить в качестве опорного сигнала для ориентации спутника; это поле может также вызвать заметную силу, которая может быть использована для тех же целей. Такой способ ориентации ИСЗ, однако, пока еще недостаточно исследован экспериментально.

Для ориентации ИСЗ на низкой орбите можно использовать еще и другую силу. При заданной угловой скорости центробежные силы возрастают с увеличением радиуса орбиты, в то время как силы притяжения уменьшаются с увеличением радиуса. Вообразим себе ИСЗ в виде двух частей с равными массами, связанных между собой проводом и расположенных относительно Земли по радиусу. Центробежная сила будет действовать сильнее на дальнюю (от Земли) массу, а сила притяжения — на ближнюю массу. В результате этого провод будет испытывать некоторую силу натяжения. При смещении система всегда будет стремиться к радиальной ориентации, хотя, конечно, эта сила очень мала.

ИСЗ службы погоды «Тирос-1» и «Тирос-2» были ориентированы за счет вращения, которое поддерживает направление оси вращения постоянным. Скорость вращения ИСЗ в магнитном поле Земли со временем падает вследствие возникающих в нем вихревых токов, поэтому ИСЗ, ориентированные за счет их вращения, должны время от времени получать дополнительный импульс вращательного движения.

Возможно, что легче осуществить ориентацию ИСЗ на низких орбитах, чем на стационарной орбите. Однако накоплено еще слишком мало опыта для того, чтобы можно было оценить преимущества и недостатки различных методов ориентации.

4. Проблемы конструирования аппаратуры

Требуемая полезная мощность передатчика в сильной степени влияет на срок службы ИСЗ. Испытания на срок службы показали безотказную работу ламп бегущей волны (ЛБВ) мощностью 5 *вт* в течение четырех лет. Имея надежную ЛБВ с выходной мощностью 2 *вт* (что должно быть достаточным при правильном расчете системы связи с помощью

ИСЗ), можно получить гарантированный срок службы 10 лет и более. С другой стороны, совершенно неизвестны методы конструирования ламп с большим сроком службы мощностью в сотни ватт; даже при мощностях в десятки ватт возникают сложные неразрешенные проблемы.

Малая мощность целесообразна и с другой точки зрения. Вес ИСЗ зависит от мощности и почти пропорционален ей. Меньшая мощность передатчиков позволит запустить большее число ИСЗ с помощью данной ракеты.

Еще одним преимуществом передатчиков малой мощности является уменьшение создаваемых ими помех.

Возникает вопрос, как следует рассчитывать и строить систему, чтобы малая мощность бортового передатчика ИСЗ была достаточной для связи? Необходимая мощность определяется: шумами неба, являющимися функцией частоты; тепловыми шумами Земли, которая имеет гораздо более высокую температуру, чем небо; шумами приемника и видом используемой модуляции.

В диапазоне частот 1—10 *Гц* шумы неба соответствуют температуре менее 20° К для антенны, направленной под углом к горизонту $>7^\circ$. Эти шумы усиливаются во время дождя, что следует принимать во внимание, как возможный источник помех.

Парамагнитный усилитель (мазер) добавляет шумы, соответствующие примерно 10° К; эта величина может быть еще меньше.

Температура Земли составляет $\sim 300^\circ$ К. Во избежание приема излучения Земли можно использовать рупорно-параболическую антенну, типа использованного в эксперименте по проекту «Эхо».

Приемная система «Эхо» имела полную эквивалентную температуру шумов $\sim 24^\circ$ К при антенне, направленной в зенит. Большая доля этих шумов была связана с экспериментальной аппаратурой и могла бы быть исключена. Можно ожидать получения в ближайшем будущем температуры шумов 15° К и в конечном итоге ниже 10° К.

Выше упоминалось, что необходимая мощность зависит от выбранного метода модуляции. Отношение сигнал/шум при заданной мощности передатчика может быть улучшено при использовании частотной модуляции с большой девиацией частоты, во много раз превышающей максимальную

частоту передаваемой полосы частот сигнала. Если максимальная девиация частоты в 10 раз превышает максимальную частоту передаваемой полосы, то отношение сигнал/шум улучшается почти в 100 раз. Это, однако, требует ширины полосы 100 Мгц для передачи телевизионного (или другого) сигнала с полосой частот 5 Мгц.

Обычно при приеме частотно-модулированного сигнала ширина полосы приемника выбирается в соответствии с полной шириной полосы принимаемого сигнала (в приведенном примере 100 Мгц). Для работы приемника в присутствии шумов сигнал должен по крайней мере в 20 раз превышать уровень шумов. Если расширять полосу частот приемника так, чтобы принять частотно-модулированный сигнал с большой девиацией частоты, то возрастает и мощность шумов на входе приемника, вследствие чего получение максимального отношения сигнал/шум будет затруднительным.

В 1939 г. Чэффи описал приемник частотно-модулированных сигналов с шириной полосы частот, малой по сравнению с максимальной девиацией частоты передатчика. В этом приемнике сигнал с выхода подается обратно на вход для изменения настройки сравнительно узкополосного приемника, так что приемник все время подстраивается по входному сигналу. Использование такого приемника частотно-модулированных колебаний с обратной связью по частоте существенно уменьшает требования к мощности бортового передатчика в системе связи с помощью ИСЗ.

Следует отметить, что могут быть использованы и другие виды широкополосной модуляции, включая различные системы импульсной модуляции.

Рассмотрим, какова должна быть мощность передатчика на один телевизионный канал (или на 600—1 000 телефонных каналов) с учетом шумов неба, шумов парамагнитного усилителя приемника и широкополосной модуляции. Предположим, что используется рупорно-параболическая приемная антенна с раскрывом $\sim 320 \text{ м}^2$. Тогда мощность передатчика на неориентированном ИСЗ, излучающем равномерно во всех направлениях при высоте орбиты 3 200—8 000 км, должна быть порядка 2 Вт. Такое же требование по мощности должно быть предъявлено к передатчику ориентированного ИСЗ, находящегося на стационарной орбите

(высота 35 810 км), с антенной, направленность которой обеспечивает облучение всей видимой поверхности Земли.

Кроме этих частных проблем, имеются также и многие связанные с ними соображения о всей системе. В системе, которая использует ИСЗ на стационарной орбите, требуется применение меньшего числа, но зато более сложных и тяжелых ИСЗ, чем в системе с меньшей высотой орбит ИСЗ. Для обеспечения бесперебойной (или почти бесперебойной) работы системы требуется меньшее число ИСЗ с высокими орбитами, чем при малой высоте орбит. Отказ одного из ИСЗ в системе, использующей большое их число, однако, почти не ухудшит надежности системы.

Далее, если с помощью какого-то числа ИСЗ обеспечено наличие на данной орбите в течение, скажем, 99,9% времени по крайней мере одного ИСЗ, то наличие двух ИСЗ одновременно будет обеспечиваться в течение меньшей части времени, наличие трех ИСЗ — в течение еще меньшей части времени и т. д. Эти дополнительные ИСЗ могут быть использованы для обеспечения связи на второстепенных линиях, где можно допустить большие перерывы связи. Очевидно, что один и тот же ИСЗ может быть использован в разное время для связи в различных частях земного шара.

Весьма важным вопросом являются возможные взаимные помехи между системами связи с помощью ИСЗ и наземными системами, использующими диапазон СВЧ. В этом вопросе ясными являются только некоторые общие положения. Снижение мощностей, используемых в системе связи с помощью ИСЗ, приводит к уменьшению помех наземным устройствам. Малые мощности передатчиков, установленных на ИСЗ, которые можно использовать благодаря наличию приемников с малозумящими усилителями, и широкополосной модуляцией вообще не создадут помех наземным связным приемникам. Высококачественные наземные антенны с малым уровнем боковых лепестков, особенно рупорно-параболические, повышают помехозащищенность.

При осуществлении одновременной связи с несколькими ИСЗ необходимо использовать разделение как по частоте, так и по положению ИСЗ на орбите. Последнее осуществимо благодаря высокой направленности наземных антенн. Повидимому, одновременная связь с несколькими ИСЗ будет возможна только при использовании выигрыша в отноше-

нии сигнал/шум, даваемого широкополосной модуляцией; таким образом, расширение (а не сужение) полосы частот передаваемого сигнала приводит к увеличению количества используемых линий связи.

Вопрос помех очень сложный; в этой области еще многое не изучено. В свете наших теперешних знаний лучше всего, по-видимому, использовать меньшие уровни мощностей при более широких полосах частот.

Выбор между различными системами связи с помощью ИСЗ должен основываться на достигнутом уровне техники при очень осторожном взвешивании различных соображений. Возможности пассивного ИСЗ определены с помощью экспериментов по проекту «Эхо». По нашему мнению, практичная и экономически выгодная система связи с помощью многих простых активных ИСЗ с произвольными орбитами небольшой высоты может быть осуществлена в недалеком будущем при условии положительных результатов пробных запусков активных ИСЗ.

Различные системы связи с помощью ИСЗ будут опробованы с течением времени, и возможно, что в их числе будет и система связи с помощью ИСЗ, находящихся на стационарной орбите.

ЛИТЕРАТУРА

1. Clarke A. C., *Exploration of Space*, Temple Press, 1951.
2. Clarke A. C., *Extra-terrestrial Relays*, *Wireless World*, 57, 305—308 (1945).

3. Техника и экономика систем связи с помощью искусственных спутников Земли¹

Пардо Г.

1. Введение

Бывший президент Британского межпланетного общества Кларк первый привлек внимание к возможностям использования искусственных спутников Земли (ИСЗ) в качестве радиотрансляционных станций в глобальной системе дальней связи. Это произошло 16 лет назад до запуска первых ИСЗ, непосредственно после второй мировой войны, когда ракеты еще не получили признания. Лишь через 10 лет внимание к этому вопросу снова привлек Пирс, а за последние 5—6 лет появились многочисленные статьи по различным вопросам, относящимся к системам связи с помощью ИСЗ. В настоящей статье также затрагивается эта тема.

В большинстве работ рассматриваются чисто теоретические и технические проблемы и лишь изредка исследуются вопросы экономики. В ранний период развития это было понятно и не имело большого значения. В настоящее время, когда быстро становятся реальностью прототипы действующих систем связи с помощью ИСЗ, необходимо рассматривать систему в целом. Это особенно справедливо при исследовании важного вопроса о стоимости.

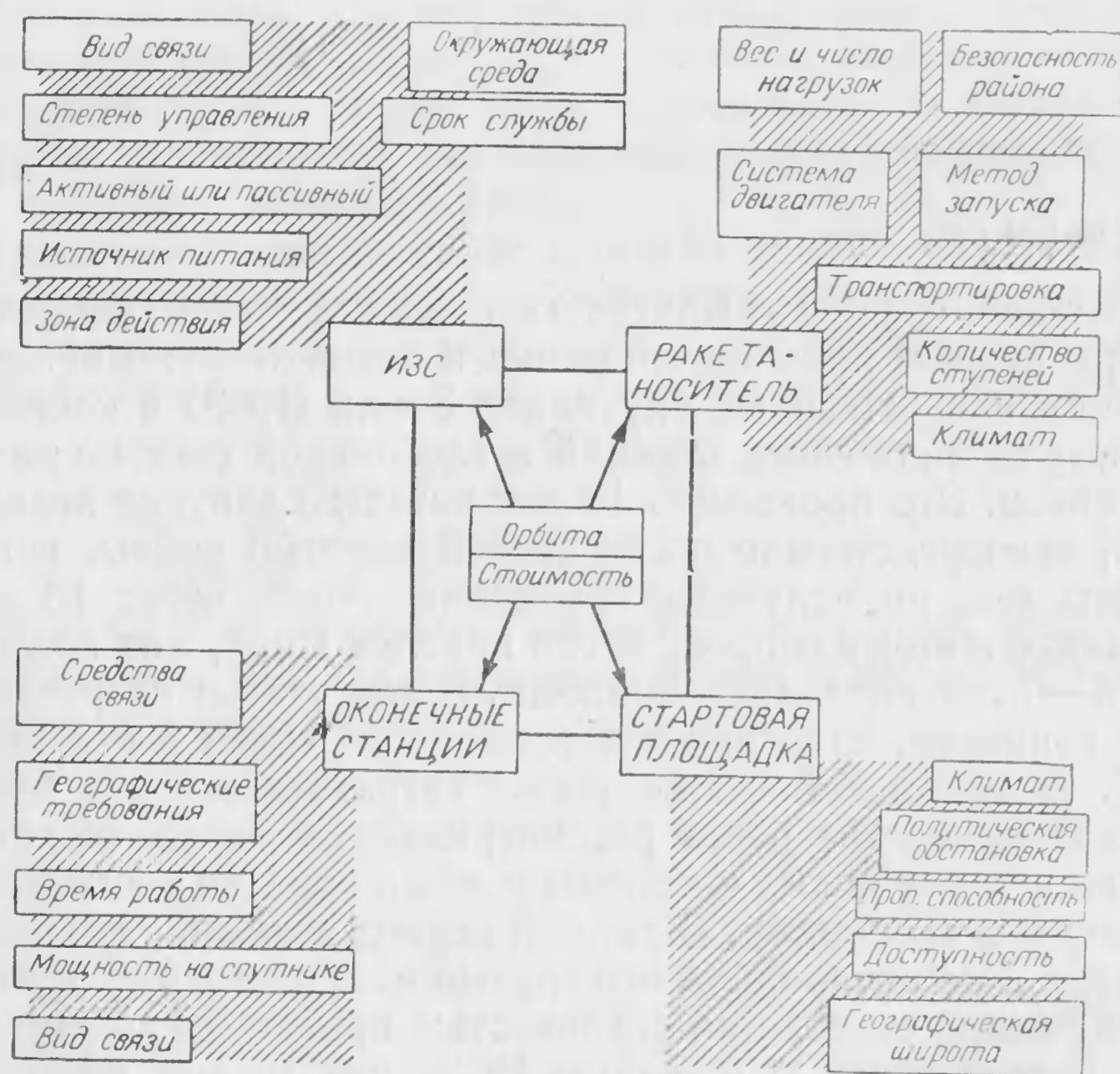
¹ Pardoe G., *Communications Satellites*, Acad. Press, Lnd. — N. Y., 1962, p. 1—15.

Целесообразно поэтому сделать сначала обзор всех факторов, влияющих на технику и экономику системы связи с помощью ИСЗ, и рассмотреть характер этого влияния, а затем рассмотреть те из факторов, которые оказывают наибольшее влияние.

В данной статье мы хотим указать, какое множество различных вопросов необходимо рассмотреть, чтобы сделать заключение о системе в целом.

2. Система в целом

Основные элементы системы связи с помощью ИСЗ показаны на фиг. 1. По ней можно проследить все связи и взаимосвязи четырех основных элементов. Центральное место,



Фиг. 1. Элементы системы связи с помощью ИСЗ.

отведенное вопросам стоимости и выбора параметров орбиты, указывает на важное значение этих вопросов.

В процессе подготовки к введению новой системы связи учитываются районы, которые необходимо обслужить, и оцениваются потенциальные потребности в предлагаемом обслуживании. Таким образом, в первую очередь должны быть приняты решения о характере обслуживания, продолжительности работы, охватываемом районе и числе каналов. Далее учитывается наличие или отсутствие средств связи на конечных пунктах, после чего принимаются во внимание климатические условия и необходимый срок службы системы. Последние два фактора в первую очередь определяют стоимость, поскольку необходимо разработать и изготовить аппаратуру с высокой надежностью и долговечностью. Наконец, необходимо определить мощность передатчика и чувствительность приемника, расположенных на борту ИСЗ. Эти параметры оказывают непосредственное влияние на размеры и стоимость наземных антенн, передатчиков и приемников. Поскольку на ИСЗ могут быть установлены лишь передатчики малой мощности, наземные антенны должны быть снабжены отражателем весьма больших размеров. Стоимость таких антенн зависит от их размеров и примерно пропорциональна квадрату диаметра зеркала.

На фиг. 1 в квадранте, относящемся к ИСЗ, можно видеть непосредственное влияние параметров орбиты и числа ИСЗ на конструкцию ИСЗ. Особое внимание следует уделить выбору типа ретранслятора: пассивного или активного. Применение пассивного ИСЗ — ретранслятора предъявляет весьма жесткие требования к наземным антеннам, передатчикам и приемникам. Тот факт, что сигнал, передаваемый с Земли, не усиливается на ИСЗ, требует соответствующего увеличения размеров наземных антенн, что, как указано выше, влечет за собой большое увеличение их стоимости.

Зависимость конструкции ИСЗ от параметров орбиты можно сформулировать следующим образом: чем больше высота, тем больше перекрываемая площадь, тем больше требуемая мощность передатчика. Это приводит к росту потребляемой мощности, т. е. к соответствующему увеличению веса ИСЗ.

Эти рассуждения привели нас непосредственно к площадке для запуска ИСЗ. Здесь решающим критерием является

общий вес устройства, которое необходимо вывести на орбиту. Этот вес непосредственно определяет размер и число ступеней ракеты. После определения размеров и веса ракеты дальнейшее зависит от методов запуска с учетом мер безопасности и транспортировки ракеты при изготовлении и испытаниях. До решения этих вопросов необходимо определить местоположение стартовой площадки, и поэтому мы перейдем к рассмотрению последнего квадранта диаграммы; этот квадрант весьма важный, поскольку здесь приходится учитывать вопросы политического характера, географического местоположения, вопросы государственной безопасности, а также безопасности и доступности района запуска. С точки зрения безопасности идеальным было бы расположение площадки в центре изолированной, малонаселенной области площадью в несколько сотен тысяч квадратных километров. Для удобства обслуживания и снабжения площадка должна быть легко доступной, окруженной техническими и промышленными предприятиями. Определяющим фактором, однако, является географическая широта площадки, так как от нее зависит угол наклона орбиты. Угол наклона орбиты влияет на перекрываемую спутником площадь, что в свою очередь определяет площадь, обслуживаемую системой связи.

3. Стартовая площадка

Выбор места для стартовой площадки во многом определяется географическими и политическими соображениями, особенно в связи с тем, что в настоящее время в качестве первых ступеней ракет-носителей используются модифицированные военные ракеты. Поэтому вполне понятно стремление к запуску ИСЗ с военных полигонов с использованием всего соответствующего оборудования, конечно, с учетом ограничений, налагаемых соображениями государственной безопасности.

Сама по себе мощность ракеты, используемой для запуска ИСЗ, может определить метод запуска. Часто полагают, что запуск всех ИСЗ будет производиться с наземных площадок, хотя на самом деле это не так. Уже в настоящее время запуск космических зондов производится с воздушных шаров и серьезно рассматривается вопрос о запуске с пла-

вучих платформ или авианосцев больших ракет, например типа «Сатурн». Запуск ИСЗ с поверхности моря дает то преимущество, что в этом случае отпадает необходимость в тщательных мерах предосторожности, которые приходится принимать на наземных площадках, учитывая возможность взрыва или пожара.

Географическая широта (северная или южная) местоположения площадки определяет минимальный угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора, который можно получить с использованием простых средств выведения ИСЗ на орбиту. Так, ИСЗ, запущенные, скажем, с Вумера или Колумб Бечар, расположенных приблизительно на 31° широты (соответственно южной и северной), могут быть выведены на орбиты с углом наклона к плоскости экватора между 31 и 90° (т. е. полярная орбита). Для получения орбит с углом наклона между 31 и 0° (экваториальная орбита) необходимы дополнительные средства, обеспечивающие возможность маневра с целью изменения плоскости орбиты. Это не только усложняет ракеты, но и приводит к снижению допустимой полезной нагрузки при заданной мощности первой ступени. Все это отражается на стоимости; растут не только прямые затраты вследствие повышения требований к тщательности изготовления, усложняются проблемы запуска, слежения, управления и т. д., но соответственно повышается стоимость одного килограмма полезного веса на орбите. Последний показатель может служить мерой к. п. д. космического корабля.

Если не учитывать указанных выше ограничений, то площадку для запуска ИСЗ естественно было бы выбрать в районе экватора, но, как было указано выше, большинство ракетных баз расположено по различным соображениям в других местах. Интересно отметить, что фирма «Hughes» считает наилучшей базой для запуска легких спутников связи на синхронную экваториальную орбиту остров Рождества, расположенный в средней части Тихого океана несколько южнее 2° с. ш. Предлагаемая для этой цели ракета является модификацией ракеты «Скаут» с дополнительной ступенью. Это упрощает проблемы снабжения и оборудования площадки, однако стоимость установки оборудования даже в этом случае может сильно отразиться на общей стоимости системы.

Местоположение площадки для запуска спутников может также оказать влияние на устройство первых ступеней ракеты. В идеальном случае ракета конструируется таким образом, чтобы получить максимальное приращение скорости от каждой ступени (что является проблемой динамики, заключающейся в достижении оптимальных отношений масс ступеней) и максимальные общий вес и тягу двигателей каждой ступени. Однако для вывода ИСЗ на заданную орбиту при запуске с конкретной стартовой площадки необходимо запускать ИСЗ в определенном направлении. Может случиться (часто так и бывает), что при определении программы запуска с помощью этих ступеней возникают затруднения политического порядка. Например, отделившиеся первые ступени ракет не должны падать в густонаселенной части страны или на территорию другого государства. Последнее нежелательно, даже если этот район падения практически необитаем; примерами могут служить политические недоразумения, возникшие при падении кусков ракеты «Тор» на Кубу и частей ракеты, запущенной в сторону Луны в Южной Африке.

При выборе места для площадки, приемлемого по политическим и географическим соображениям, и при определении числа ступеней ракеты может оказаться, что площадка расположена в центре безводной пустыни или в болотистой местности. Может случиться, что военные организации уже вложили большие средства, закупив землю и проведя ряд работ по подготовке базы, включая строительство шоссе и железных дорог и взлетно-посадочных полос. При использовании этих площадок стоимость запуска ИСЗ ограничивалась бы просто платой за пользование площадкой. Но может случиться и так, что площадку для запуска ИСЗ необходимо строить с самого начала. В этом случае стоимость строительства войдет в стоимость всей системы связи, что в свою очередь может заставить пересмотреть ранее принятые решения.

4. Ракета для запуска искусственных спутников Земли

Конструкцию ракеты для запуска ИСЗ следовало бы рассматривать в первую очередь с точки зрения полезной нагрузки. Однако единственно правильным является анализ

системы в целом и при этом возникают ограничения, определяющие вес и размеры ИСЗ.

Хорошо известно, что для ракеты ограничивающим фактором является топливо, поскольку большая часть ее объема занята горючим. Идеальное горючее должно обладать большой тяговой силой наряду с высокой плотностью, что позволило бы получить надежную малогабаритную ракету. С точки зрения удобства обращения преимущества находятся на стороне твердого топлива, но проблемы управления тягой и поддержания горения наряду с малой удельной силой тяги сводят эти преимущества на нет, так что еще в течение многих лет для вывода на орбиту значительных полезных нагрузок будет применяться жидкое топливо. В этом случае необходимы конструкции, обеспечивающие высокое отношение прочности к массе. Существующие методы конструирования ракет шли по пути использования баков для горючего в качестве оболочки ракеты и получения высокой прочности конструкции за счет нагнетания газа под давлением. Топливо из баков подается к моторам с помощью турбинных насосов.

Применение многоступенчатого принципа усложняет конструкцию ракеты, но зато позволяет освободиться от излишнего веса в той точке траектории, где часть двигателей системы становится ненужной. Этот процесс освобождения от излишнего веса может быть повторен несколько раз (например, ракета «Скаут» имеет 4 ступени). Применение горючего с максимальной удельной тягой наиболее выгодно в последних ступенях ракеты, где требуется наибольший прирост скорости. Точки траектории, в которых можно сбросить предыдущие ступени, определяются требованиями безопасности в районе запуска, что, по всей вероятности, может понизить коэффициент полезного действия ступеней.

На этапе проектирования системы необходимо также предусмотреть удобство транспортировки столь громоздкого объекта, как ракета для запуска спутника, поскольку запуск, вероятно, будет произведен с площадки, значительно удаленной от места изготовления ракеты. Ступени ракеты будут, по-видимому, перевозиться отдельно. Остается, однако, проблема перевозки первой ступени. В некоторых случаях двигатели первой ступени могут быть отделены от баков и перевозиться на отдельном специальном прицепе

по суше, на специальных баржах по рекам или на морских судах в качестве палубного груза.

Кроме обеспечения безопасности района запуска, в программе отделения ступеней необходимо также предусмотреть какой-либо метод самоликвидации ракеты-носителя. В случае отказа в системе выведения на орбиту с Земли подается сигнал для уничтожения ракеты.

Система выведения ИСЗ на орбиту будет в основном определяться необходимой степенью точности выведения на орбиту. По-видимому, систему самонаведения ИСЗ придется заменить прокладкой траектории ракеты наземными радиолокаторами. Включение последних ступеней с помощью команд, передаваемых по радио с Земли, упрощает бортовую электронную аппаратуру ИСЗ и обеспечивают некоторую возможность корректирования орбиты.

5. Искусственный спутник Земли

Основной частью системы, очевидно, является ИСЗ (после того, как вывод на орбиту заданной нагрузки обеспечен).

Естественной отправной точкой при выборе конструкции ИСЗ является характер требуемой связи. По-видимому, приблизительно к концу этого десятилетия появятся ИСЗ, обеспечивающие все возможные виды связи, начиная от телефонной, телеграфной, телевизионной, передачи данных и т. д. Вопрос заключается в порядке очередности, с которой следует вводить эти различные виды связи. В настоящее время передача телефонных сообщений возможна различными способами, в то время как межконтинентальный обмен телевизионными программами возможен только при помощи систем связи с использованием ИСЗ. Очевидно, желательно создание ИСЗ, способного ретранслировать телефонные сигналы наряду с телевизионными. Необходимые для этого ширина полосы частот и мощность передатчиков, по-видимому, могут быть получены даже на первых нескольких ИСЗ, запускаемых в данной системе. Выбор активного или пассивного ИСЗ однозначно определяется видом связи, равно как и сроком службы или надежностью; кроме того, имеются еще и некоторые другие ограничения. Например, ретрансляционный ИСЗ, осуществляющий передачу информации с задержкой во времени, может быть толь-

ко активным. Возможно также и дальнейшее подразделение видов ИСЗ. Так, можно рассматривать ИСЗ с двойной активной ретрансляцией, т. е. такой ИСЗ, в котором предусмотрена не только возможность приема, усиления и передачи обратно сигналов, принятых с Земли, но и передача сигналов соседним ИСЗ, образующим синхронно работающую сеть; соседний ИСЗ может передать сигнал другим ИСЗ или послать его наземным станциям. Подобная система обладает многими недостатками, как-то: сложность антенных устройств, необходимость стабилизации положения спутников, проблемы габаритов, весов и т. д. В любом случае в такой системе необходимы промежуточные наземные станции для подключения ее к местной наземной сети связи. Вполне может быть, что ИСЗ с двойной активной ретрансляцией найдут применение в военных системах связи, где надежность работы не должна определяться наличием промежуточных наземных станций, тем более что острая направленность антенн, предназначенных для связи ИСЗ между собой, исключает возможность перехвата сообщений и помех, за исключением прямых организованных помех каждому спутнику системы. Поэтому следует ожидать применения подобных систем с ИСЗ с двойной активной ретрансляцией скорее в военных целях, чем для коммерческой связи.

В активном ИСЗ большую роль, очевидно, играет проблема источников питания. Поэтому необходима более исчерпывающая информация о влиянии радиации на орбитах средней высоты для решения вопроса о возможности использования солнечных батарей и других электронных устройств со сроками службы, измеряемыми годами. Однако, учитывая проводимые работы над источниками питания других типов, можно ожидать, что при выборе высоты орбит с влиянием радиации можно будет считаться в меньшей степени, чем это диктуется имеющимися в нашем распоряжении сведениями на сегодняшний день.

Очень важным является вопрос об ориентации ИСЗ в связи с применением направленных антенн; требование ориентации неизбежно приводит к значительному росту веса наряду с заметным усложнением аппаратуры и уменьшением ее надежности. Отказ от этого требования дал бы очень большую экономию.

Имеет смысл затронуть еще один фактор — форму орбиты; в частности, очень важен вопрос о том, следует ли запускать ИСЗ на синхронные орбиты или можно примириться с периодическим появлением ИСЗ над данной точкой земной поверхности. На решение этого вопроса в большой мере влияет возможность многократного запуска, так как запуск, например, 50 спутников системы на орбиты различной формы может серьезно рассматриваться только при возможности запуска нескольких спутников с помощью одной ракеты-носителя. Кроме того, подобная система не может обеспечить бесперебойную связь. Даже, например, при вероятности бесперебойной связи 98% оставшиеся 2% времени могут совпасть как раз с серединой передачи важнейших данных или телефонного разговора, или телевизионной передачи, поскольку предсказать это время не представляется возможным.

6. Аппаратура оконечных станций

Состав аппаратуры оконечных пунктов во многом определяется требованиями потребителей. Организация связи любых двух пунктов зависит от ряда факторов, из которых важнейшими являются: требуемый вид связи, число каналов, продолжительность работы, расстояние между пунктами, профиль местности между пунктами, стоимость.

При рассмотрении чисто географических факторов возникает несколько основных вопросов. Линия связи с помощью ИСЗ обеспечивает связь на больших расстояниях с надежностью, не уступающей надежности кабельной линии. При этом отсутствуют все те проблемы оборудования, которые свойственны связи по кабелю. Это преимущество не ограничено трансокеанскими линиями, поскольку профиль местности может сделать нецелесообразным сооружение трансконтинентальных наземных линий связи. Прекрасными примерами подобного положения могут служить Африка и Южная Америка. Из-за отсутствия линии связи через континент в настоящее время связь между городами Аккра (Западная Африка) и Найроби (Восточная Африка) осуществляется через Лондон. Точно так же связь городов Лимы (Перу) и Рио-де-Жанейро осуществляется через Барбадос. В обоих случаях прямая кабельная или радиорелейная

связь отсутствует, и, даже если такую связь можно было бы установить, содержание этих линий связи было бы весьма сложным и дорогим. Более того, даже в США вследствие сильно пересеченной территории имеет смысл организовать трансконтинентальную связь с помощью ИСЗ. Стоимость разговора по такой линии была бы заметно ниже стоимости разговора по существующим наземным линиям связи. Очевидно, что в Англии потребность в таких линиях связи весьма невелика и поэтому здесь такой проект не может быть экономически оправданным.

Другими факторами, влияющими на выбор места оконечной станции, являются наличие сравнительно большой местной потребности в данной связи (что позволит избежать больших расходов на сооружение наземной сети связи) и возможность подключения к местной сети связи.

Требуемый вид связи определяет проект системы в целом, поскольку, очевидно, требования при передаче телевидения значительно отличаются от требований при передаче телефонии или телеграфии. Основное внимание в первое время, несомненно, будет обращено на установление телефонной и телеграфной связи, но желательность надежной межконтинентальной телевизионной линии очевидна. Число необходимых каналов связи в первую очередь определяется потребителем, но в некоторых случаях может быть ограничено конструкцией спутника. Другим важным фактором при проектировании системы является требуемая продолжительность связи. При уменьшении высоты орбиты ИСЗ необходимо увеличивать число ИСЗ для обеспечения непрерывной работы, продолжительность которой определяется требованиями потребителя. Если непрерывной работы не требуется и «рабочее время» не является критерием оценки системы, то можно использовать систему связи с помощью ИСЗ типа «Курьер».

Нельзя рассматривать приемник и передатчик на ИСЗ в отрыве от наземных передатчика и приемника. По совершенно очевидным причинам сложность бортовой аппаратуры и вес ее элементов желательны свети к минимуму, что приводит к усложнению наземной аппаратуры. Частотные ограничения заставляют выбирать рабочую частоту в диапазоне тысяч мегагерц, причем, учитывая малую мощность бортового передатчика, потребуется большая приемная

антенна (с диаметром зеркала до 30 м) и несколько меньшая передающая антенна. Поскольку одна пара антенных устройств будет следить за данным ИСЗ, потребуется еще одна пара антенн для связи со следующим ИСЗ, как только он окажется в пределах прямой видимости. Однако, поскольку такие линии связи будут работать не только в одном направлении, можно представить себе типичную оконечную станцию с несколькими парами антенн. На входе приемника необходимо включить маломощный усилитель типа парамагнитного или параметрического, так как мощность передатчика на ИСЗ будет равна всего нескольким ваттам.

Для вхождения в связь со следующим спутником необходимо заранее знать направление, с которого он появится (следует помнить, что для поворота антенн с большими зеркалами на 180° требуется несколько минут). По-видимому, наиболее целесообразно для предсказания положения ИСЗ на орбите использовать электронные вычислительные машины с вводом в них информации, получаемой при сопровождении ИСЗ обычными методами.

7. Общие замечания

Выше были отмечены те отступления от идеальных условий, которые имеют место в реальной обстановке. Поэтому имеет смысл рассмотреть ограничения, налагаемые на систему в целом для того случая, когда возможно и необходимо использовать имеющиеся в наличии средства, а не проектировать систему с самого начала. Для наглядности рассмотрим вопросы, связанные с запуском ИСЗ с помощью разработанной для этой цели ракеты «Блу Стрик».

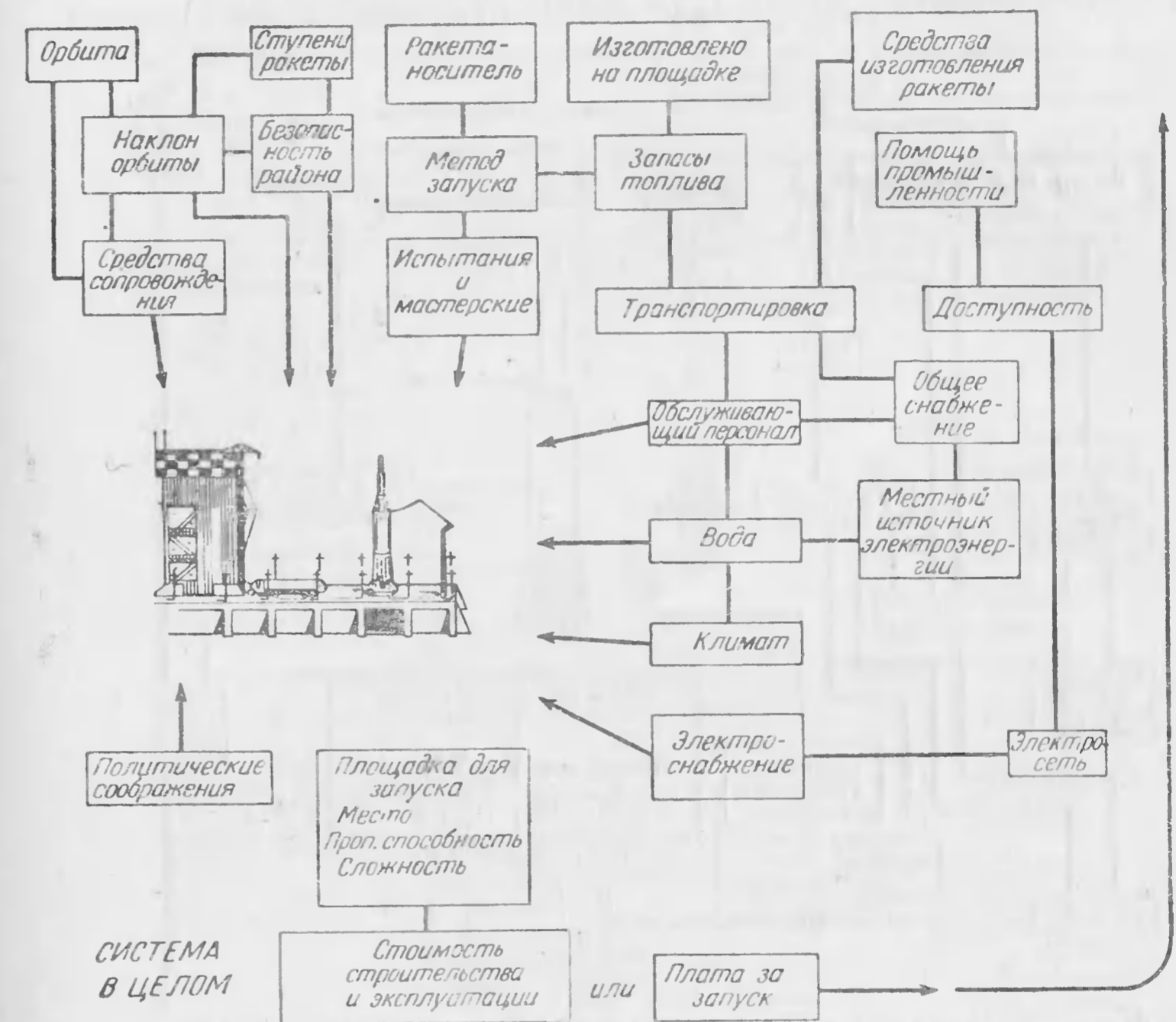
а) Стартовая площадка (фиг. 2)

Стартовая площадка для пуска этой ракеты выбрана в Вумера (Австралия), и в той или иной мере элементы системы находятся под влиянием или определяются наличием этой площадки, строительство которой в основном закончено.

б) Ракета для запуска (фиг. 3)

Выбор в качестве первой ступени ракеты типа «Блу Стрик» в сильной степени влияет на большинство элементов ракеты, предназначенной для запуска ИСЗ на орбиту,

в том смысле, что имеется предел нагрузки, которую может поднять первая ступень такого типа. Это определяет размеры последующих ступеней, хотя необходимо отметить, что возможно значительное расширение рабочих характеристик



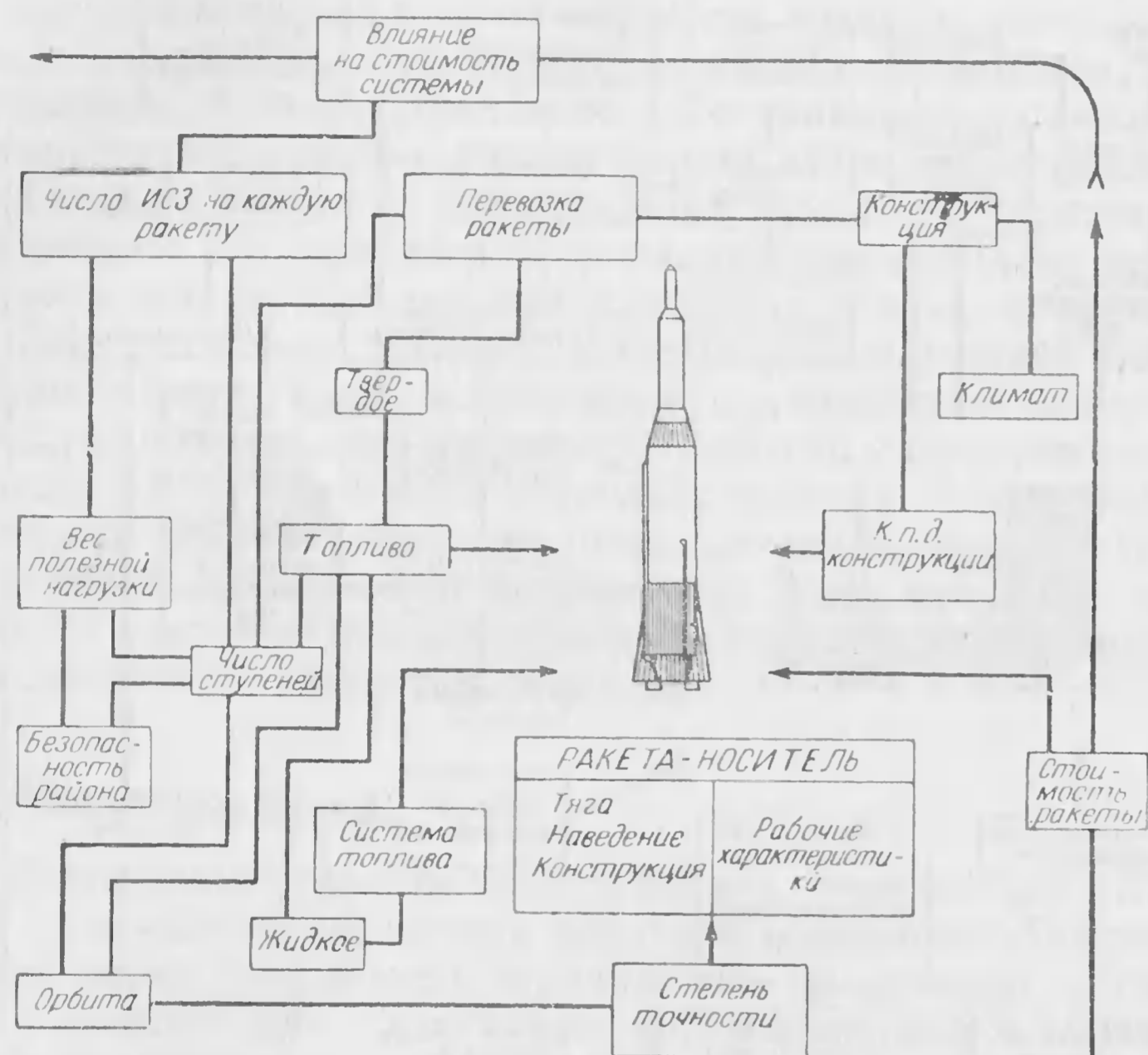
Фиг. 2. Факторы, влияющие на стоимость сооружения и содержания стартовой площадки.

многоступенчатых ракет, первой ступенью которых служит ракета «Блу Стрик». Поэтому выбор ракеты-носителя во многом определяет содержание квадранта на фиг. 4, включающего в себя элементы ракеты-носителя.

в) Спутник (фиг. 4)

Различные фирмы предусматривают применение ИСЗ различного веса — от единиц до нескольких десятков килограмм. Здесь рассматриваются только активные ИСЗ, поскольку их потенциальные возможности несравненно

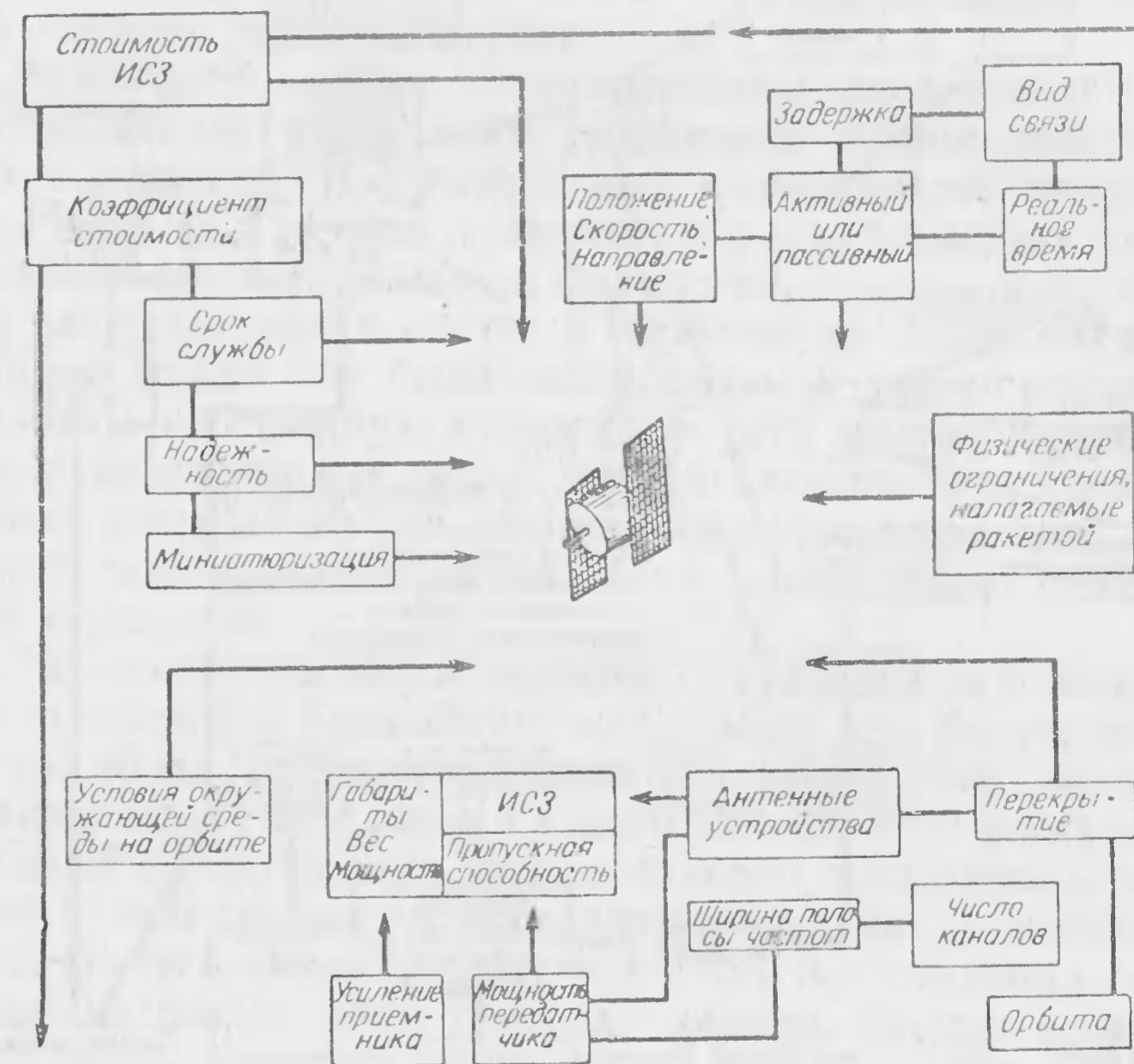
выше, чем у пассивных ИСЗ, несмотря на свойственную последним высокую надежность. Если вес ИСЗ с достаточным диапазоном рабочих параметров будет равен нескольким десяткам килограммов и если с помощью одной ракеты



Фиг. 3. Влияние типа ракеты на общую стоимость системы.

на орбиту будет выведен только один ИСЗ, то окажется, что для построения глобальной системы связи необходим набор ИСЗ со средними высотами орбит (например, 6 400—16 000 км), причем взаимное положение спутников должно быть строго фиксированным. Выведение ИСЗ на такую орбиту (при существующем уровне техники) требует применения многоступенчатой ракеты с тягой в момент отрыва от Земли по крайней мере 80—120 тн. Подъемная тяга ракеты «Блу Стрик» может быть порядка 120 тн, из чего следует, что эта ракета удовлетворяет нашим требованиям, а меньшие ракеты, например «Скаут», «Тор» и другие,

для этой цели непригодны. Если можно будет использовать более мощные последние ступени, то с помощью ракеты «Блу Стрик» удастся вывести на стационарную орбиту (35 810 км) полезную нагрузку достаточной величины, в то время как с последующими ступенями, работающими на



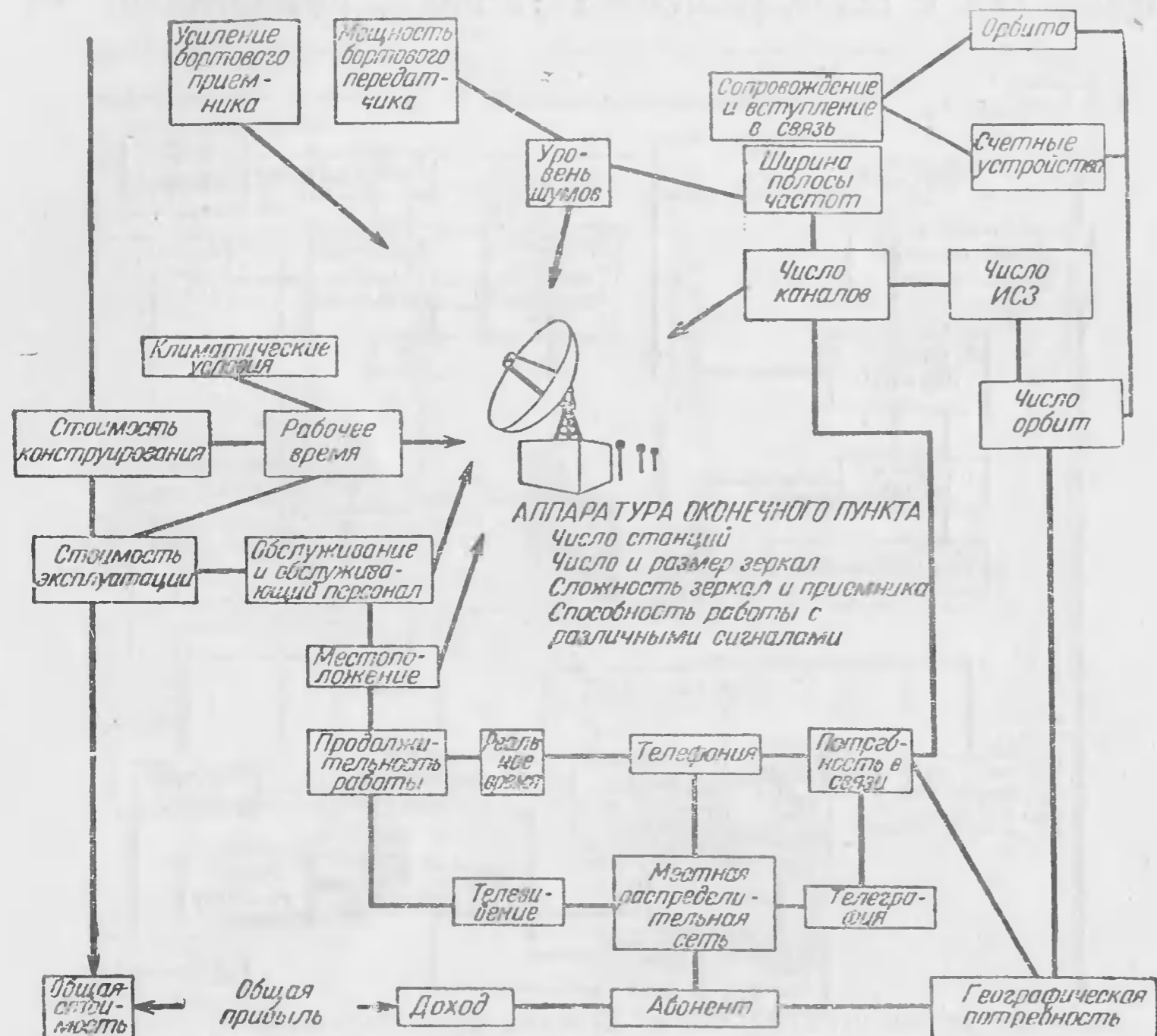
Фиг. 4. Факторы, влияющие на выбор искусственного спутника Земли.

обычном топливе, на эту орбиту можно вывести ИСЗ весом всего в несколько килограммов.

Очевидно, что выбор ракеты-носителя типа «Блу Стрик» ограничивает вес ИСЗ, однако здесь важно отметить, что с помощью такой ракеты можно вывести на соответствующие орбиты ИСЗ достаточного веса и, таким образом, создать весьма обширную систему связи с помощью ИСЗ.

Вполне понятно, что использование более мощной первой ступени, например «Атлас-Агена» или «Атлас-Кентавр»,

даст возможность вывести на орбиту ИСЗ большего веса или несколько ИСЗ одновременно. Однако для создания первоначальных систем связи, использующих ИСЗ, применение таких мощных ракет не обязательно.



Фиг. 5. Факторы, влияющие на выбор оборудования оконечных станций.

г) Оборудование оконечных станций и система в целом (фиг. 5)

Проектирование системы в целом и ее экономическая оценка могут быть произведены только после тщательного изучения описанных выше элементов.

Приняв некоторые довольно широкие предположения, можно собрать достаточные сведения для экономической оценки такой системы. Изучение вопроса показало, что общие затраты на создание системы окупаются через не-

сколько лет после начала эксплуатации. По прошествии этого срока прибыль, т. е. превышение доходов над расходами, будет порядка десятков миллионов фунтов в год. Необходимо, однако, подчеркнуть здесь, что приведенная выше цифра является сугубо приближенной, и для более точной оценки необходимо гораздо более подробное рассмотрение всех входящих элементов, чем это было проведено для данного частного случая.

Важнейшей частью экономического исследования является анализ ожидаемого увеличения объема передаваемых сообщений. Введение новых возможностей связи посредством ИСЗ должно привести к гораздо большему увеличению объема передаваемых сообщений, чем можно ожидать при обычных видах связи, в особенности в тех странах, которые до сих пор были изолированы и только начинают развивать собственную внутреннюю сеть наземных телефонных и телевизионных линий. Однако даже очень осторожная оценка возможного увеличения объема передаваемых сообщений подтверждает приведенную выше цифру ожидаемых прибылей.

Новые системы связи, которые будут введены в эксплуатацию в течение ближайших нескольких лет, будут, несомненно, обладать существенными отличиями, так как зависимости между отдельными элементами системы носят очень сложный характер и это должно привести к различным решениям в зависимости от поставленной задачи. Возможность осуществлять связь посредством ИСЗ без сомнения будет одним из самых прогрессивных событий нашего времени.

4. Системы связи с использованием искусственных спутников Земли для обслуживания стран Британского содружества наций¹

Хилтон У

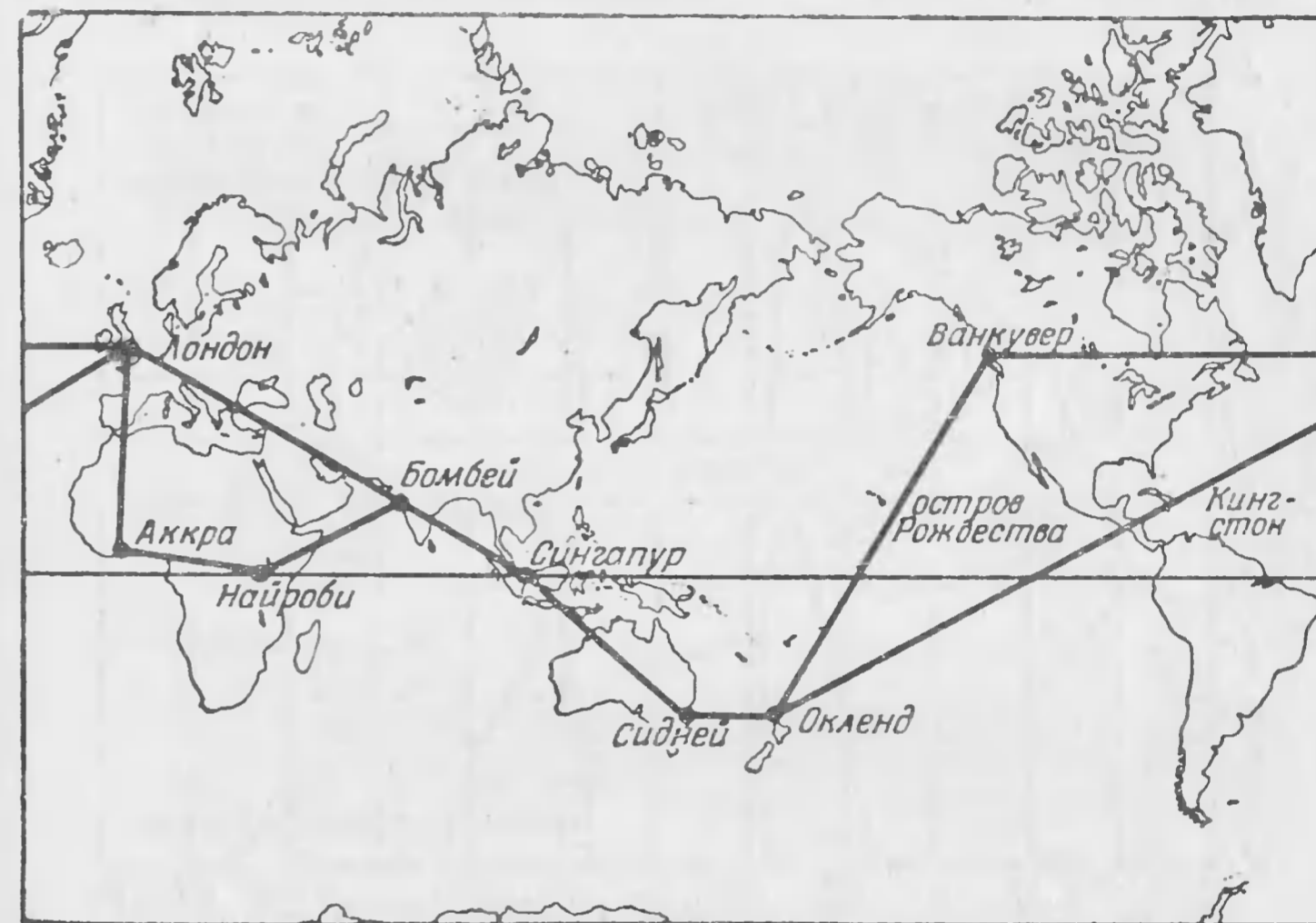
1. Введение

Многие города Британского содружества наций удалены от магистральных линий связи. Система кабельных линий могла бы устранить этот недостаток. Однако стоимость их растет с протяженностью, в то время как стоимость линий связи с ИСЗ не зависит от расстояния, поскольку любой разговор проходит через одно и то же оборудование на Земле и на ИСЗ. Исключение составляет связь с антиподами, так как она должна осуществляться через два и более ИСЗ. Таким образом, любое сравнение кабельных систем связи и систем с ИСЗ будет сравнением систем с весьма различными свойствами. Линии связи, соединяющие страны Содружества, имеют большую протяженность, чем трансатлантические магистрали, но меньшую загрузку. Схема линий связи приведена на фиг. 1. Из нее хорошо видно, что линии связи Содружества проходят симметрично севернее и южнее экватора. В отличие от этого мировые международные связи характеризуются тем, что вблизи 40° с. ш. находится

¹ Hilton W. F., Communications Satellites, Acad. Press, Lnd. — N. Y., 1962, p. 95—112.

4. Системы связи с помощью ИСЗ для стран Британ. содруж. 73

большинство телефонных абонентов и действующих телефонов (фиг. 2). Таким образом, решение, которое предлагается в работе [1] для обеспечения связи в северном полушарии, в данном случае оказывается непригодным. Здесь



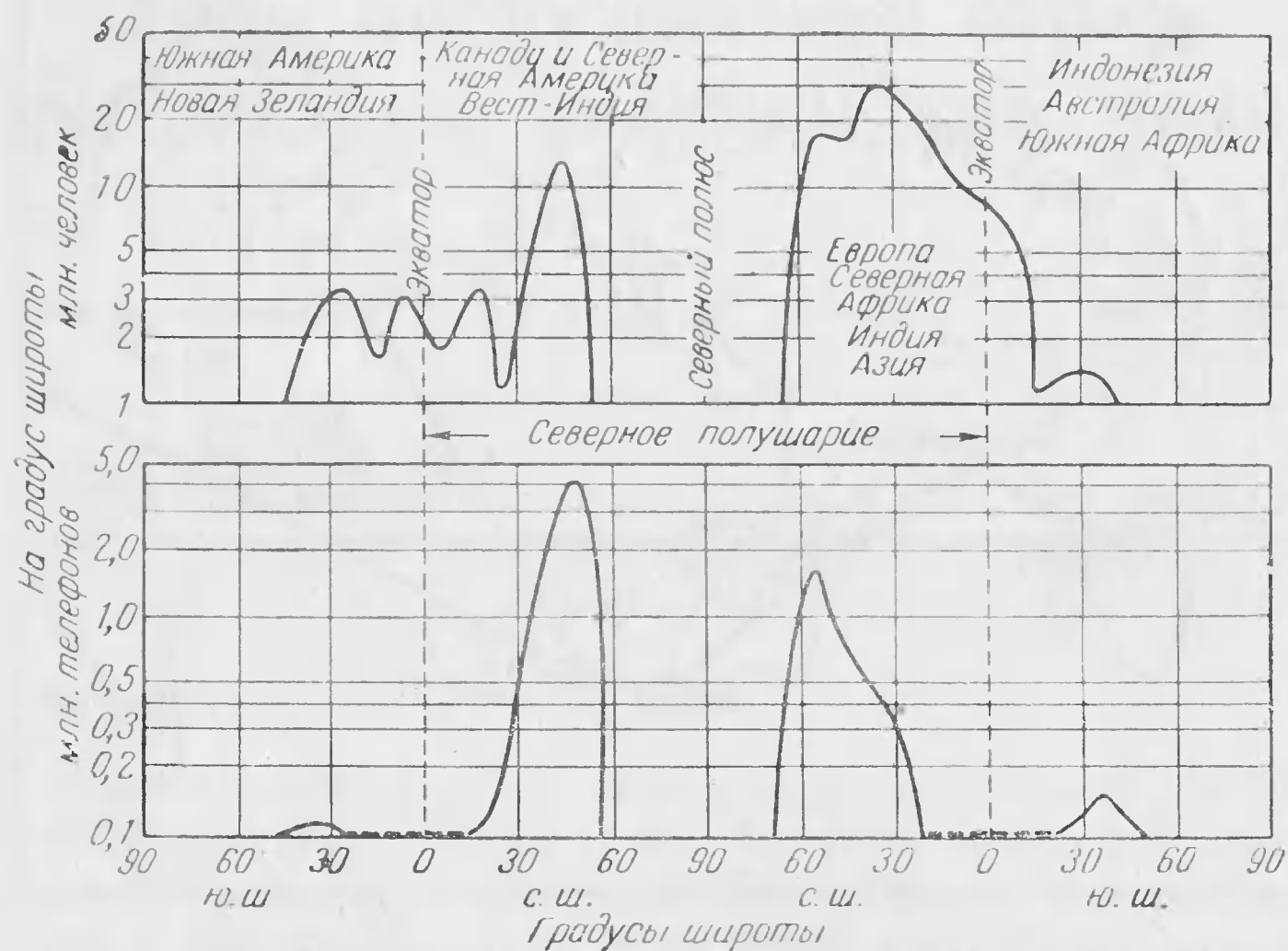
Фиг. 1. Города Британского содружества наций и возможные линии связи между ними.

потребуется ИСЗ, находящийся на какой-либо экваториальной орбите.

Последовательность вопросов, которые следует рассмотреть при разработке системы связи через ИСЗ, должна быть следующей:

- а) экономический обзор рынка;
- б) выбор оптимальной орбиты (орбит), удовлетворяющей поставленным требованиям;
- в) правильное распределение сложности системы и стоимости между наземными станциями и ИСЗ (исследования системы);
- г) проектирование наземной станции;
- д) проектирование ИСЗ;

- е) проектирование пусковой ракетной установки и стартовой площадки;
 ж) разработка вспомогательной аппаратуры (счетно-решающие устройства, устройства временного уплотнения и т. д.).



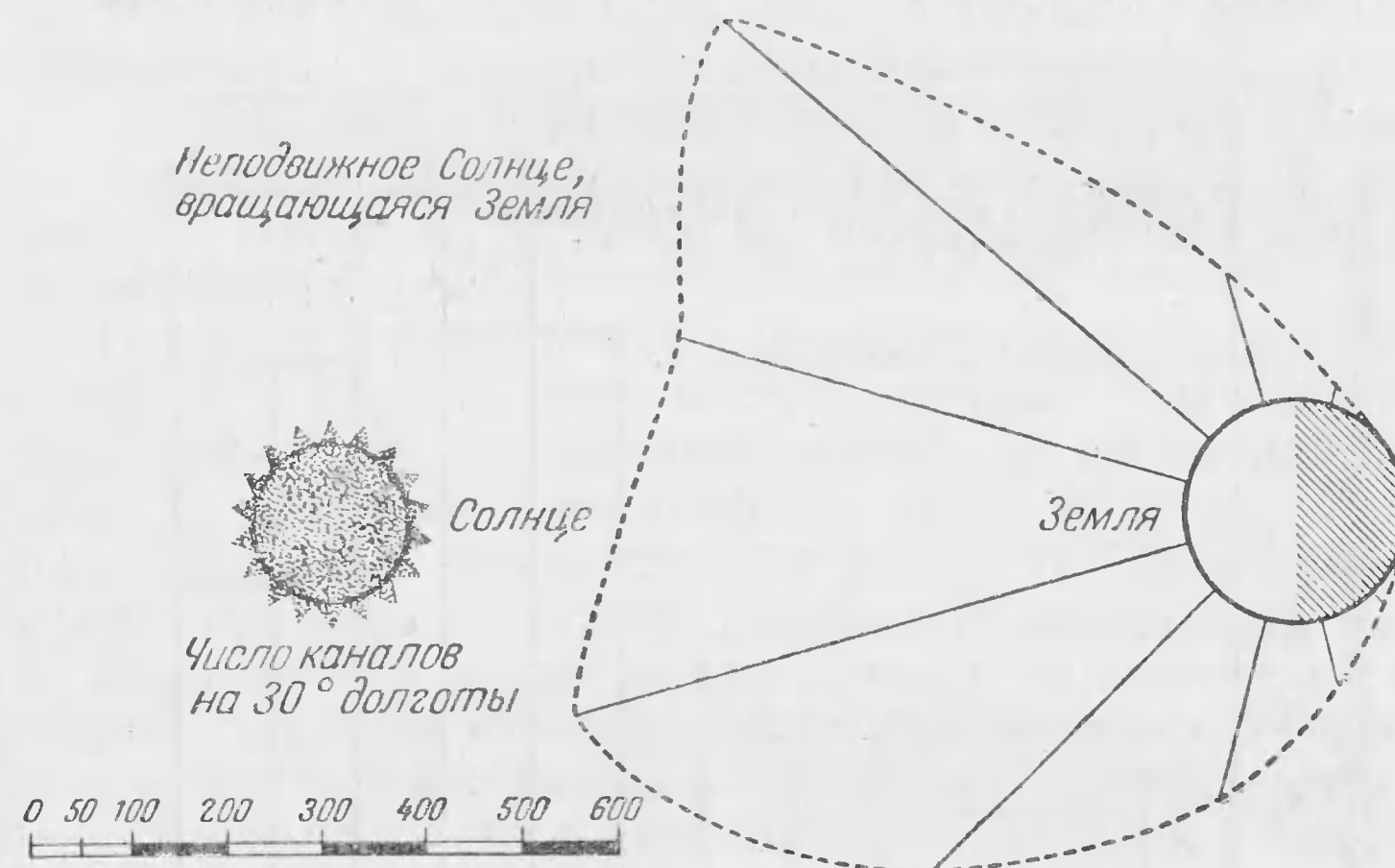
Фиг. 2. Распределение населения и телефонов по широтам.

В настоящей статье будут рассматриваться первые три вопроса.

2. Экономический обзор

Кабельные линии удовлетворяют некоторым требованиям, предъявляемым к мировым линиям связи, в течение всего времени, в то время как один ИСЗ может удовлетворять различным требованиям в течение всего времени или в определенные интервалы времени в процессе его обращения вокруг Земли. Следовательно, при обзоре экономических вопросов необходимо исследовать заявки на связь каждой страны с учетом времени суток, к которому эти заявки относятся. Решения по пунктам от а) до ж) в значительной степени взаимосвязаны, так что до детальной разработки

отдельных частных вопросов системы необходимо сделать разумные предположения относительно ориентировочных путей решения всех этих вопросов. Так, например, необходимо иметь хотя бы грубое представление о параметрах орбиты для того, чтобы разделить все требования к мировой



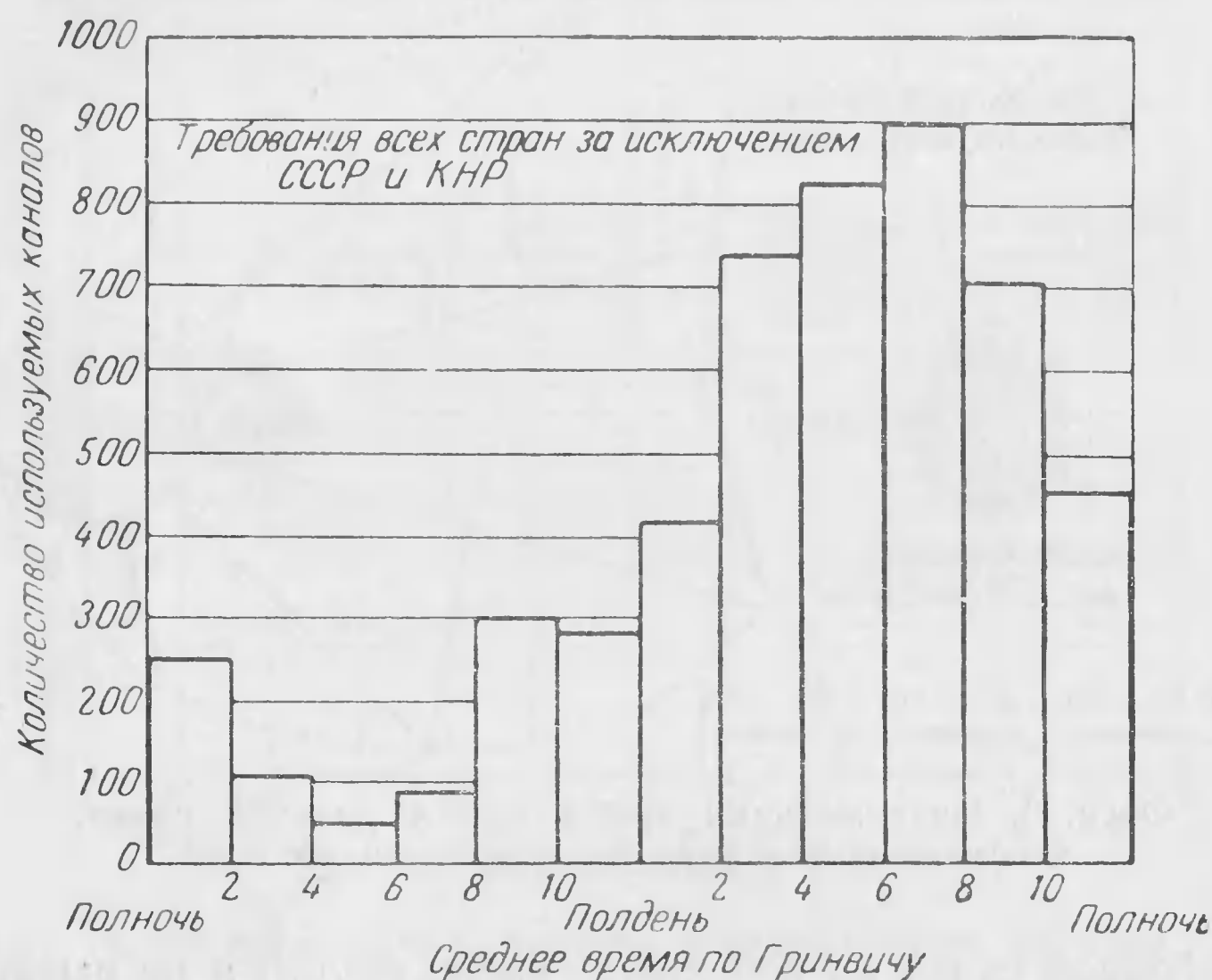
Фиг. 3. Максимальные требования к дальней связи, изображенные в виде пространственных осей.

телефонной связи на небольшое число групп, а не пытаться исследовать распределение требований по всей населенной части земного шара.

Можно, например, исследовать распределение связей по широтам, как это сделано на фиг. 2. Возможно, что этот метод хорош для мировых связей, но он непригоден для Британского содружества наций. Если, однако, предположить, что связь стран содружества лучше всего можно обслужить цепочкой ИСЗ с экваториальными орбитами, то целесообразно распределить требования к количеству связей между меридианами (временными зонами), и эти требования можно представить в виде длины линии от экватора.

На фиг. 3 приведены результаты такой группировки по 30-градусным секторам долготы или по двухчасовым интервалам. Максимальное количество используемых ка-

налов во всех направлениях характеризуется длиной линий, исходящих от Земли. В течение непродолжительных периодов времени орбиты ИСЗ остаются фиксированными относительно пространственных осей, поэтому такой способ изображения оказывается удобным для выбора орбиты. В течение более длительных интервалов времени (порядка



Ф и г. 4. Суточные изменения требований на телефонные каналы.

месяцев) направление орбиты в пространстве может вследствие каких-либо возмущений измениться. Направление на Солнце также будет совершать один оборот за год.

На фиг. 4 представлена диаграмма всемирных требований к связи. Из нее ясно видно, что требования к связи во всемирном масштабе от полуночи до 08.00 час по Гринвичу ничтожно малы по сравнению с остальным временем суток. Это справедливо как для ИСЗ, так и для кабельных линий и тем не менее требования к связи опять можно разбить на группы.

Независимо от того, в каком месте находятся ИСЗ, в часы малой нагрузки нельзя получить никакого эконо-

мического эффекта — их нельзя использовать для увеличения международного обмена. В этом случае гибкая система с цепочкой спутников обладает определенными преимуществами по сравнению с кабельными линиями. Избыточная емкость может быть использована в этот период для удовлетворения местных нужд. В частности, в Австралии в период с полуночи до 08.00 час по Гринвичу обмен максимален и там целесообразно иметь много наземных станций для использования избыточной емкости ИСЗ на сравнительно коротких линиях Сидней — Перт — Мельбурн — Аделаида — Брисбейн, а также на наиболее важных межконтинентальных линиях.

Наиболее интенсивный межконтинентальный обмен Америка — Европа имеет место в местные часы работы и сразу после них и охватывает период с 08.00 час по Гринвичу до полуночи. Американская нагрузка почти в два раза превышает европейскую, и количество одновременно ведущихся международных телефонных переговоров иногда достигает 880. Такова общая картина экономической обстановки, причем изучение этого неисчерпаемого и неподдающегося точному исследованию вопроса продолжается. В действительности обзор экономической ситуации и попытки ее предсказания редко оказываются точными. В связи с этим возникают трудности при сравнении возможностей ИСЗ и требований к ним. Возможности ИСЗ обычно с высокой точностью подсчитываются с помощью электронных вычислительных машин, в то время как цифры, характеризующие требования, могут быть весьма неточными и могут сильно изменяться в зависимости от желаний абонентов, ведущих телефонные переговоры.

При рассмотрении пределов изменения количества заявок на связь следует иметь в виду, что системы связи используются также службами информации, прессы и радио. Значительное, но определенное количество информации должно быть собрано ежедневно, но пункты, откуда поступает эта информация, могут быть весьма различными. Гибкость системы связи с ИСЗ обеспечивает ей в этом случае определенное преимущество по сравнению с системой связи по кабелям. Дополнительные каналы связи могут предоставляться тем пунктам, из которых в данное время передается обширная информация, за счет других пунктов, из которых инфор-

мация временно не поступает. Постоянный обмен информации, необходимый издателям, чтобы заполнить их газеты, приведет в результате к постоянному использованию емкости связного ИСЗ.

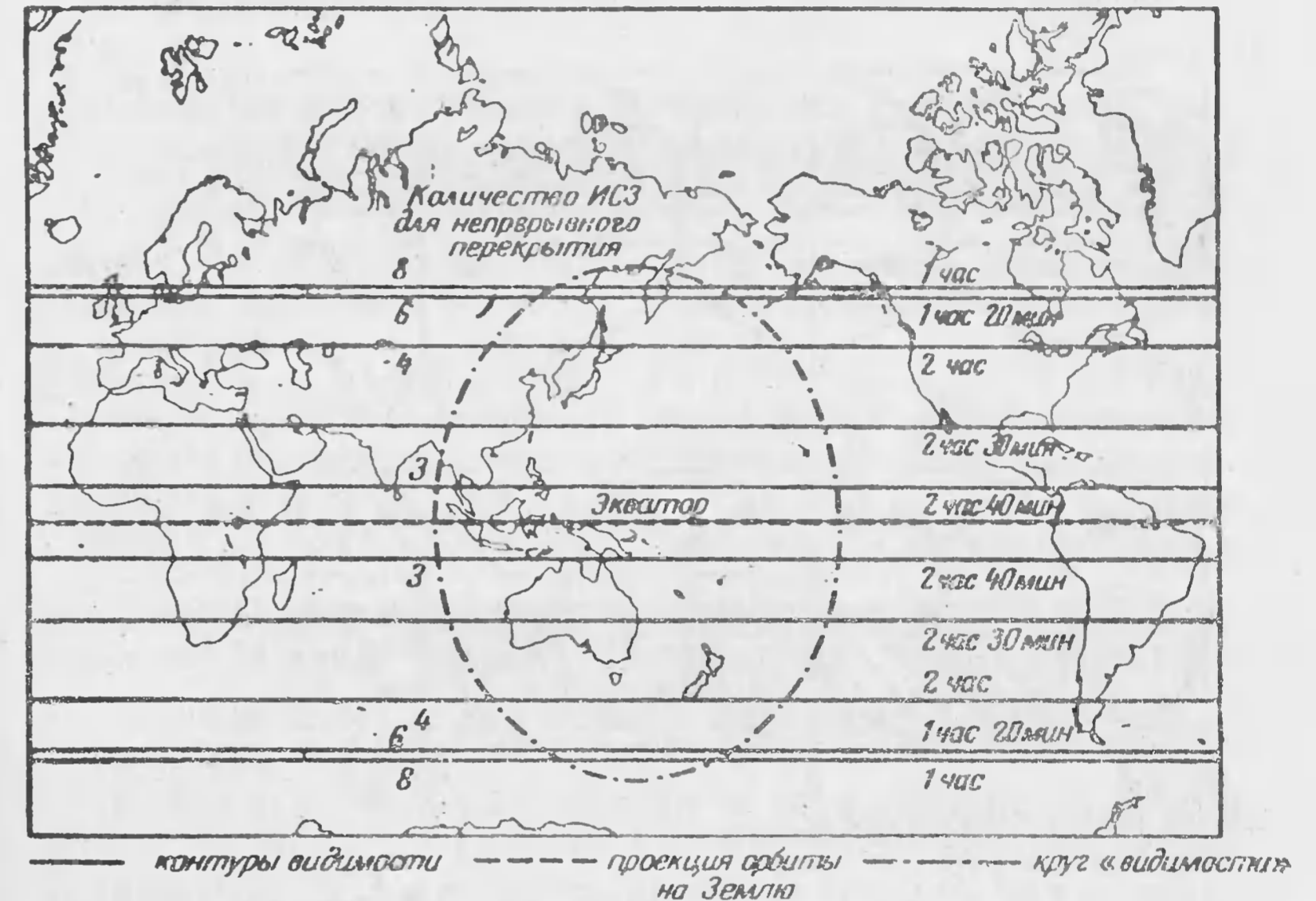
3. Оптимальные орбиты и ретрансляционные станции

После того как определены требования к системе связи для стран Британского содружества наций, можно перейти к рассмотрению возможных орбит, которые могут обеспечить выполнение этих требований. В соответствии с работой [1] для установления связи с какой-либо точкой ИСЗ должен подняться над горизонтом более чем на $7,5^\circ$. Если он должен обеспечить связь между двумя точками, то время обслуживания определяется временем, в течение которого ИСЗ виден одновременно из обеих точек.

Мы не имеем возможности рассмотреть все сколько-нибудь значительные линии связи между всеми возможными комбинациями пар пунктов. Однако мы можем рассмотреть вопрос об обслуживании, обеспечиваемом системой связи с ИСЗ для одного определенного пункта. Предположим, что всегда в тот момент, когда один ИСЗ уходит за линию горизонта на востоке, другой появляется на западе. Мы можем это назвать «непрерывным перекрытием». Ниже приводятся таблицы, в которых помещены данные о широтах, между которыми обеспечивается непрерывное перекрытие в зависимости от требуемого количества ИСЗ. Это поддается точному математическому расчету.

Предположим, что пункт, с которым необходимо иметь связь, не виден с одного ИСЗ, обслуживающего нас. В этом случае необходимо применить одну или даже две промежуточные ретрансляционные наземные станции. Большое количество ретрансляционных станций применять нежелательно из-за увеличения длины трассы, которое приводит к дополнительному запаздыванию сигналов в линии связи, что может оказаться неприемлемым для абонента. Ретрансляционная станция должна «видеть» одновременно два ИСЗ, т. е. она должна находиться в зоне, перекрываемой обоими ИСЗ. Следуя принципам, изложенным в работе [2] для стационарных орбит, рассмотрим идею кольца наземных ретрансляционных станций.

Абонент посылает вызов из любой точки площади, в пределах которой виден первый ИСЗ. Его вызов направляется наземной станцией на ИСЗ. Если вызов направлен в пункт, находящийся за пределами круга «видимости» этого ИСЗ, то он должен быть ретранслирован одной или большим



Ф и г. 5. Контур видимости для 7-часового экваториального круга.

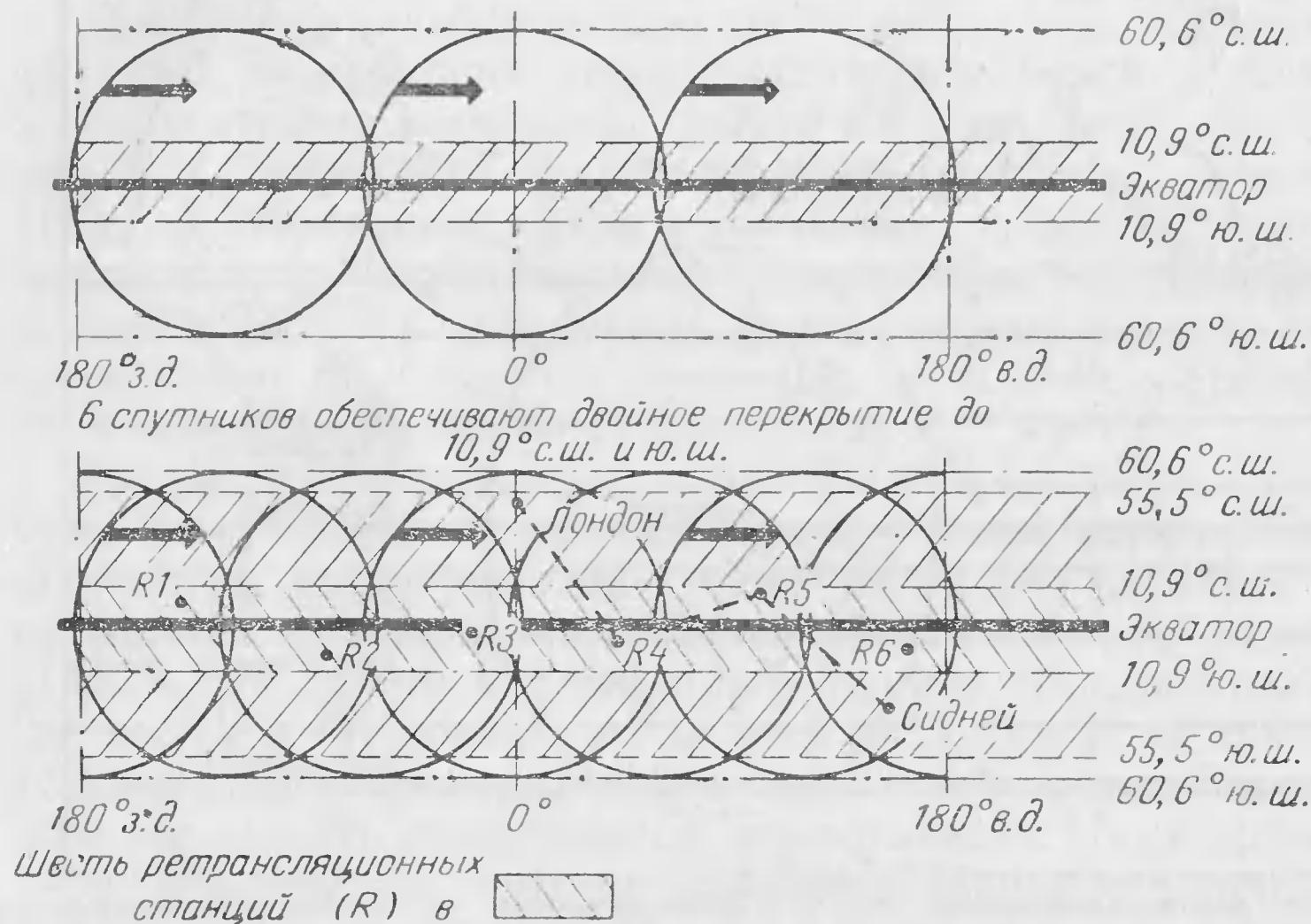
числом магистральных наземных ретрансляционных станций, каждая из которых должна быть связана с двумя соседними ИСЗ. Таким образом, каждая магистральная ретрансляционная станция всегда должна «видеть» два соседних ИСЗ. При желании можно иметь меньше наземных станций и больше ИСЗ, но экономическая сторона этого вопроса требует математического расчета, к которому мы теперь и приступим.

Пусть имеется n экваториальных ИСЗ, каждый из которых перекрывает на Земле круг диаметром θ° , который перекрывается со следующим кругом на δ° (на экваторе). Поскольку эти экваториальные ретрансляционные станции


должны одновременно видеть два ИСЗ, то необходимое число ретрансляционных станций равно $360^\circ/\delta$.

Чем больше ИСЗ используется в системе, тем меньше требуется наземных станций, и наоборот. Пусть, например,

3 спутника обеспечивают одиночное перекрытие вблизи экватора



Шесть ретрансляционных станций (R) в

Между станциями в  возможна непрерывная связь, например, между Лондоном и Сидней

Фиг. 6. Наземные ретрансляционные станции должны «видеть» 2 спутника.

поставлена задача свести к минимуму годовую стоимость эксплуатации системы. Предположим, что годовые затраты на каждый спутник в p раз больше затрат на каждую наземную станцию, причем капитальные затраты амортизируются в форме годовых стоимостей.

Дифференцируя и приравнявая нулю, находим, что общая стоимость минимальна в том случае, когда на каждый спутник приходится \sqrt{p} наземных станций; (1)

Наименьшая стоимость системы будет когда

$$\text{число ИСЗ} = \left(1 + p^{-\frac{1}{2}}\right) \frac{360^\circ}{\theta^\circ}. \quad (2)$$

Например, для 6-часового круга $\theta = 120^\circ$ и после расчетов (см. фиг. 5 и 6) получаем результаты, приведенные в следующей таблице.

Таблица 1

Количество ИСЗ и наземных станций, при которых стоимость системы для 6-часового экваториального круга будет наименьшей

Стоимость 1 ИСЗ равна стоимости 9 наземных станций	4 ИСЗ работают с 12 экваториальными ретрансляционными станциями
Стоимость 1 ИСЗ равна стоимости 4 наземных станций	4,5 ИСЗ работают с 9 экваториальными ретрансляционными станциями
Стоимость 1 ИСЗ равна стоимости 2,25 наземных станций	5 ИСЗ работают с 7,5 экваториальными ретрансляционными станциями
Стоимость 1 ИСЗ равна стоимости 1 наземной станции	6 ИСЗ работают с 6 экваториальными ретрансляционными станциями

К счастью, большие ошибки в определении стоимости в гораздо меньшей степени изменяют соотношение между количеством ИСЗ и ретрансляционных станций. Эти ретрансляционные станции являются неизбежным злом и на практике следует принимать все меры к такому их размещению, при котором близлежащие города использовали бы эти станции для связи и их можно было бы считать наземными абонентскими станциями.

Ниже рассматриваются различные орбиты ИСЗ, которые могут быть использованы для связи между странами Содружества.

4. Орбита с наклоном 63° и апогеем при 63° с. ш.

Эта орбита была описана в работе [1]. Она обеспечивает лучшее обслуживание северного полушария в ущерб южному. При этом особенно плохим будет обслуживание Австралии и Новой Зеландии. Орбита полностью позволяет избежать воздействия радиационного пояса.

Запуск ИСЗ может осуществляться в Вумере. Смещение орбиты к северу настолько значительно, что линия связи Лондон — Ванкувер обеспечивается так же хорошо, как и гораздо более короткая, но проходящая южнее линия Лондон — Нью-Йорк.

Для рассматриваемой орбиты геометрически идеальное расположение ретрансляционных станций между спутниками будет не на экваторе, а севернее 63° с. ш. В этом случае длина основной магистрали для ретрансляционных станций составляет меньше половины длины экватора, что дает существенную экономию. Представляется возможным коммерческое использование ретрансляционных станций, если расположить их вблизи таких городов, как Лондон, Токио и Ванкувер. Требование к расположению ретрансляционных станций вблизи экватора неизбежно приведет к сооружению наземных станций на мелких островах Тихого океана без перспектив их использования для местных нужд.

5. Экваториальный «солнечный» эллипс

Эта орбита также описана в работе [1]. Она довольно хорошо соответствует графику потребности, показанному на фиг. 3, хотя Англия и Канада оказываются окраинными областями. Ночью эта орбита не обеспечивает связь, если она не дублируется на затемненной стороне Земли. Кроме того, эта орбита не позволяет избежать воздействия на ИСЗ пояса радиации и на нее трудно осуществить запуск ИСЗ из Вумера.

6. Экваториальная круговая орбита с высотой 10 400 км

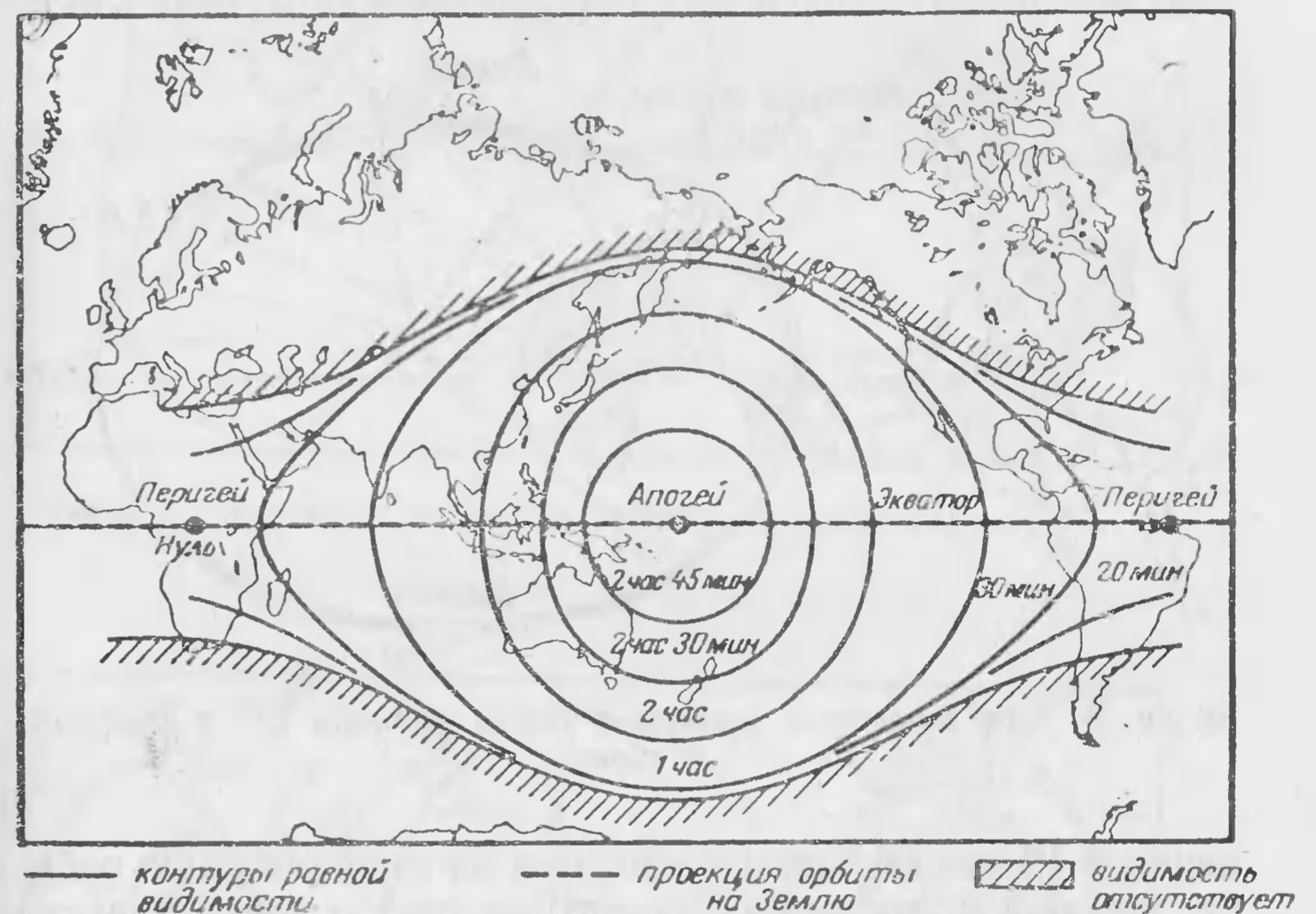
Эта орбита, на которой ИСЗ делает 4 оборота в сутки, обеспечивает одинаковое перекрытие по экватору днем и ночью. Это нежелательно и не соответствует требованиям (см. фиг. 3). Она позволяет полностью избежать воздействия пояса радиации, однако ИСЗ нельзя запустить из Вумера. Эта орбита требует от ракеты наибольшей грузоподъемности при данной системе запуска по сравнению с любой другой рассматриваемой орбитой.

Будучи круговой, она имеет на один параметр меньше, чем эллиптическая. Дата запуска ИСЗ может быть произвольной. Она требует меньшего числа экваториальных

наземных станций, чем большинство других экваториальных орбит.

7. «Солнечный» экваториальный эллипс (5,5 об/сутки)

Этот эллипс имеет дневной апогей в 12 200 км и ночной перигей в 1930 км. Положение апогея изменяется таким



Фиг. 7. Перекрытие для орбиты, описанной в п. 7.

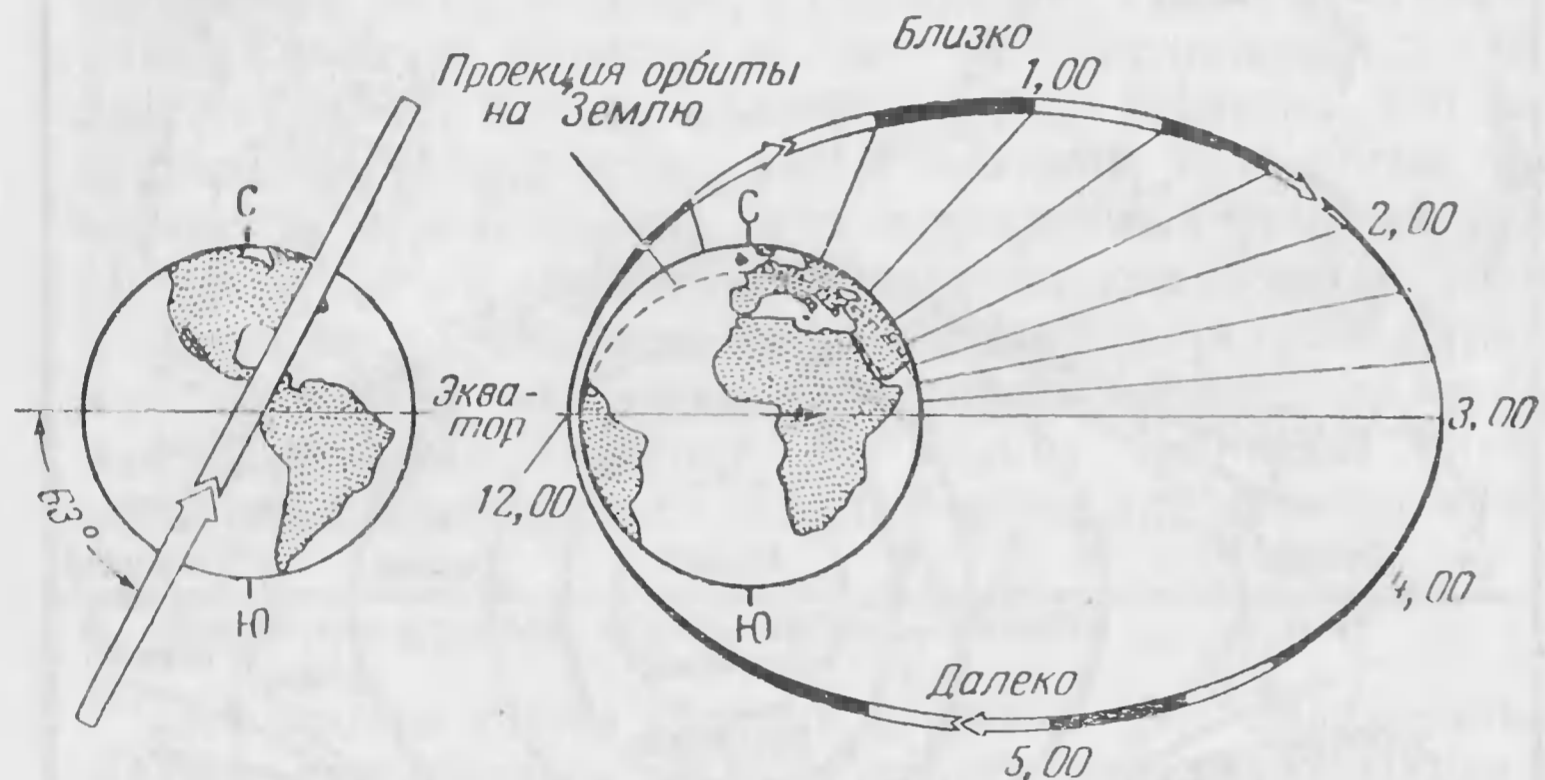
образом, что он в течение всего года направлен в сторону Солнца. Такая орбита обеспечивает обслуживание большей площади днем и меньшей площади ночью и в дальнейшем вполне может быть использована для целей связи, в частности тогда, когда новые источники питания позволят ИСЗ проходить без вреда через пояс радиации.

Если мы будем настаивать на непрерывном двойном перекрытии экваториальных ретрансляционных станций ночью, то это приведет к значительному увеличению числа ИСЗ, избыточному для дня, если не иметь в виду потребностей будущего.

«Видимость» этой орбиты показана на карте (фиг. 7).

8. Эллиптическая орбита с наклоном в 63° , апогеем в 0° и с 6-часовым периодом обращения

Все орбиты с наклоном 63° к экватору обладают тем свойством, что их апогеи всегда остается над одной и той же широтой. Рассматриваемая орбита приведена на фиг. 8. ИСЗ может быть запущен на такую орбиту из Вумера с при-

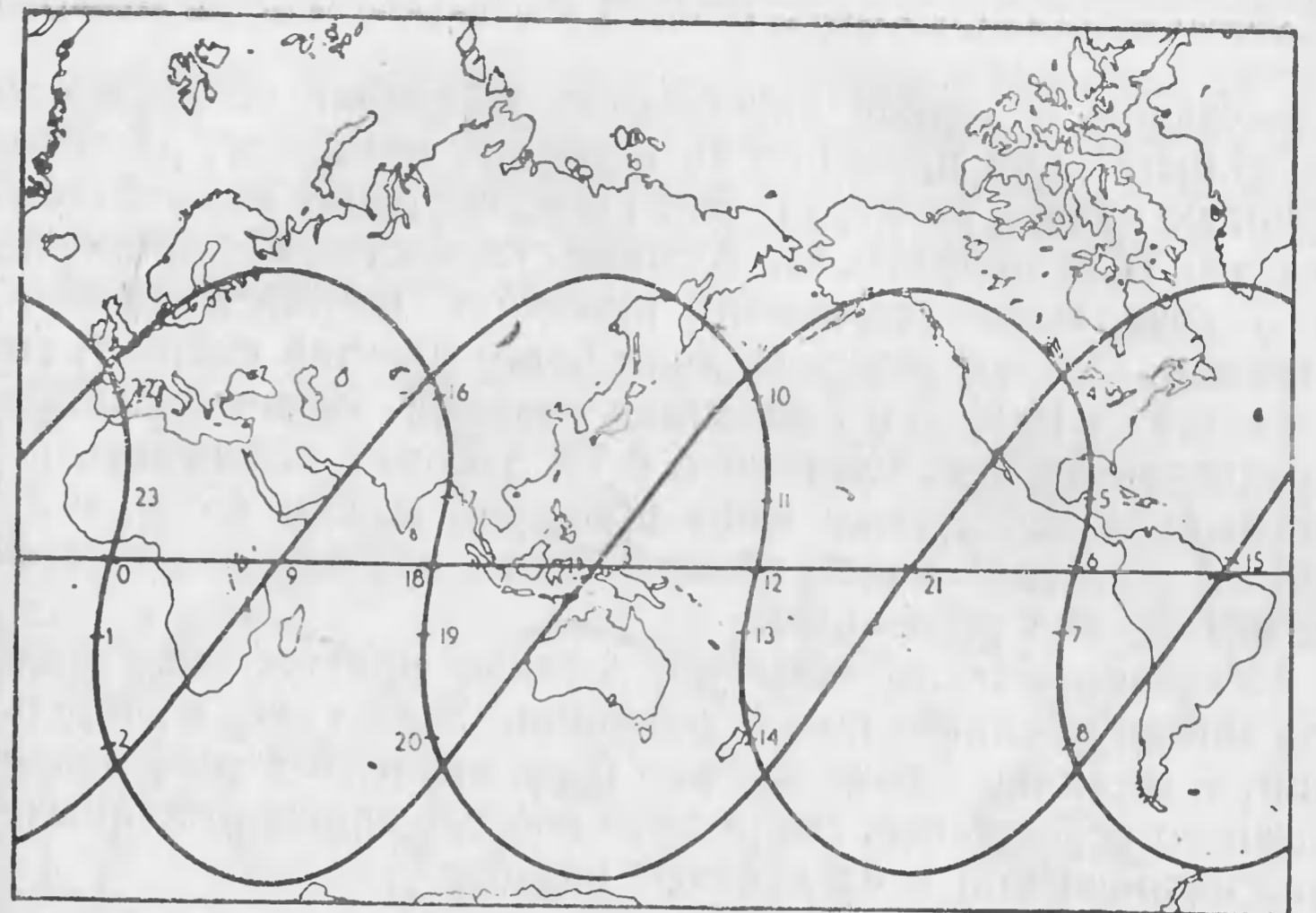


Фиг. 8. Вид 6-часовой орбиты с углом наклона 63° в профиль и сбоку.

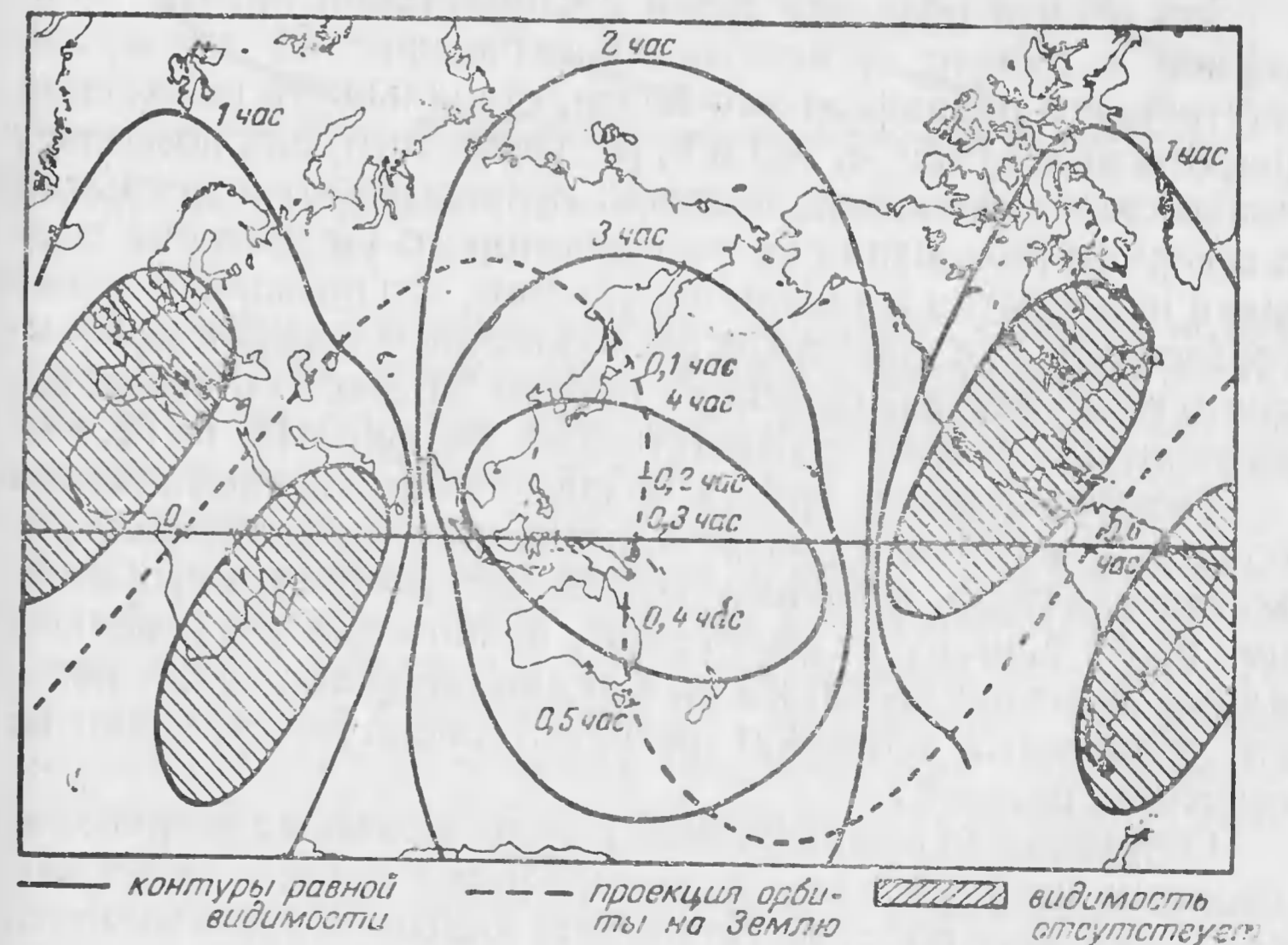
мерно в 10 раз большим весом, чем на стационарную орбиту, которая в любом случае требует, чтобы точка запуска находилась на экваторе. Примерно для 4-часового периода вблизи апогея угловая скорость вращения Земли хорошо согласуется с экваториальной составляющей скорости ИСЗ, что приводит к дополнительному движению ИСЗ с севера на юг через экватор. Это лучше всего видно при нанесении на карту проекции траектории движения спутника, как это сделано на фиг. 9.

Вычерчивая окружности видимости в последовательные интервалы времени и отмечая точки, в которых они пересекаются, можно, соединив эти точки, получить контуры часовой, двухчасовой, трехчасовой и четырехчасовой непрерывной видимости ИСЗ (фиг. 10).

Из фиг. 10 видно, что экваториальный пояс трехчасового перекрытия имеет ширину $\sim 115^\circ$, так что 8 спутников,



Фиг. 9. Проекция на Землю орбиты, рассмотренной в п. 8.



Фиг. 10. Время видимости для орбиты, рассмотренной в п. 8.

следующих по одной траектории, обеспечат непрерывное перекрытие при примерно 15 наземных станциях, расположенных вблизи экватора. Это система с самой низкой стоимостью, если принять, что годовая стоимость ИСЗ примерно в 3 раза выше стоимости наземной ретрансляционной станции. Однако географически более простая система, состоящая из 12 ИСЗ и 7 наземных станций, может оказаться предпочтительней. Система с 8 ИСЗ может обеспечить непрерывное перекрытие зоны примерно между 45° с. ш. и 45° ю. ш. и временное обслуживание некоторых районов, лежащих вне этой зоны.

Указанное обстоятельство, а также прохождение орбиты вне внутреннего пояса радиации делает ее желательной, если Лондон тоже должен быть включен в зону непрерывного перекрытия. Это в свою очередь приводит к орбите, рассматриваемой в следующем разделе.

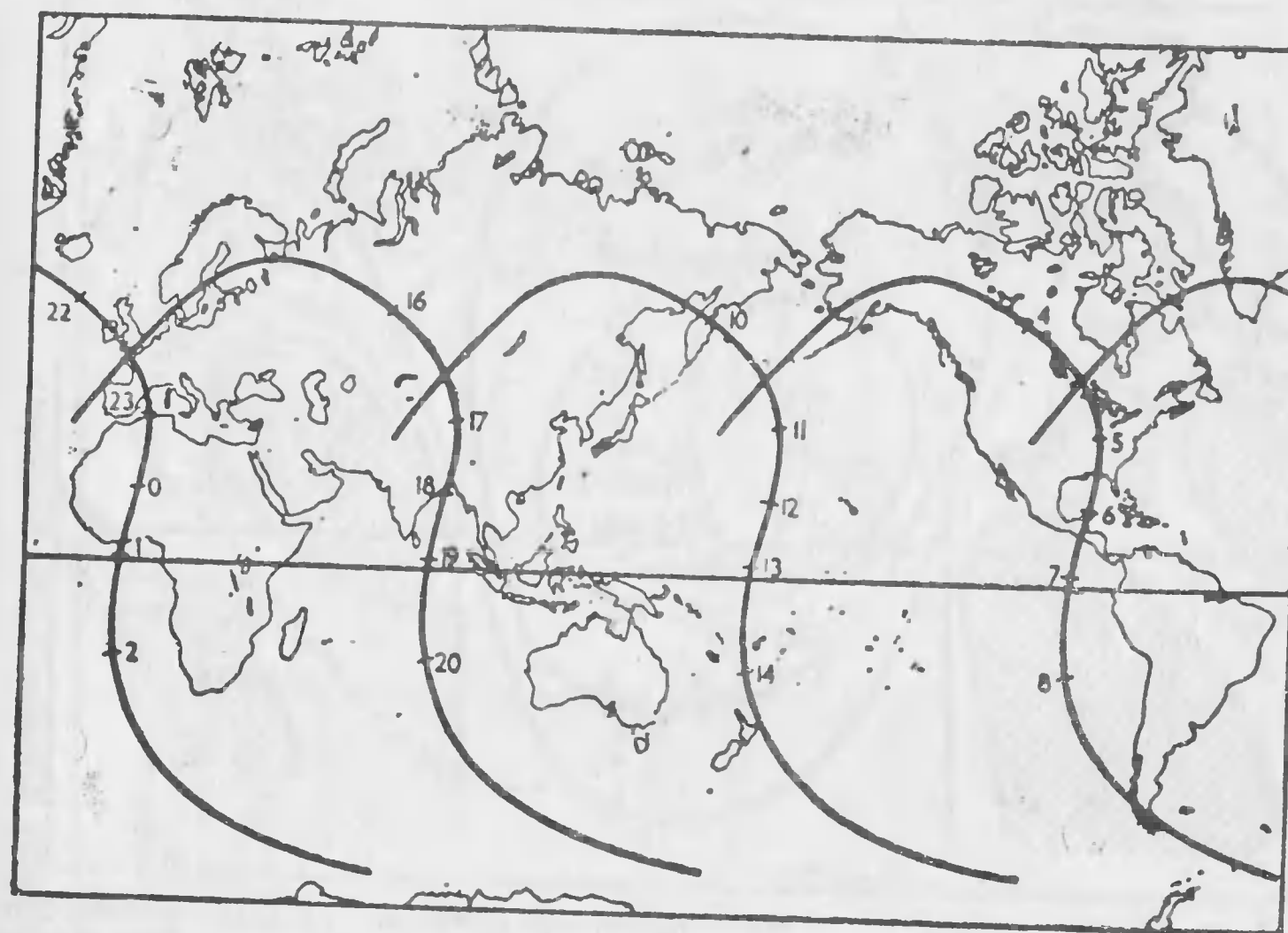
9. Эллиптическая орбита с наклоном 63° , с апогеем при 20° с. ш. и периодом обращения 6 час

Эта орбита обладает всеми достоинствами орбиты, описанной в пункте 7, включая прохождение за пределами внутреннего радиационного пояса, стабильность положения широты апогея (20° с. ш.) и т. д. Кроме того, она позволяет значительно увеличить площадь непрерывного перекрытия в северном полушарии за счет некоторого уменьшения площади перекрытия в южном полушарии, что позволяет лучше согласовать ее с широтным расположением городов Британского содружества. Проекция орбиты на Землю и время видимости приведены соответственно на фиг. 11 и 12.

Рассматриваемая орбита обладает еще и преимуществом орбиты, описанной в пункте 3, поскольку любая параллель короче экватора, и поэтому кольцо ретрансляционных станций на 60 с. ш. будет иметь длину ровно в два раза меньше длины экватора (очень жаль, что для полярных орбит нельзя установить основную ретрансляционную станцию на северном полюсе).

Оптимальное расположение кольца наземных ретрансляционных станций для рассматриваемой орбиты будет несколько южнее 50° с. ш. По расчету кольцо должно состоять из 7 наземных ретрансляционных станций, равномерно рас-

пределенных по долготе. Это соответствует широтам от 45° до 50° с. ш. Кольцо таких станций изображено на фиг. 13. Поскольку северные широты более густо населены, то можно установить только 4 не приносящих дохода станции, которые особо отмечены на фиг. 13.

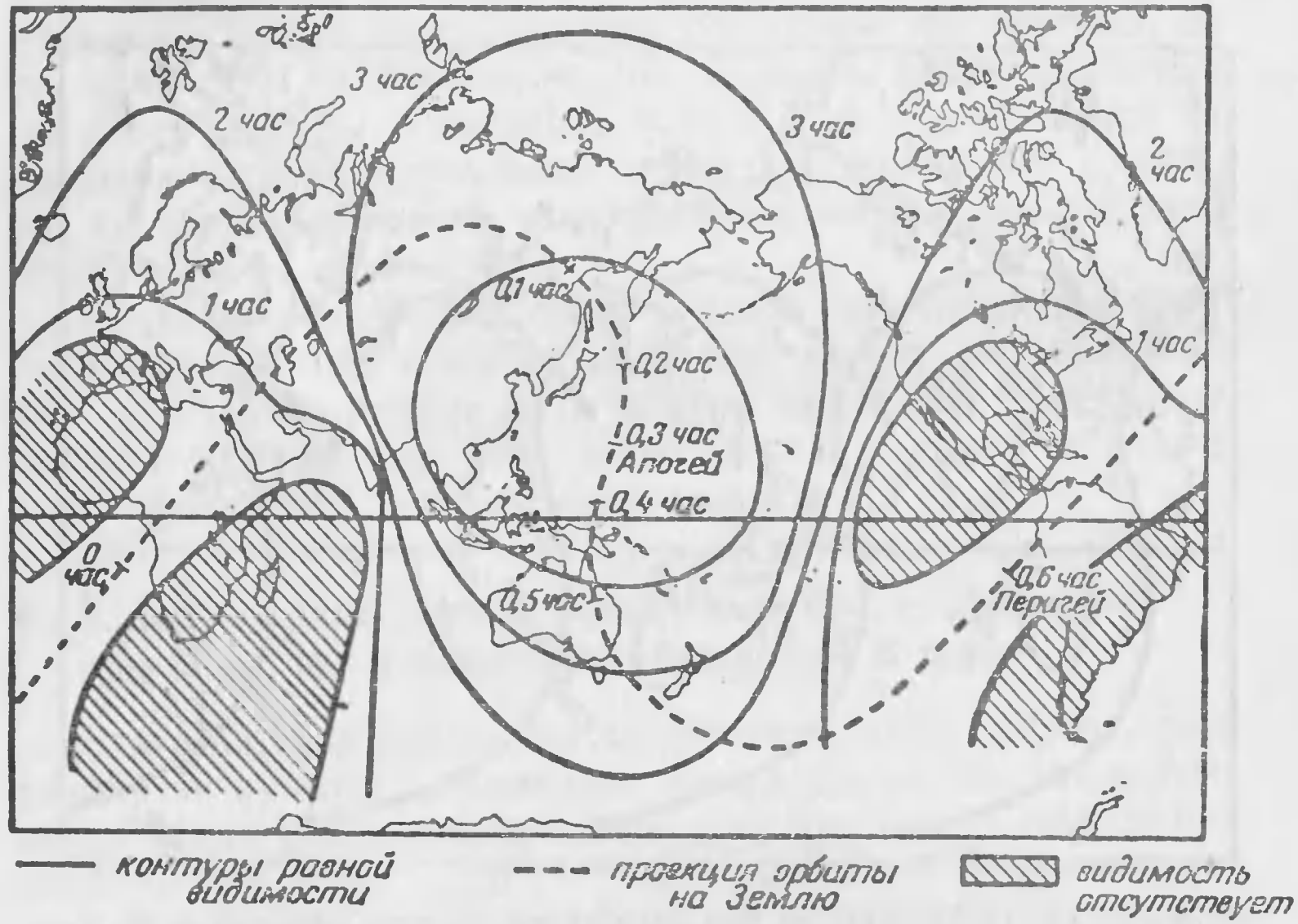


Фиг. 11. Проекция на Землю орбиты, рассмотренной в п. 9.

Это кольцо наземных ретрансляционных станций может работать с 8 ИСЗ, имеющими орбиты с одинаковыми проекциями на Землю. При этом будет обеспечиваться перекрытие для всех городов от 76° с. ш. до 22° ю. ш. в худшем случае и до 40° ю. ш. в лучшем случае. Это изменение вызывается небольшими смещениями орбиты и приводит к тому, что обслуживание Новой Зеландии в течение некоторых месяцев будет вестись с кратковременными перерывами. На других странах Содружества это не скажется. Возможно, что при широте апогея между экватором и 20° с. ш. перекрытие южного полушария улучшится без ухудшения перекрытия северного полушария.

Рассматривая некруговые орбиты, следует иметь в виду одно явление, а именно искажение орбит под влиянием

Солнца и Луны, стремящихся сделать их круговыми. Установлено, что для орбит, описанных в пунктах 3 и 4, этот эффект ничтожен. Для орбит, описанных в пунктах 6—8, он еще не вычислен.



Фиг. 12. Время видимости орбиты, рассмотренной в п. 9.

Однако преимущества рассматриваемой орбиты таковы, что может оказаться выгодным восстанавливать орбиту с помощью реактивных двигателей.

Стационарная орбита была исключена из рассмотрения, поскольку простой эксперимент с магнитофоном показывает, что запаздывание сигнала для антипода на 1 200 мсек и отражения в дифференциальной системе на дальнем конце сделает этот вид связи для многих абонентов практически неприемлемым. Возможно, что удастся устранить эти отражения, что уменьшит запаздывание сигналов и сделает связь приемлемой для многих абонентов. Стационарная орбита представляется наиболее удобной для передачи теле-

Таблица 2

Параметры рассмотренных орбит

Раздел статьи	Орбита	Долговечность (радиация), год	Относительный вес спутника (запуск в Вумера)	Относительный вес спутника (запуск с мыса Кеннеди)	Относительный вес спутника (запуск с экватора)	Площадь непрерывного перекрытия	Площадь перемающегося перекрытия	Искажения
4	Окружность 480 км 63/63 с. ш./4D	2 × 10 ⁴ 22,7	100 28	100 28 ¹⁾	100 28	Пока не рассчитана	Сев. полюс 70° ю. ш.	— Апогей на 63° с. ш. поворачивается каждые 2 г. «Солнечные»
5	0/0/4,2/3D	17,7	16 (4 ступени) 3	16 (4 ступени) 3	33	Не применяется	—	Отсутствуют
6	0/0/4D	91	(4 ступени)	(4 ступени)	14	8 спутников ±54° 6 спутников ±51°	±60°	«Солнечные»
7	0/0/5D	9,9	18 (4 ступени) 28	18 (4 ступени) 28 ¹⁾	45	Не применяется	—	Апогей поворачивается на экваторе каждые 2 г.
8	63/0/4D	85	28	28 ¹⁾	28	±45°	Сев. полюс Южн. полюс	«Солнечные»
9	63/20 с. ш./4D	29,5	28	28 ¹⁾	28	76° с. ш. —22° ю. ш.	Сев. полюс —40° ю. ш.	Апогей поворачивается на 20° с. ш. каждые 2 г.

¹⁾ Включает запуск через Кубу, Венесуэлу, Бразилию. Разницей в широте Вумера и мыса Кеннеди пренебрегаем. Разницей в скорости Земли на 0 и 30° (6,1 м/сек) пренебрегаем.

видения, где запаздывание сигналов не играет роли.

Обсуждая некоторые детали работы наземных станций, мы упоминали о необходимости компромисса между за-



Фиг. 13. Цель наземных ретрансляционных станций для орбиты, рассмотренной в п. 9.

тратами на наземные средства и на ИСЗ. Параметры рассмотренных орбит приведены в табл. 2.

10. Распределение сложности оборудования между ИСЗ и наземными станциями

До сих пор мы обсуждали количество наземных станций, теперь рассмотрим их сложность. Сделаем это с помощью числового примера. В пункте 2 упоминалось, что наибольшее число каналов, одновременно используемых во всемирном масштабе, может составить примерно 900. Если мы будем считать, что каждый канал занят 18 мин каждого часа, то получаем $900 \times 60/18 = 3\,000$ каналов.

Следует ли их распределить между большим числом простых легких ИСЗ или лучше сконцентрировать между

несколькими сложными ИСЗ. Если мы возьмем орбиту, описанную в пункте 8, с 9 ИСЗ, то в любой момент 6 ИСЗ находятся в рабочем положении, а 3 проходят через перигей. Следовательно, каждый ИСЗ должен обеспечивать 500 каналов, поскольку $6 \times 500 = 3\,000$. Если использовать 80 легких ИСЗ, то каждый из них должен будет обеспечить только 50 каналов, и вместо 9 больших ракет можно использовать 80 малых.

Каждая наземная станция должна будет работать одновременно на 10 ИСЗ, используя 10 больших антенн плюс одну резервную, вместо одной рабочей и одной резервной в случае 500-канальных ИСЗ. Эти цифры должны быть удвоены, если передатчик и приемник используют разные антенны. Каждая пара антенн вместе со всем их оборудованием, которое защищает их от различных помех и отражений, будет стоить около 0,5 млн. ф. ст.

Таким образом, с экономической точки зрения предпочтительнее иметь 9 тяжелых ИСЗ, поскольку при этом экономится 4,5 млн. ф. ст. на стоимости наземных станций. Дополнительные преимущества возникают, если ИСЗ имеют средства ориентации. Механизм системы ориентации увеличивает вес ИСЗ, и это ставит в невыгодное положение систему с 80 легкими и более простыми ИСЗ. Преимущества ИСЗ, имеющих системы ориентации, рассмотрены в работе [3].

11. Полоса частот

Активные ретрансляторы на ИСЗ способны обеспечить требуемое количество радиоканалов, необходимое для удовлетворения нужд связи стран Содружества до конца XX века.

В космосе можно не только использовать для дальних связей диапазон 300—10 000 Мгц, но благодаря антеннам с острой направленностью излучения, применяемых на этих частотах, многие ИСЗ могут работать на одинаковых частотах одновременно, причем разделение сигналов выполняется за счет диаграмм направленности антенн.

Грубо говоря, мы располагаем диапазоном частот, превышающим в 100 раз полосу частот одного канала, и поэтому одна наземная станция может работать с 20 ИСЗ одновременно путем использования техники направленной передачи и

приема. При использовании активных ИСЗ — ретрансляторов это обеспечит диапазон в 2 000 раз более широкий.

Представляется, что можно сэкономить энергию источника на ИСЗ путем применения частотной модуляции с большой девиацией и обменять мощность на полосу, сохраняя величину отношения сигнал/шум.

В дальнейшем мы будем иметь более дешевые и более мощные источники питания, чем солнечные батареи, со стоимостью порядка 100 тыс. ф. ст. на 1 квт постоянного тока. Можно надеяться, что эти новые источники будут разработаны до того, как появится недостаток частот из-за предлагаемого использования ЧМ с большой девиацией.

12. Общая годовая стоимость

Детальное исследование стоимости системы связи с использованием ИСЗ для стран Содружества слишком сложно для того, чтобы его проводить в рамках данной статьи. Однако интересно привести хотя бы некоторые цифры, например для системы с 9 ИСЗ, рассмотренной в пункте 8.

Если срок службы спутника составляет только один год и 50% запусков проходит успешно, то стоимость требуемых 18 ракет «Блу Стрик» с последними ступенями составит примерно 18 млн. ф. ст.

Стоимость одной наземной станции составляет около 1 млн. ф. ст., а ее срок службы можно считать равным 10 годам. Стоимость системы 24 наземных станций таким образом будет равна 2,4 млн. ф. ст. в год. Обслуживание, расходы на администрацию и текущие расходы на содержание 24 наземных станций и вычислительного центра, вероятно, составят около 10 млн. ф. ст. в год. Если приведенные выше цифры достоверны, то общая годовая стоимость системы составит 30 млн. ф. ст.

Девять ИСЗ на 720 каналов каждый смогут обеспечить 3 396 млн. канало-минут в год. Если стоимость 1 мин транс-океанского телефонного разговора составляет 1 фунт, то для того, чтобы система окупалась, достаточно использовать ее на 1%. Эти 30 млн. минут нужно сравнить с современным уровнем примерно в 225 млн. оплаченных минут в год по всем мировым линиям дальней связи. Очевидно, что только часть существующего трафика может быть переключена на

эту новую систему. Высокий коэффициент использования, безусловно, обеспечит и высокую рентабельность системы.

Стоимость разработки ракет, не учтенная выше, оценивается примерно в 80 млн. фунтов. Она может окупиться за 1 год, если степень использования поднять до 3,7% от потенциальных возможностей системы. Практически более правильным будет значительно снизить расходы, разложив стоимость разработки на несколько лет и стимулируя увеличение мирового трафика.

13. Заключение

Для связи стран Британского содружества наций необходимо иметь по крайней мере 9 ИСЗ на орбитах, описанных в пункте 8. Они должны для удовлетворения максимальным требованиям иметь по 720 каналов. Такие ИСЗ могут быть запущены из Вумера (Австралия) с использованием в качестве первой ступени ракеты «Блу Стрик».

Система связи с ИСЗ может быть введена в действие до окончания постройки кабельной системы стран Содружества, т. е. до 1967 г. Последняя должна в этом случае оказаться неэкономичной из-за высоких тарифов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dauncey S. R., Hilton W. F., Communication Satellite Orbits, XI, I. A. F. Congress, Stockholm (1960).
2. Bray W. J., The Potentialities of Artificial Earth Satellites for Radio Communication, *J. Inst. Elect. Engrs.*, London, 6, 676 (1960).
3. Hilton W. F., Advantages of Attitude Stabilization and Station Keeping in Communications Satellite Orbits, *J. Brit. Inst. Radio Engrs* (September 1961).
4. Vargo L. G., Orbital Patterns for Satellite Systems., *J. Astr. Sci.*, VII, № 4 (1960).
5. Stewart B., Stewart P. A. E., Dynamics and Engineering of Satellite Attitude Control Systems.
6. Buss B., Millburn J. R. A., Proposal for an Active Communication Satellite System Based on Inclined Elliptic Orbits, *J. Brit. Inst. Radio Engrs.* (September 1961).

5. Использование стационарных искусственных спутников Земли для связи¹

Хэвиленд Р.

1. Введение

В статье рассматриваются вопросы применения стационарных искусственных спутников Земли для целей связи. Под термином «стационарный спутник» понимается спутник, неподвижный относительно Земли. Такой ИСЗ обращается вокруг Земли по круговой экваториальной орбите с периодом 24 час на высоте 35 810 км, т. е. синхронно с вращением Земли.

В статье дается обзор некоторых параметров стационарных ИСЗ в сравнении с ИСЗ, обращающимися вокруг Земли на меньших высотах. К этим параметрам относятся: полезная нагрузка, зона обслуживания, время запаздывания сигнала и сроки замены ИСЗ.

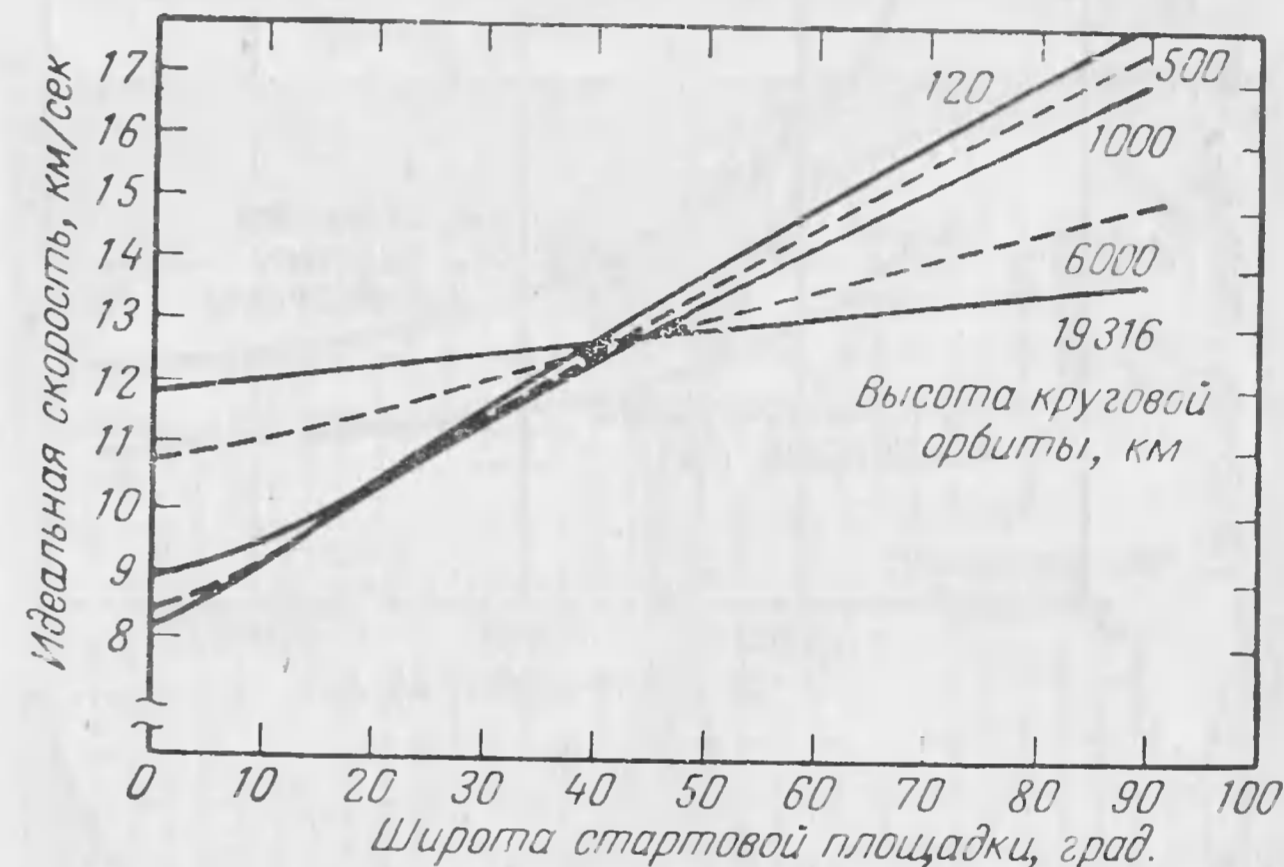
Сначала указанные параметры рассматриваются для ИСЗ, применяемого для ретрансляции сообщений из одного пункта земной поверхности в другой. Затем рассматривается ИСЗ, предназначенный для радиовещания с перекрытием обширных территорий. Показывается, что для обеспечения ретран-

¹ Haviland R. P., Communications Satellites, Academic Press, Lnd. — N. Y., 1962, p. 113—129.

сляции стационарные ИСЗ представляются менее желательными, чем ИСЗ на более низких орбитах. Стационарные ИСЗ обладают, по-видимому, большими преимуществами при их использовании для радиовещания.

2. Соотношения, определяющие полезную нагрузку

Относительная величина энергии, необходимой для выведения на орбиту заданной полезной нагрузки, наиболее



Фиг. 1.

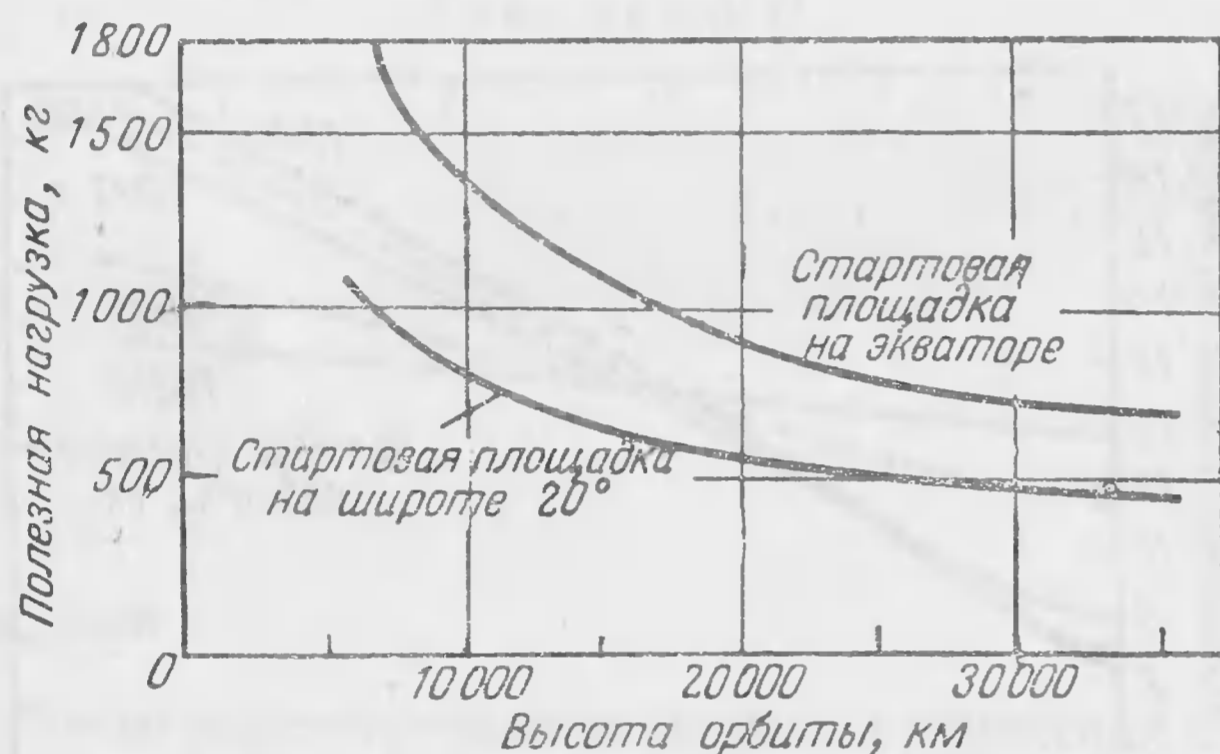
легко определяется при помощи параметра «идеальной скорости» V_i , выражаемой уравнением

$$V_i = V_{\text{взл}} + V_{\text{рег}} + V_{\text{грав}} - V_{\text{вращ}}. \quad (1)$$

Основными членами этого уравнения являются скорость взлета $V_{\text{взл}}$, требуемая для достижения орбиты заданной высоты, и скорость регулирования $V_{\text{рег}}$, необходимая для сохранения параметров орбиты. Сумма этих членов представлена на фиг. 1 для различных значений высот орбит и для стартовых площадок, находящихся как в плоскости орбиты, так и вне ее.

Например, сравнивая стационарный ИСЗ с ИСЗ, находящимся на орбите высотой 11 100 км, можно видеть, что

для стационарного ИСЗ требуется идеальная скорость порядка $11\,750\text{ м/сек}$, в то время как для более низкой орбиты эта величина составляет $10\,700\text{ м/сек}$. Если стартовая площадка расположена вне плоскости орбиты, то эти скорости должны быть еще больше. Это имело бы место в случае, если бы с мыса Кеннеди ИСЗ запускались на экваториальные орбиты. При этом для запуска стационарного ИСЗ потребовались бы скорости порядка $12\,200\text{ м/сек}$, в то время



Фиг. 2.

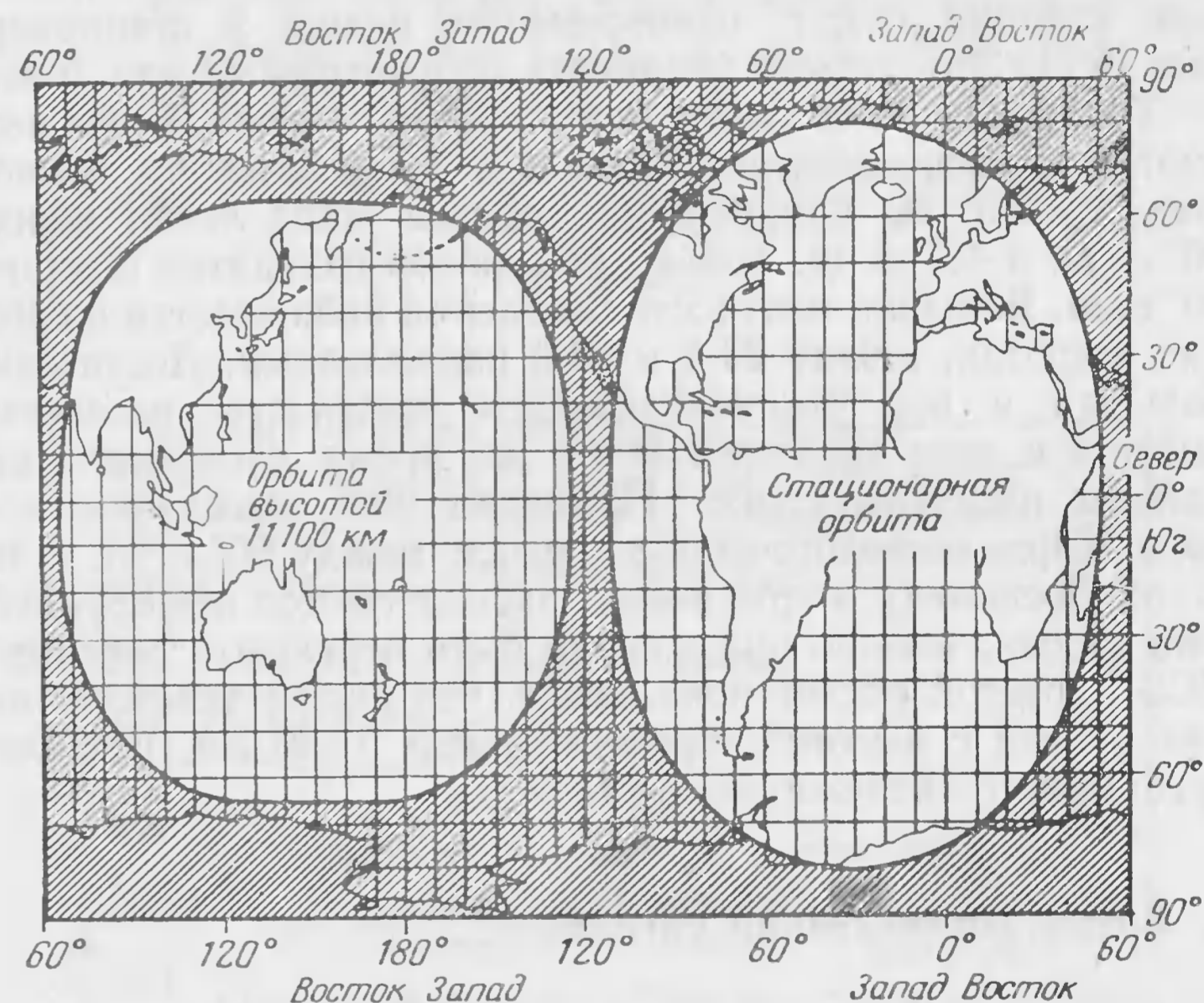
как для ИСЗ с высотой орбиты в $11\,100\text{ км}$ требуемая скорость составляла бы $11\,600\text{ м/сек}$.

Вследствие того что скорость, необходимая для выведения на орбиту стационарного ИСЗ, больше, для него при заданной полезной нагрузке потребуется ракета большей мощности, чем для вывода ИСЗ на более низкую орбиту. С другой стороны, ракета определенной мощности может вывести на стационарную орбиту меньшую полезную нагрузку. Это видно из фиг. 2, на которой представлена зависимость полезной нагрузки от высоты орбиты для гипотетической ракеты со стартовым весом $\sim 137\,000\text{ кг}$, в которой в качестве горючего для первых ступеней используется жидкий кислород и керосин, а для последней ступени — водород и кислород. Запуск ИСЗ со стартовой площадки, расположенной на экваторе, на стационарную орбиту приводит к снижению полезной нагрузки приблизительно

с $1\,100\text{ кг}$ при высоте орбиты $11\,100\text{ км}$ до 780 кг . Запуск ИСЗ с мыса Кеннеди привел бы к большему снижению веса полезной нагрузки, которая составила бы примерно 460 кг для стационарной орбиты и $\sim 700\text{ кг}$ для орбиты высотой $11\,100\text{ км}$.

3. Зона перекрытия

Благодаря большой высоте орбиты стационарного ИСЗ он может перекрывать большую зону земной поверхности



Фиг. 3.

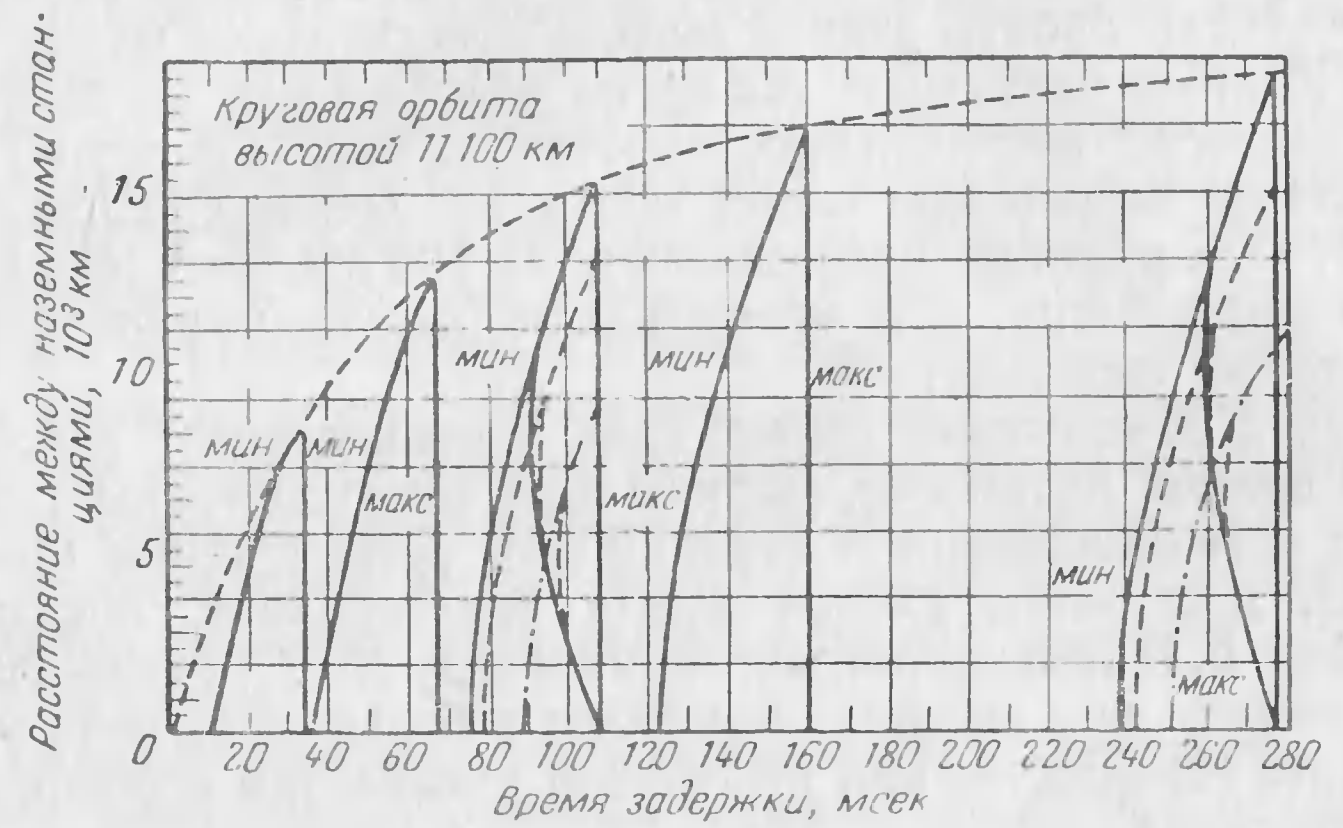
чем ИСЗ, находящиеся на меньших высотах. Из сравнения зон перекрытия системы из 10 ИСЗ, находящихся на орбите высотой $11\,100\text{ км}$, и системы из трех стационарных ИСЗ видно, что для стационарной орбиты зона перекрытия значительно больше, поскольку в этом случае она простирается до $81,5^\circ$ широты по сравнению с 68° для орбиты высотой $11\,100\text{ км}$.

Эта разница в степени перекрытия, показанная на фиг.3., определяет также зону, которую можно обслужить при помощи одной наземной станции в системе ретрансляционной связи. Эффективность ретрансляции для стационарного ИСЗ не зависит от местоположения наземной станции, в то время как при более низких орбитах она уменьшается по мере того, как станция удаляется от экватора. Несколько большее перекрытие в направлении запад — восток для орбиты с высотой 11 000 км получается за счет следящей антенны. Следует заметить также, что из некоторых наземных станций будут одновременно видны 2 стационарных ИСЗ. Это должно увеличить перекрытие в два раза.

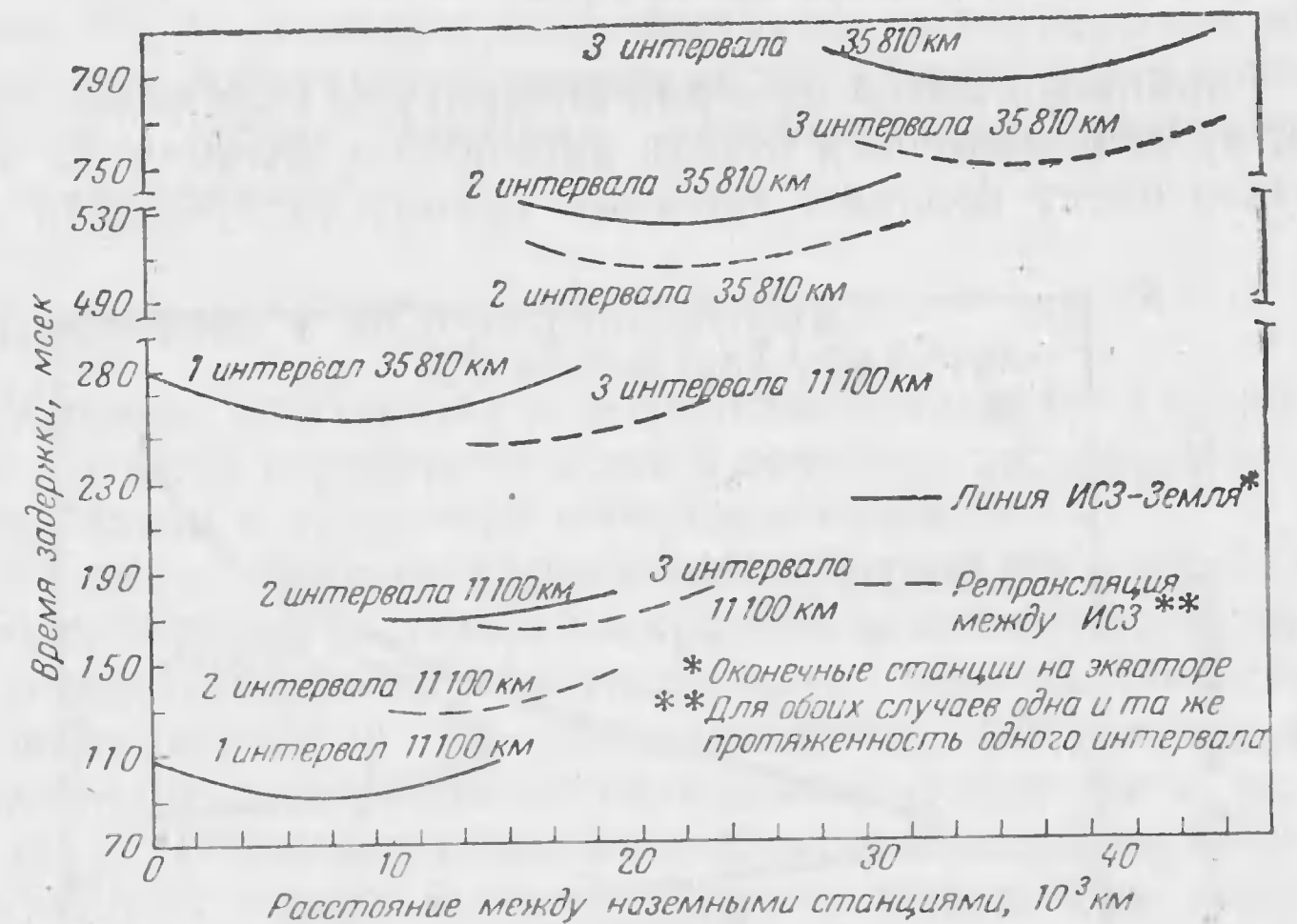
Требуемая зона связи может быть найдена, если рассмотреть распределение городов и населения на земной поверхности. 50 крупнейших городов мира лежат между 60° с. ш. и 40° ю. ш. Только 13 городов находятся севернее 40° с. ш. Большая плотность населения наблюдается в средних широтах, между 20-й и 50-й параллелями. Достаточно большая и все увеличивающаяся плотность населения имеется в зоне экватора. В то же время субарктические районы населены слабо. Примерно 98% населения земного шара сосредоточено в полосе между 60° с. ш. и 40° ю. ш. Поскольку в этой полосе располагаются все крупнейшие города, именно она должна быть перекрыта связными ИСЗ. Простой расчет показывает, что любая экваториальная орбита с высотой, превосходящей 9 650 км, позволит организовать надежную связь.

4. Время запаздывания сигнала

Время, необходимое для того, чтобы сигнал от одной наземной станции достиг другой наземной станции, пройдя через ретрансляционный ИСЗ, показано на фиг. 4 для нескольких орбит с разными высотами, причем отмечены максимальное и минимальное запаздывания. Для стационарной системы время запаздывания представляет собой величину, которая изменяется от одной наземной станции к другой. Для других систем запаздывание будет колебаться вокруг некоторой средней величины, достигая в худшем случае минимальных и максимальных возможных значений. Мож-



Фиг. 4.



Фиг. 5.

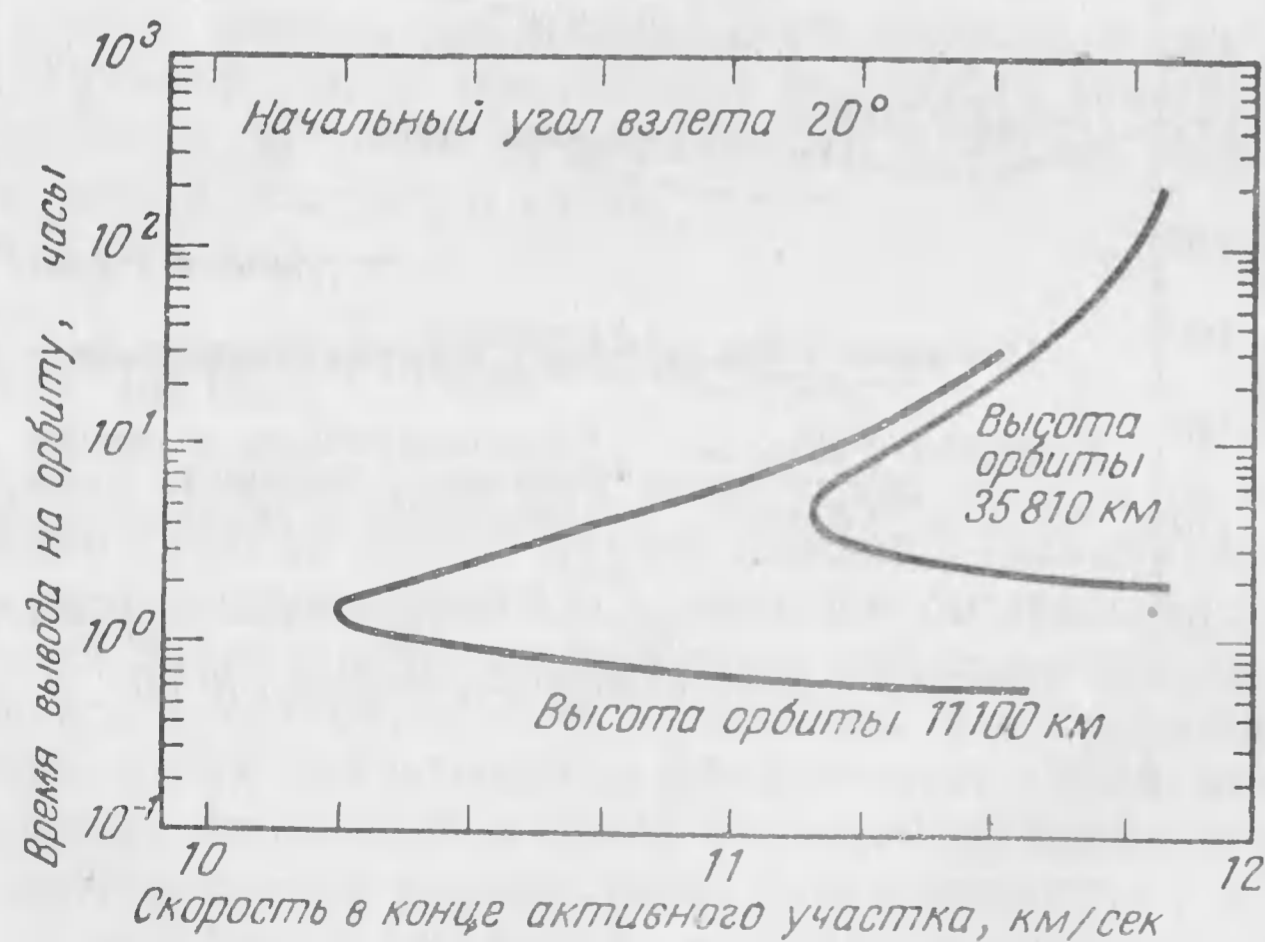
но заметить, однако, что общие изменения времени запаздывания для орбиты данной высоты относительно малы.

Кривые указывают также на возможность увеличения перекрытия при больших высотах орбит. Примерно до 4 800 км перекрытие растет почти так же, как запаздывание. При высотах, превышающих 11 100 км, рост перекрытия замедляется, в то время как запаздывание продолжает расти по-прежнему.

Для обеспечения перекрытия, превышающего расстояние прямой видимости, должны быть предусмотрены наземные ретрансляционные станции или ретрансляции между ИСЗ. Для этого случая время запаздывания показано на фиг. 5. Взаимная ретрансляция между ИСЗ, находящимися на меньших высотах, позволяет в большей степени увеличить перекрытие при небольшом увеличении времени запаздывания.

5. Сроки замены ИСЗ на орбите

Внезапный выход из строя аппаратуры ИСЗ может произойти, например, при отказе источников питания. В этом случае имеет большое значение время, требующееся для



Фиг. 6.

замены одного ИСЗ. Время, необходимое для выведения спутника на орбиты с высотой 11 100 и 35 810 км, представлено на фиг. 6, из которой видно, что при минимальной энергии, необходимой для запуска полезной нагрузки с максимальным весом до вывода на орбиту стационарного спутника, требуется ~5 час, что почти в 3 раза больше, чем для орбит с меньшей высотой. Время выведения на орбиту может быть несколько уменьшено при использовании более высоких скоростей в конце активного участка траектории, но получаемый при этом выигрыш относительно мал, если не используются весьма высокие скорости. Это обстоятельство, конечно, значительно снижает величину полезной нагрузки.

Отказ аппаратуры стационарного ИСЗ, безусловно, вызовет довольно длительный перерыв связи. На меньших высотах этого перерыва может не быть в тех случаях, когда ИСЗ расположены по кольцу, так как замена ИСЗ будет происходить автоматически. Перерыв, вызванный повреждением ИСЗ, уменьшит зону постоянного перекрытия или приведет к коротким перерывам связи. Однако этого можно избежать путем введения дополнительных ретрансляционных участков.

6. Требования к ИСЗ-ретрансляторам

Основные требования к ретрансляционным ИСЗ следующие: большое перекрытие земной поверхности, высокое качество связи и отсутствие перерывов связи.

Вопрос о зонах перекрытия рассматривался выше. Поскольку большая часть международных связей осуществляется между районами с высокоразвитой промышленностью и особенно между городами, оконечные обслуживаемые пункты обычно располагаются в полосе между 60° с. ш. и 40° ю. ш. Поэтому удовлетворительное перекрытие земной поверхности может быть достигнуто посредством вывода ИСЗ на любую экваториальную орбиту высотой около 10 000 км. (Необходимое перекрытие можно обеспечить также при помощи нескольких ИСЗ с полярными орбитами высотой порядка 6 500 км.) Эффект «выпадения» ИСЗ также рассмотрен выше. При использовании стационарной орбиты выпадение ИСЗ неизбежно приведет к перерыву

связи, если только примерно в одном и том же месте не будут помещены два ИСЗ. Это не обязательно справедливо на меньших высотах при условии использования соответствующих наземных ретрансляционных станций.

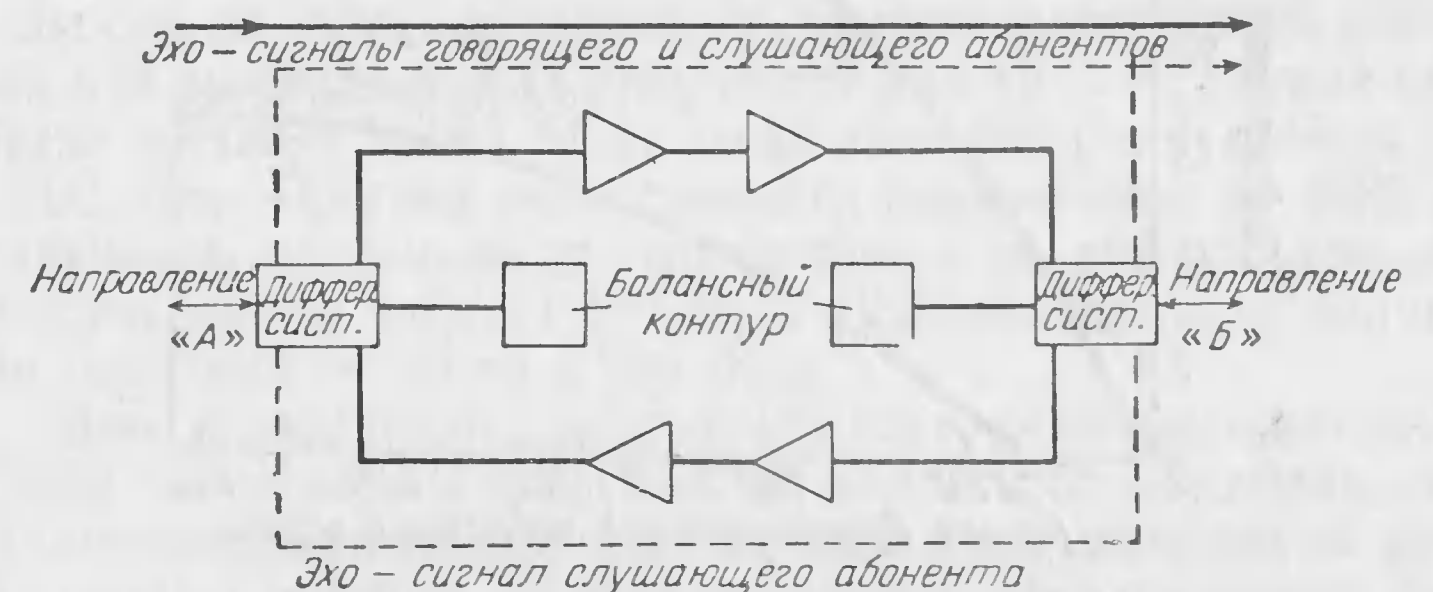
7. Влияние орбит на качество связи

Параметрами, которые, безусловно, имеют значение при выборе орбит и которые могут оказать влияние на качество связи, являются только время запаздывания и его изменения. Для телеграфной связи наиболее важно изменение времени запаздывания. Современные телеграфные системы основаны на применении корректирующих кодов. Внезапное изменение времени запаздывания приведет к пропуску знака или одновременному приему двух знаков. В любом случае передача будет прервана до тех пор, пока ошибка не будет исправлена.

Подобные изменения времени запаздывания не будут иметь места в случае использования стационарных ИСЗ при условии надлежащей стабилизации их положения. Этого также легко избежать при использовании орбит с другими высотами путем передачи потока информации от одного ИСЗ к другому в том случае, когда время запаздывания для нового ИСЗ становится равным времени запаздывания для старого спутника. При этом очевидно, что для телеграфной связи будет пригодна любая орбита. При телефонной связи изменение времени запаздывания имеет меньшее значение, поскольку запаздывание на время до 35 мсек почти не заметно. Все же запаздывание само по себе неприятно, а действуя совместно с другими факторами, оно может стать серьезной помехой.

Чтобы убедиться в этом, рассмотрим схему приема и передачи, показанную на фиг. 7. Здесь, как обычно, телефон имеет двухпроводный выход. Для разделения сигналов на 2 канала передачи используется применяемая в дальней связи дифференциальная схема соединений. Поскольку такие дифференциальные схемы несовершенны, часть энергии, принимаемой слушающим абонентом, возвращается к говорящему. Таким образом, часть этой отраженной энергии проходит через дифференциальную систему говорящего, так что он сам и слушающий его абонент принимают эхо-

сигналы. Эхо, воспринимаемое слушающим абонентом, конечно, слабее, так как оно ослаблено дважды. Интересно, что говорящий абонент более всего подвержен воздействию эха, которое может вынудить его замедлить свою речь, начать запинаться или даже замолчать. Интенсивность этого эффекта зависит от интенсивности эхо-сигнала и времени запаздывания. На фиг. 8 показаны рекомендованные Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (МККТТ) величины допустимой интенсивности

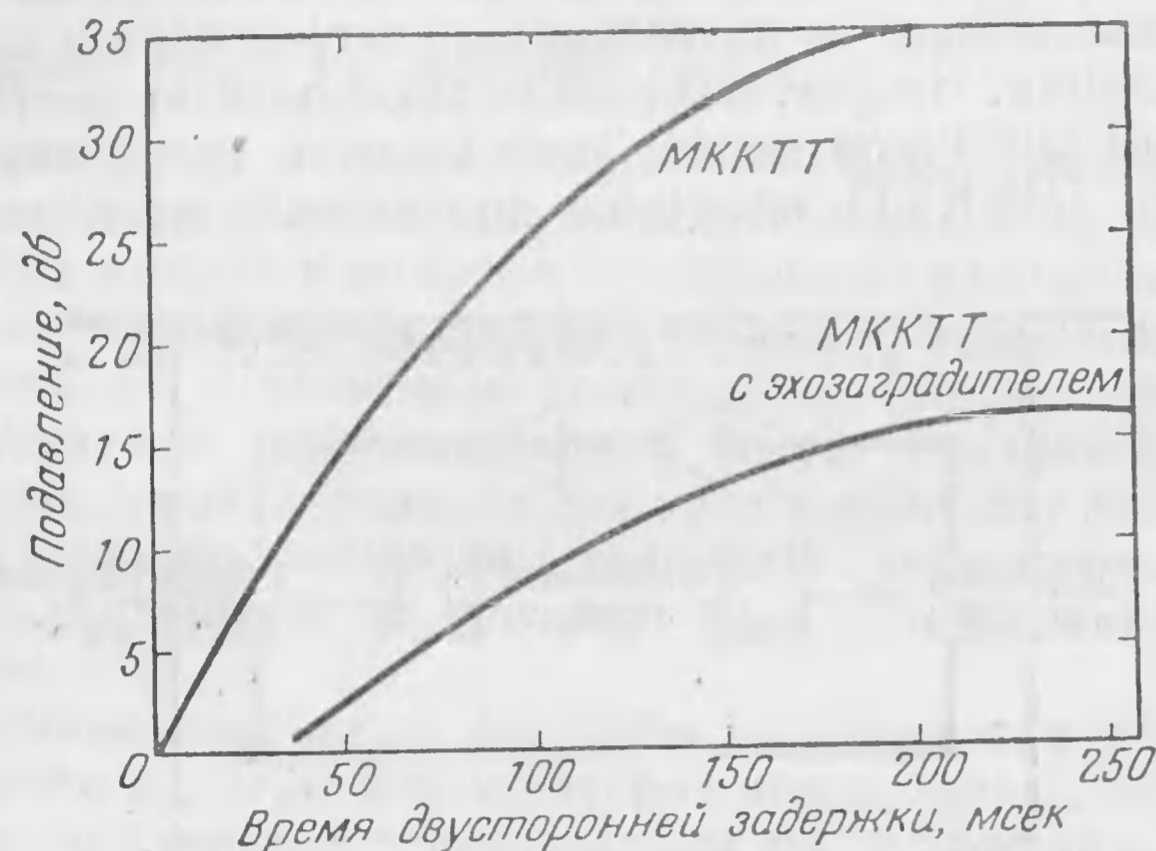


Фиг. 7.

эхо-сигнала в зависимости от времени запаздывания. Здесь представлены два случая. Верхняя кривая относится к схеме, изображенной на фиг. 7. На нижней кривой представлена допустимая интенсивность эхо-сигнала при использовании подавляющих устройств. Обычное подавляющее устройство замыкает накоротко одну цепь, в то время как по другой передается речь. Очевидно, что такие подавители обеспечивают значительное увеличение допустимой интенсивности эхо-сигнала. Однако при использовании таких устройств возникают дополнительные трудности, связанные с полным прекращением связи, которое происходит в случае, если оба абонента пытаются говорить одновременно. В этом случае обе цепи оказываются замкнутыми накоротко и сообщение передаваться не будет.

Проблемы, связанные с временем запаздывания, эхо-сигналами и полными прекращением связи, известны давно. Впервые с этими проблемами встретились при использовании нагруженных воздушных проводных линий

с малой скоростью распространения электромагнитной энергии. Современные СВЧ радиорелейные линии почти свободны от этих явлений. При использовании ИСЗ эта проблема возникает снова вследствие большой протяженности трасс.



Фиг. 8.

В настоящее время в этой области проводятся широкие исследования. Так, например, компания «Американ телефон энд телеграф компани» в своем ответе Федеральной комиссии связи сообщила, что по предварительным данным время двухстороннего запаздывания 0,6 сек уже весьма нежелательно, а запаздывание, равное 1 сек, совершенно недопустимо. Возможно, что в области техники подавления эхо-сигналов будут сделаны значительные усовершенствования, что позволит использовать ИСЗ на более высоких орбитах. Однако при используемом в настоящее время оборудовании высоты орбит порядка 9 560 км являются, по-видимому, максимальными, позволяющими еще обеспечить высококачественную телефонную связь.

8. Влияние высоты на выбор частот

В среднем один стационарный ИСЗ может обслужить в три раза больше наземных станций по сравнению с системой из 10 ИСЗ, находящихся на орбитах высотой ~10 000 км.

Так как наземные станции, работающие с одним ИСЗ, будут, по-видимому, использовать разные частоты, то полоса частот, занимаемая системой стационарных ИСЗ, будет больше, чем занимаемая системой ИСЗ на орбитах меньшей высоты.

Однако вследствие неравномерного распределения возможных абонентов по земному шару максимальное число станций, обслуживаемых стационарным ИСЗ, только в два раза превышает число наземных станций, обслуживаемых ИСЗ на низких орбитах, и поэтому требуется примерно в два раза большая полоса частот. До 1970 г. это обстоятельство не будет, по-видимому, играть существенной роли, так как необходимая полоса частот для ИСЗ на низких орбитах составит ~500 Мгц, а для стационарной орбиты — 1 000 Мгц. Прогноз интенсивности радиообмена на 1980 г. указывает, однако, на то, что система с низкой орбитой потребует полосу частот 1 500 Мгц, а система со стационарными орбитами — около 3 000 Мгц.

Вполне возможно распределить частоты между системами связи, использующими ИСЗ, и наземными службами, но дополнительная полоса частот, требуемая системой со стационарной орбитой, усложняет задачу. Отсюда можно сделать вывод, что системы с ближними орбитами с этой точки зрения являются более приемлемыми.

9. Общий вывод по ретрансляционным ИСЗ

Из приведенного выше краткого анализа можно заключить, что для ретрансляции сообщений между различными пунктами земной поверхности стационарные ИСЗ менее выгодны, чем ИСЗ с менее высокими орбитами, и что на практике стационарный ИСЗ не может обеспечить удовлетворительной связи. Такой ИСЗ неизбежно займет большую часть имеющегося спектра частот. Перерывы связи будут более длительными. Для обслуживания определенной территории потребовались бы более мощные ракеты. Наконец, нам представляется, что время запаздывания сигналов будет слишком большим, вследствие чего не может быть обеспечено удовлетворительное качество связи. Хотя при дальнейших разработках качество связи может быть улучшено, остальные перечисленные недостатки все же остаются. Исходя из этого, следует заключить, что ретрансляционная

связь через ИСЗ должна осуществляться с использованием более низких орбитальных высот. Высоты около 11 100 км следует считать оптимальными с точки зрения зон перекрытия и характеристик системы.

10. Использование стационарного ИСЗ для радиовещания

При использовании ИСЗ для радиовещания главными факторами являются качество обслуживания слушателей и стоимость этого обслуживания. Представим себе, например, что 100 млн. человек желают принимать передачи ИСЗ. Это примерно равно числу телевизоров, имеющих во всем мире в настоящее время. Если бы расходы на специальное оборудование составляли 10 долл. на каждого радиослушателя, то капиталовложения, которые можно было бы сделать за счет массы радиослушателей, составили бы крупную сумму в 1 млрд. долл. Чтобы ограничить эти капиталовложения разумным уровнем, радиовещательный ИСЗ должен работать совместно с современной типовой приемной аппаратурой. Это означает, что радиовещательные передачи с ИСЗ должны иметь стандартные характеристики с уровнями, типичными для современных систем, при которых могут применяться стандартные антенны. По соображениям стоимости следящие антенны оказываются неприемлемыми. В результате приходим к выводу, что радиовещательная система с применением ИСЗ должна базироваться на использовании стационарной орбиты.

Для оценки возможностей радиовещания рассмотрим одну из возможных систем. Поскольку телевизионное вещание является наиболее сложным, для примера выбран этот тип вещания. Ниже будут показаны некоторые возможности создания менее сложных систем вещания.

11. Телевизионный передатчик

Требуемую мощность бортового телевизионного передатчика проще всего рассчитать, определив энергию на единицу площади, необходимую для обеспечения определенного уровня сигнала, и умножив эту величину на всю площадь, перекрываемую вещанием с ИСЗ.

В табл. 1 приведены значения мощности передатчика, требуемой для трех стандартных категорий телевизионных сигналов, принятых в США. В таблице приведены величины, рассчитанные для полной зоны перекрытия стационарного ИСЗ, и значения площадей, которые могут быть перекрыты вещанием, если мощность передатчика ограничивается величиной 50 квт.

Таблица 1

Мощность передатчика и зоны обслуживания телевизионным вещанием

Категория качества вещания	Уровень сигнала, мкв/м	Мощность для перекрытия зоны видимости, квт	Зона обслуживания при передатчике мощностью 50 квт. кв. км
Высшая	5 010	14 400	$0,74 \cdot 10^6$
А	2 510	3 600	$3,0 \cdot 10^6$
В	224	35	$374 \cdot 10^6$

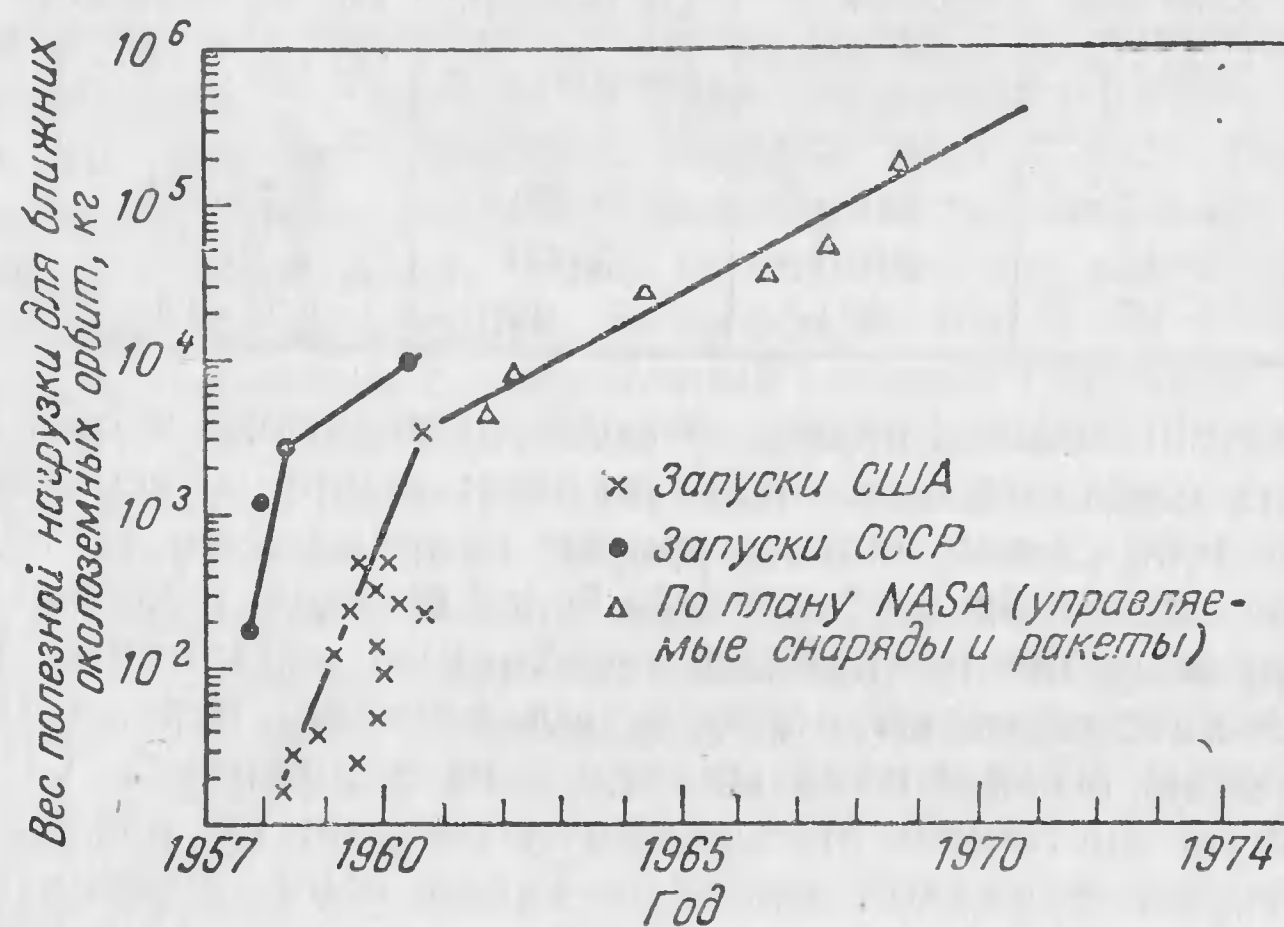
Из этой таблицы видно, что один передатчик может обслужить вещанием всю видимую часть земной поверхности только при самом низком уровне принимаемого сигнала. Там, где желательно обеспечить более высокое качество вещания, зону обслуживания необходимо ограничить. Вещание категории «А» при использовании передатчика мощностью 50 квт охватывает часть территории США, лежащую восточнее Миссисипи и равную по размерам территории Западной Европы. Такая зона перекрытия представляется достаточной. Она имеет преимущество, заключающееся в ограничении зоны обслуживания двумя временными поясами. Это желательно с точки зрения удобства планирования программ в часы прямой видимости ИСЗ.

Поскольку основное преимущество радиовещательных ИСЗ состоит в возможности перекрытия всей земной поверхности, то представляется целесообразным оборудовать ИСЗ несколькими передатчиками. Один или два из них должны использоваться для обслуживания видимой части земной поверхности. Один или более дополнительных передатчиков должны обеспечивать обслуживание ограниченных районов с высокой плотностью

населения. В опытных образцах ИСЗ можно использовать любой из методов, но, по-видимому, на первых порах следует предпочесть обслуживание вещанием больших площадей.

12. Перспективы телевизионного вещания с помощью ИСЗ

Передатчики мощностью 50 кВт не могут быть миниатюрными, и, кроме того, потребляемая ими мощность велика. Ввиду этого телевизионное вещание не может быть реализовано с использованием малых ракет. Перспективы внедрения телевизионного вещания с помощью ИСЗ по годам



Фиг. 9.

представлены на фиг. 9 и 10. На них приведены современные данные о весах полезных нагрузок и мощности источников питания космических кораблей, а также прогноз на будущее, исходящий из постоянства процента прироста. Предполагается, что передатчик мощностью 50 кВт будет весить 4 500 кг, а суммарная мощность первичных источников питания ИСЗ должна составить ~ 400 кВт, включая потребности передатчиков звукового сопровождения. Предполагается, что один 50 кВт передатчик может быть установлен на ИСЗ примерно через 7 лет. Система с несколькими передатчиками может появиться в период 1970—1975 гг. Это по-

казывает, что телевизионный ИСЗ не является делом сегодняшнего дня. Однако период в 10 лет практически невелик. Это значит, что если мы намерены ввести такую систему тогда, когда уровень техники это позволит, то уже



Фиг. 10.

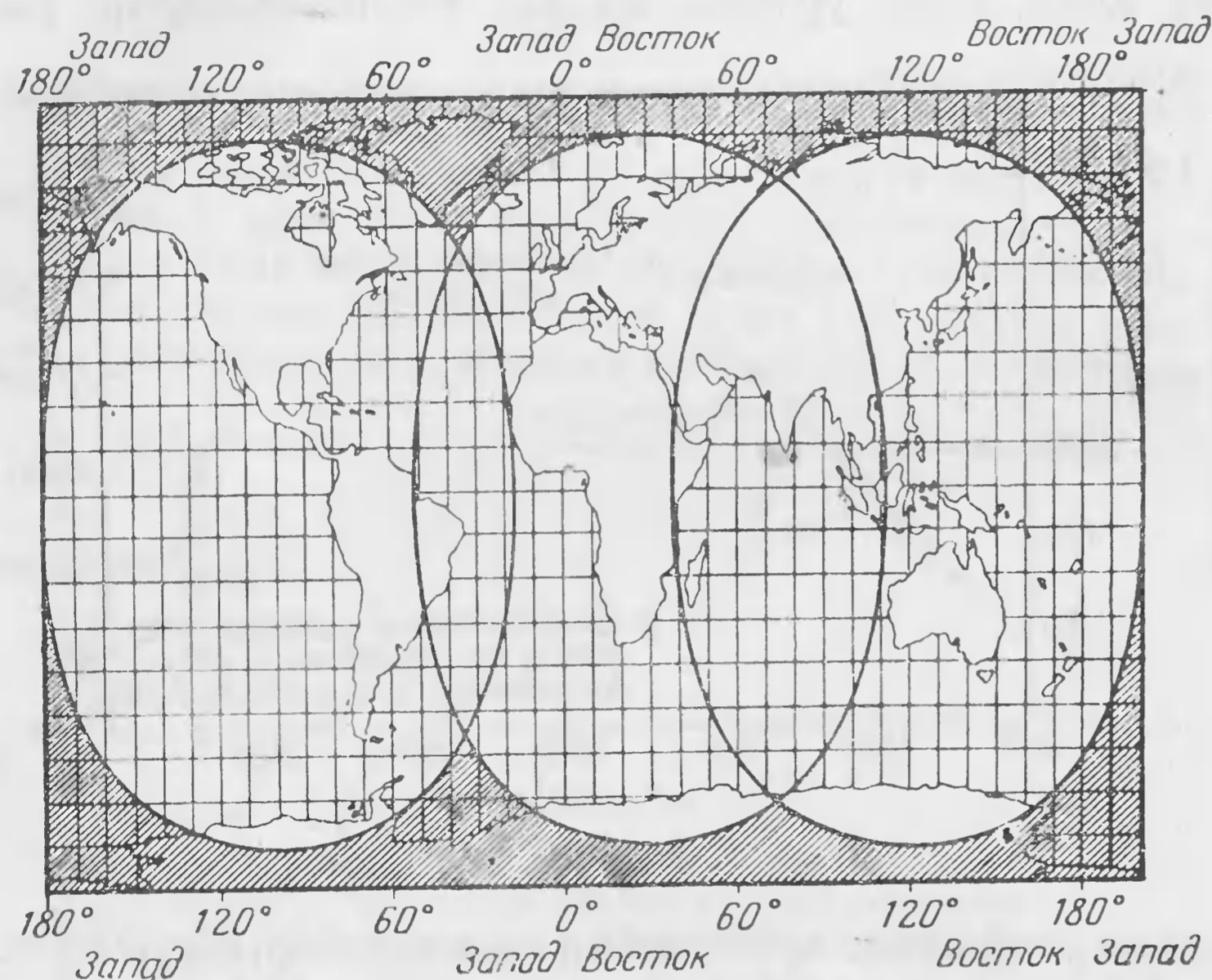
сейчас необходимо приступить к исследованию, обсуждению и планированию этой системы.

13. Некоторые вопросы, подлежащие изучению

Заманчивая возможность осуществления всемирного телевизионного вещания может быть реализована проще всего при помощи системы из трех ИСЗ, каждый из которых обслуживает отведенную ему зону. Анализ размещения материков и населения показывает, что ИСЗ не должны находиться на равных расстояниях и что наилучшего перекрытия земной поверхности можно достичь, если ИСЗ будут находиться над меридианами 100° з. д., 30° в. д. и 120° в. д. Получающееся при этом распределение зон обслуживания показано на фиг. 11.

Высококачественное вещание следует ограничить, по-видимому, областями с развитой промышленностью, расположенными в умеренных широтах. На фиг. 12 показано

возможное распределение зон обслуживания, обеспечиваемое с помощью трех передатчиков для США, трех для Южной Америки и т. д. Такое распределение предложено для

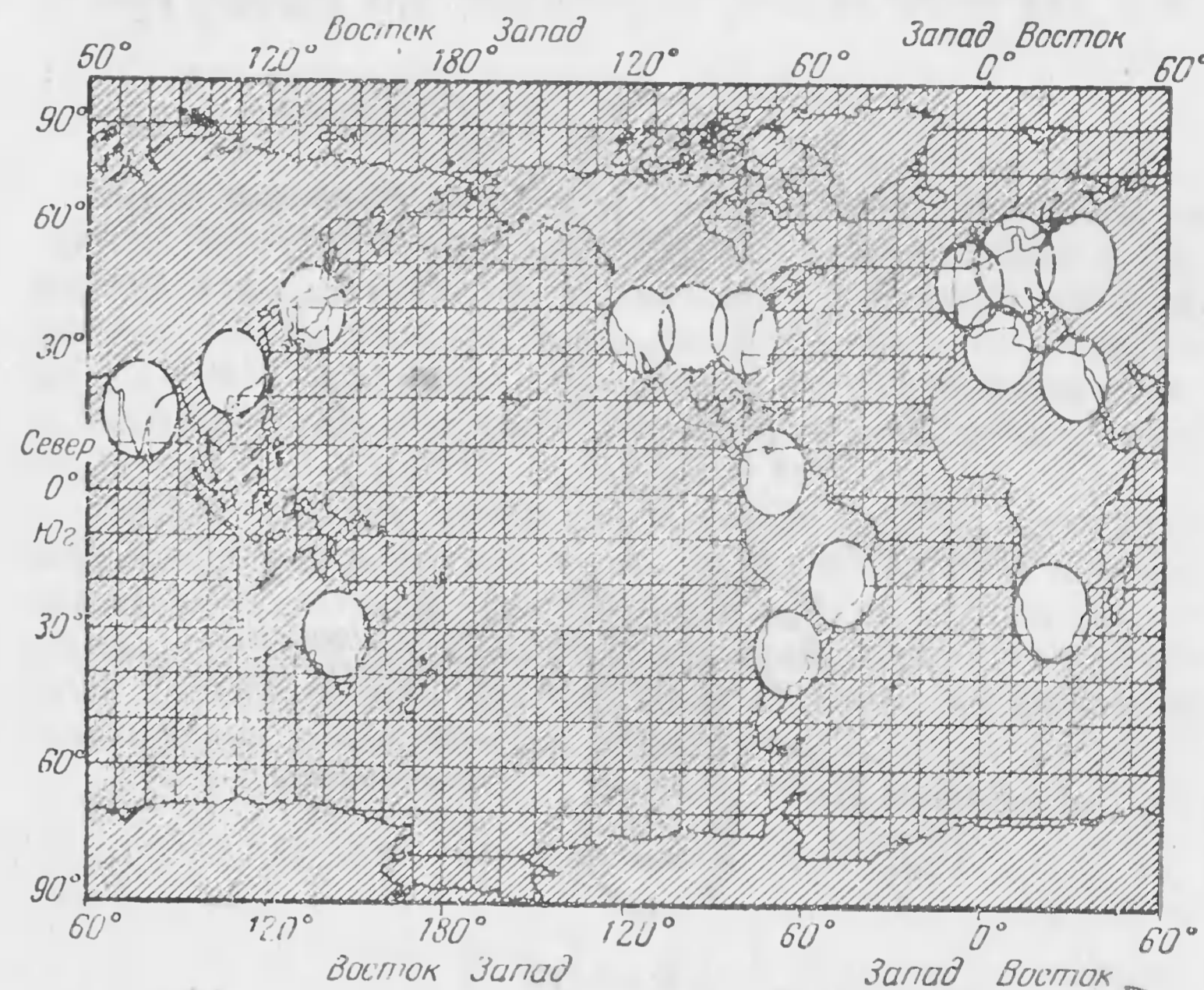


Фиг. 11.

изучения вопроса. Окончательное распределение зон обслуживания должно быть установлено с учетом плотности распределения телевизоров и местных интересов.

Желательно принять систему из трех ИСЗ в качестве типовой. Каждый ИСЗ будет содержать 2 канала для обслуживания отведенной ему зоны и 6 каналов для ограниченных районов. Соответствующие антенны должны быть стабилизированы по отношению к Земле. Так как космические корабли соответствующих размеров, несомненно, будут обслуживаться людьми (что обеспечит меньшие расходы и больший срок эксплуатации), было бы желательно создать искусственное поле тяготения, используя вращение ИСЗ. В этом случае достигается естественная ориентация ИСЗ, при которой его ось вращения параллельна земной оси,

а антенны расположены на концах оси ИСЗ. Антенны, вероятно, могут быть выполнены в виде больших параболоидов размерами 60×90 м каждый для обслуживания ограниченных участков территорий в средних широтах и в виде



Фиг. 12.

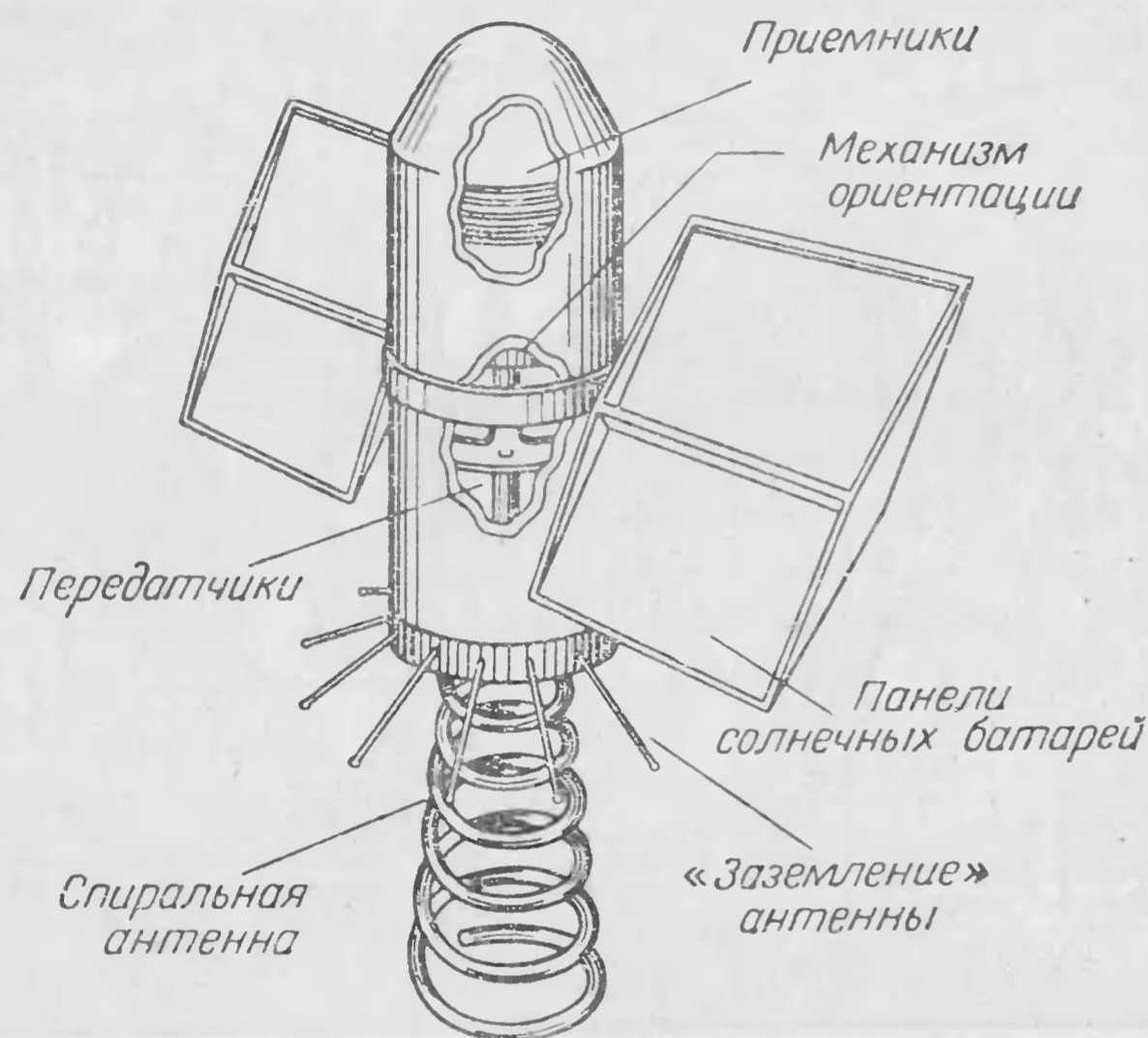
малых антенн — для общего перекрытия земной поверхности и приема сигналов, передаваемых с наземных станций.

Жизненно важная аппаратура могла бы размещаться в центральной тороидальной части корабля. Наиболее вероятное значение рабочей частоты будет, по-видимому, порядка 500 Мгц.

14. Более простые виды радиовещания

Из приведенных выше рассуждений следует, что осуществление системы глобального телевизионного вещания является чрезвычайно сложной задачей. Это значит, что кос-

мическое радиовещание должно начаться с более простых видов. Вероятно, наилучшим видом такого вещания была бы высококачественная передача речи и музыки с использованием частотной модуляции. Некоторые расчеты, выполненные для этого случая, показывают, что высокое качество



Фиг. 13.

передачи может быть обеспечено при мощности передатчика на ИСЗ, равной $\sim 1\,500\text{ вт}$, и при общем весе полезной нагрузки $\sim 225\text{ кг}$. Из фиг. 11 и 12 видно, что это достижимо при современном уровне техники.

На фиг. 13 показан эскиз ИСЗ, предназначенного для радиовещания, с панелями солнечных батарей. ИСЗ стабилизируется так, чтобы его вертикальная ось была направлена к центру Земли. Вращение вокруг этой оси и наклон панелей применяются для наиболее эффективного использования солнечной энергии. Спиральная антенна применена для устранения влияния вращения корабля на величину сигнала. Вслед за этим опытным ИСЗ может быть запущен опытный автоматический телевизионный ИСЗ с одним каналом, пред-

назначенным для перекрытия больших территорий. Запуск такого ИСЗ мог бы быть осуществлен в 1968—1970 гг. Большая многоканальная система с экипажем могла бы последовать за ним примерно через 10 лет.

15. Сводка основных факторов, влияющих на космическое радиовещание

Возможность организации космического радиовещания зависит от четырех факторов. Первым из них является техническая проблема осуществления высококачественного радиовещания из космоса. Выше было указано, что радиовещание с ЧМ может быть осуществлено в кратчайший срок, а опытное одноканальное телевизионное вещание через 5—10 лет.

Вторая проблема сводится к несовместимости, возникающей вследствие различий в стандартах сигналов и в типах приемников, а также вследствие изменений частот, предоставленных для космического вещания. Сложность проблемы можно видеть из табл. 2, в которой представлены современные телевизионные стандарты.

Таблица 2

Современные телевизионные стандарты

Страна	Число строк	Частота кадров, гц	Общая ширина полосы, Мгц	Разность между частотами звукового и видеосигналов, Мгц	Модуляция канала звукового сопровождения
Австрия	625	50	7	5,5	ЧМ
Бельгия	625	50	7	5,5	АМ
Франция	819	50	14	11,15	ЧМ
Великобритания	405	50	5	3,5	АМ
США	525	60	6	4,5	ЧМ
Новая рекомендация МККР	625	50	8	6,5	ЧМ

Очевидно, было бы желательным иметь единый стандарт, но возможно использование двух или трех стандартов —

по одному для каждой зоны, обслуживаемой системой из трех ИСЗ.

Третьей проблемой является учет различий в привычках и обычаях населения различных районов мира, а также политических и идеологических расхождений. В некоторой степени эта проблема облегчается наличием трех отдельных ИСЗ, однако здесь придется еще преодолеть много трудностей.

Последней проблемой является проблема языка. По-видимому, одним из рациональных подходов к этой проблеме является предоставление дел естественному ходу событий, хотя при создании глобальной системы вещания, возможно, появится тенденция к выработке некоторого общего языка.

16. Система радиовещания через ИСЗ и существующие методы связи

Радиовещание с помощью ИСЗ характеризуется прежде всего охватом больших территорий, простирающихся от части континента до поверхности земного полушария. Хотя обслуживание меньших площадей технически возможно, однако оно было бы экономически менее выгодным по сравнению с действующими в настоящее время системами, учитывая значительную стоимость ракет. По этой причине космическое радиовещание следует рассматривать как дополнение к существующим методам радиовещания.

6.

Искусственные спутники Земли, применяемые для связи¹

Мюллер Г., Хебенштрейт В., Шпенглер Э.

1. Введение

За последние годы значительно активизировались разработки в области систем связи с использованием искусственных спутников Земли (ИСЗ). Основной причиной этого является все более широкое признание следующих положений: 1) разработка системы связи с использованием ИСЗ технически осуществима; 2) эксплуатация такой системы экономически оправдана.

К системам связи с использованием ИСЗ предъявляются определенные коммерческие и военные требования, причем современная техника позволяет выполнить эти требования.

В основе технической осуществимости такой системы лежат следующие факторы:

1. В процессе изготовления баллистических ракет значительно усовершенствовалась технология их производства; достигнуто значительное улучшение их характеристик и повышение надежности.

¹ Mueller G. E., Hebenstreit W. B., Spengler E. R., Communications Satellites, Academic Press, Lnd.—N. Y., 1962, p. 131—183.

2. Приобретен опыт изготовления ИСЗ, их запусков в космическое пространство и связи с ними.

3. Пополнились сведения об окружающих условиях в космосе и об их влиянии на аппаратуру.

4. Разработаны электрические источники питания, преобразующие солнечную энергию или использующие ядерное или химическое топливо.

5. Созданы приемники со сверхнизким уровнем шумов.

6. Разработаны датчики и системы управления положением ИСЗ в пространстве.

7. Разработаны наземные станции сопровождения.

8. Изготовлены высокоскоростные электронные счетные машины для управления кратковременными быстро протекающими процессами.

По прогнозу компании «Америкен телефон энд телеграф компани» к 1980 г. будет необходимо иметь 12 000 двухсторонних телефонных трансокеанских каналов. Эта цифра выглядит очень внушительно по сравнению с 345 каналами, связывавшими США с заморскими территориями к середине 1960 г. Указанный прогноз основан на ожидаемом в течение ближайших 20 лет тридцатикратном увеличении числа трансокеанских телефонных переговоров, существенном увеличении числа международных абонентских и частных телеграфных линий, увеличении объема различной передаваемой информации и на возможном введении передач телевидения по закрытым линиям, а также развития телевизионного вещания. При этом очевидно, что реальные требования будут в большой степени зависеть от качества и стоимости обслуживания.

Непрерывно возрастают также потребности военных в линиях для передачи административных распоряжений и распоряжений по организации тыла и снабжения. Требования к таким линиям аналогичны требованиям к коммерческим линиям. Кроме этого, военным необходимы для проведения специфических военных операций системы, удовлетворяющие специальным требованиям. Особенно необходимы линии дальней связи (включая связь с подвижными станциями, например самолетными), в которых объем передаваемой информации сравнительно невелик, но сами сообщения весьма срочны и важны. Такие сообщения должны доходить до адресата даже во время боевых действий с при-

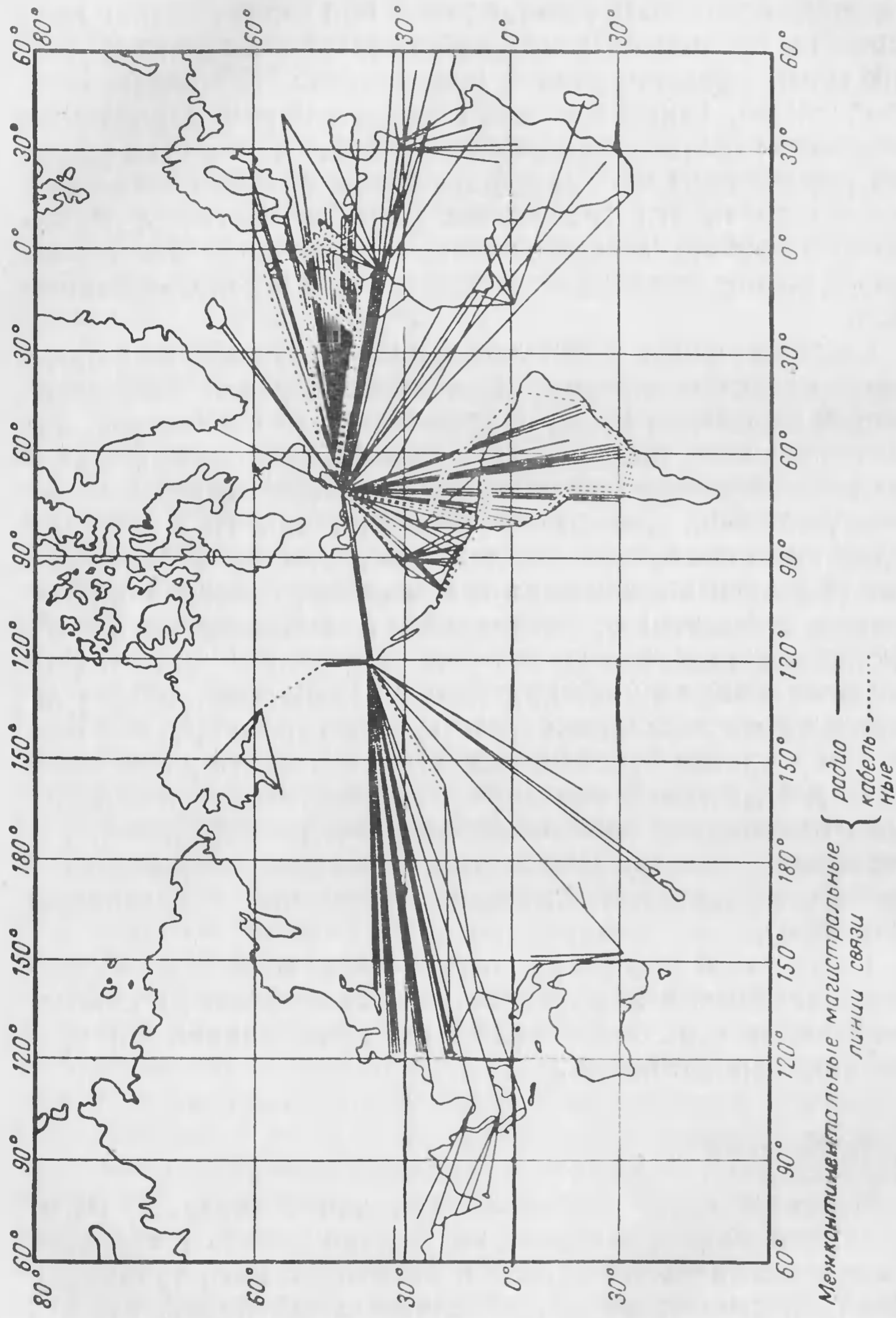
менением ядерного оружия, а также при использовании противником специальных мер, предназначенных для нарушения связи (создание помех, уничтожение ИСЗ и наземных комплексов). Таким образом, с одной стороны, существуют определенные требования к системе связи и, с другой стороны, разработаны методы и аппаратура, которые позволяют удовлетворять эти требования хотя бы частично. В настоящей работе мы рассмотрим важнейшие проблемы, возникающие при создании систем связи с использованием ИСЗ.

Система связи с использованием ИСЗ содержит большое количество сложных и сложным образом взаимосвязанных subsystem. Имеется большое число параметров, характеризующих такую систему (высота орбиты, ее форма и наклон, рабочая частота и ширина полосы, количество наземных установок, тип ракеты-носителя, тип ИСЗ и т. д.) и для каждой системы имеется конструкция, обеспечивающая (в результате изучения взаимосвязей и выбора определенных subsystem) ее оптимальное функционирование. Во многих случаях выбор системы необходимо производить с учетом всех технических данных (например, можно ли использовать имеющиеся частоты совместно с другими системами и какова будет надежность и стоимость ракет через 5—10 лет), а также неполных и умозрительных соображений относительно требований потребителя (например, какое время ожидания можно будет допустить и сколько потребитель будет платить за обслуживание с различным качеством).

Более узкой задачей настоящей статьи является рассмотрение основных вопросов конструкции системы, их взаимозависимости и их связи с рабочими требованиями или требованиями потребителя.

2. Требования

Существуют три основных типа линий связи: 1) магистральные линии, большое количество которых сходится в одном центральном пункте и по общему магистральному каналу поступает на другой центральный пункт, где эти линии снова разветвляются и направляются к абонентам; 2) линии связи между основным центром связи и движущи-



Ф и г. 1. Межконтинентальные магистральные линии связи, используемые Соединенными Штатами.

Таблица 1
Существующая в настоящее время и ожидаемая нагрузка трансокеанских линий связи

Оконечные пункты США	Тысячи телефонных переговоров		Тысячи телеграфных сообщений		Тысячи минут работы абонентского телеграфа		Тысячи минут работы фото-телеграфа		Количество телевизионных линий	
	1958	1970	1958	1970	1958	1970	1958	1970	1958	1970
Районы земного шара с другими конечными пунктами										
Западная Европа	424	4500	4550	5100	875	5000	1600	4800	—	1
Центральная Европа	254	2500	2870	3350	300	2100	600	1800	—	—
Восточная Европа	2	20	27	40	—	50	40	100	—	—
Скандинавия	42	420	490	580	75	400	160	500	—	—
Средний Восток	18	250	228	375	—	250	35	150	—	—
Африка	2	50	28	350	—	225	—	100	—	—
Азия	12	180	140	600	—	325	25	120	—	—
Район Тихого океана	262	2600	3053	3500	515	2800	1100	4000	—	1
Южная часть Тихого океана	17	250	191	330	—	400	95	2000	—	—
Азия	125	1250	1430	3800	—	3000	140	2000	—	1
Индонезия	24	360	270	465	—	300	25	130	—	—
Центральная Америка	82	820	965	1150	35	850	80	750	—	—
Вест-Индия	917	5000	10 550	11 500	1200	4900	2000	3250	—	1
Север Южной Америки	93	1000	1148	2200	—	1200	75	800	—	1
Юг Южной Америки	79	800	935	1660	—	800	25	500	—	—
Всего	2353	20 000	26 875	35 000	3000	22 600	6000	21 000	—	6
Эквивалентная средняя полоса на ИСЗ (3 ИСЗ), кгц	—	150	—	2	—	200	—	200	—	10 000

мися объектами, например самолетами или кораблями; 3) линии связи между движущимися объектами, например между отдельными самолетами или кораблями. Большинство коммерческих связей осуществляется по линиям первого типа и требует сооружения большого количества линий. На фиг. 1 показаны магистральные линии, используемые в настоящее время США для межконтинентальных связей. Плотность потока сообщений, проходивших по этим линиям в 1958 г., приведена в табл. 1.

Связные линии обеспечивают в настоящее время три основных вида связи: дуплексную телефонию, симплексную передачу письменных сообщений (телеграф) и симплексную передачу телевидения. Всемирные потребности в двух первых видах связи в ближайшие годы резко возрастут и возможно, что к 1980 г. вступят в строй двухсторонние телевизионные линии. Основной областью, в которой ожидается наибольший рост, является передача всевозможных данных. Также быстро растут требования к военным линиям связи. Имеющиеся в настоящее время в распоряжении военных радио и кабельные линии в скором времени будут насыщены обычными административными распоряжениями и командами служб снабжения и обеспечения. В частности, в ближайшем будущем резко увеличится загрузка линий связи между неподвижными центрами связи и движущимися объектами, а также между отдельными движущимися объектами.

Наконец, можно предвидеть новый вид связи, который появится благодаря наличию связных ИСЗ, а именно связь при осуществлении спасательных операций в море или на отдаленных участках суши.

Появление новых служб, а также вероятный рост связей со слаборазвитыми странами мира отражены в табл. 1.

Каждый вид связи предъявляет свои особые требования. Выбор ширины полосы или, что почти эквивалентно, количества каналов будет определяться типом и количеством требуемых связей. С этим же связан выбор методов модуляции, от которого зависит отношение ширины спектра сигнала к ширине полосы канала, что определяет эффективность использования последнего.

Разумная оценка ширины спектра сигнала, передачу которого должна будет обеспечить радиорелейная система связи, может быть получена из рассмотрения видов связи,

которые будут использованы в системе. Сигналы, вероятно, будут состоять из видеопередач, телефонных и телеграфных передач, включая передачу цифровых данных. Ширина полосы видеосигнала (по аналогии с полосой, требуемой для телевизионной передачи) равна ~ 5 Мгц. Ширина полосы, необходимая для телефонного сигнала, может изменяться в зависимости от требуемого качества связи. Для получения удовлетворительного качества передачи речи необходима ширина полосы 4 кгц. Ширина полосы типовой телеграфной линии составляет ~ 200 гц. Несмотря на то что требования к ширине полосы пропускания линии передачи данных могут изменяться в широких пределах, в качестве типовой цифры для сравнительно быстродействующей передачи можно принять 20 кгц. Таким образом, по одному каналу, предназначенному для передачи данных, можно передать около 100 телеграфных и 5 телефонных сообщений или другую соответствующую комбинацию их.

На основании требований к ширине полосы, необходимой для передачи сигналов различных типов, а также требований к каналам, показанным в табл. 1, можно определить необходимую ширину полосы для первых систем связи с использованием ИСЗ.

Хотя количество каналов, которое должен обеспечивать ИСЗ, изменяется в зависимости от выбранной пары конечных пунктов, вероятно, экономически целесообразно делать все ИСЗ одинаковыми и выбирать количество каналов на один ИСЗ и количество ИСЗ так, чтобы обеспечить работу при максимальной ожидаемой плотности потока информации между любыми двумя точками линий связи.

Мы предполагаем, что максимальное количество каналов, необходимое для связи между любыми двумя наземными пунктами, в 1970 г. будет соответствовать ширине спектра 15 Мгц. Эта дата выбрана потому, что ИСЗ, изготовленные в настоящее время, должны иметь срок службы, обеспечивающий их работоспособность по крайней мере до 1970 г.

Двухсторонняя связь между парой наземных станций требует минимум четырех радиочастотных каналов, разделенных защитными полосами: одного для передачи от станции А на ИСЗ С; другого для передачи с ИСЗ на станцию Б и еще двух каналов для передачи в обратном направлении.

Если одна или большее число дополнительных пар станций используют один и тот же ИСЗ, то требуются дополнительные группы, содержащие по четыре радиочастотных канала каждая. Каждая пара (А—С и С—В) будет использовать один и тот же усилитель на ИСЗ. В настоящее время можно считать, что решение вопроса о том, будут ли другие пары иметь индивидуальные усилители или все каналы должны быть уплотнены и будут проходить через один усилитель, предоставляется на усмотрение конструктора.

Выбор вида модуляции частично определяется требованиями к отношению сигнал/шум, частично требованиями надежности и имеющимися в наличии деталями и источниками питания, особенно для ИСЗ. Отношение сигнал/шум для магистральных телефонных каналов связи по нормам фирмы «Белл Систем», установленным несколько лет назад, равно 45 дБ.

Что касается надежности связных ИСЗ, то здесь необходимо учитывать количество ошибок, содержащихся в переданном сообщении, и выход из строя или постепенное ухудшение параметров отдельных элементов системы. В этом вопросе возможно улучшение одних характеристик за счет других, так как можно добиться некоторого снижения количества ошибок с помощью демодуляции и повторной модуляции на ИСЗ. Однако это может в свою очередь потребовать дополнительных элементов и в результате привести к ухудшению общей надежности системы.

В последние годы появились элементы схем, обладающие большой долговечностью и широкополосностью. В частности, лампы бегущей волны (ЛБВ) с выходной мощностью в несколько ватт и долговечностью в десятки лет являются идеальными устройствами для связных ИСЗ. Эти лампы имеют полосу усиливаемых частот 100 МГц и более. Мощность передатчика на ИСЗ ограничена вследствие того, что: большие мощности приводят к увеличению веса ИСЗ; обычно ведут к ухудшению надежности; и увеличивают вероятность помех другим системам. Здесь также есть возможность для изменения одних характеристик за счет других, так как эффективная излучаемая мощность зависит от усиления антенны. Последнее в свою очередь зависит от идеи системы (например, облучать всю поверхность Земли или использовать несколько антенн для

облучения только желаемых участков) и от точности системы ориентации ИСЗ.

Необходимо рассмотреть следующие типы модуляции: амплитудную одно- и двухполосную, частотную и фазовую широкополосную и узкополосную и различные системы кодирования. В основном все виды модуляции, за исключением амплитудной и узкополосной частотной или фазовой, дают улучшение выходного отношения сигнал/шум за счет увеличения отношения ширины полосы ствола связи к ширине спектра информации. К счастью, для разработчика системы связи с использованием ИСЗ нет необходимости заранее определять вид модуляции или даже метод разделения каналов. Обеспечение полосы в 100 МГц на ИСЗ позволит выбрать систему модуляции, удобную для удовлетворения частных требований и достаточно гибкую, с тем чтобы потребители в различных частях света могли бы использовать разные виды модуляции на том же ИСЗ.

Таким образом, для магистральных линий связи (военных или коммерческих) ширина полосы на ИСЗ должна быть порядка 100 МГц, что примерно соответствует максимальной полосе, которая может быть получена в настоящее время без особого труда. Выбор вида модуляции может быть предоставлен потребителям.

Однако имеется по крайней мере одно требование к военным линиям, определяющее совершенно иной подход к выбору полосы. Это требование относится к обеспечению передачи краткой, но очень важной информации из командного центра Соединенных Штатов, например, на весьма удаленные подвижные объекты (самолеты, небольшие моторизованные объекты) или на отдаленные военные базы. Для таких случаев применение управляемых направленных антенн на наземных или самолетных пунктах может оказаться невозможным. Обычно приходится применять неподвижные антенны небольших размеров резонансного типа, например перекрещенные диполи.

Для получения максимального усиления системы, использующей дипольные антенны, необходимо снижать частоту. При этом для обеспечения максимального усиления системы необходимо использовать наиболее низкие частоты и ширину полосы, возможные при реализуемых размерах простых дипольных антенн. На нижнюю гра-

ницу частоты серьезное ограничение накладывает эффект поглощения радиоволн в результате ядерных взрывов. Исследования показали, что оптимальной с этой точки зрения является частота в несколько сотен мегагерц.

Поскольку этот вид связи характеризуется очень малым количеством информации, которая, однако, обязательно должна дойти до абонента, ширина спектра может быть мала. В большинстве случаев она соответствует одному или двум телефонным каналам, или телеграфным сигналам, или же очень медленной передаче данных.

3. Активные и пассивные ИСЗ

Много усилий затрачивается на изучение возможности использования ИСЗ в качестве пассивных ретрансляторов. Эта идея привлекательна благодаря своей простоте и тому обстоятельству, что большое число наземных станций может одновременно использовать один и тот же пассивный отражатель. Проведенные исследования показали, что применение простых пассивных отражателей для магистральных многоканальных военных или коммерческих линий связи менее целесообразно, чем активных ИСЗ. Ниже приводится сравнение этих двух типов ретрансляций и исследуются ограничения каждого из них.

Пассивные отражатели делятся на стабилизированные и нестабилизированные. К стабилизированным относятся: а) плоские отражатели; б) направленные отражатели обратного рассеяния, например линзы Люнеберга или уголкового отражатели; в) закороченные антенны, такие, как группа резонансных элементов или параболические отражатели с закороченными облучателями.

Стабилизированные отражатели требуют точной ориентации, что вызывает необходимость применения электронных систем и тем самым сводит на нет главные преимущества (простота и надежность), свойственные пассивным отражателям.

К нестабилизированным или неориентированным отражателям относятся: а) набор уголкового отражателей; б) набор линз Люнеберга; в) металлические сферы; г) большое количество «иголок», равномерно распределенных по орбите.

Исследование свойств пассивного отражателя, состоящего из очень большого количества мелких диполей («иголок»), образующих пояс вокруг Земли, показало, что этот



Фиг. 2. Сравнение потерь для активных и пассивных спутников.

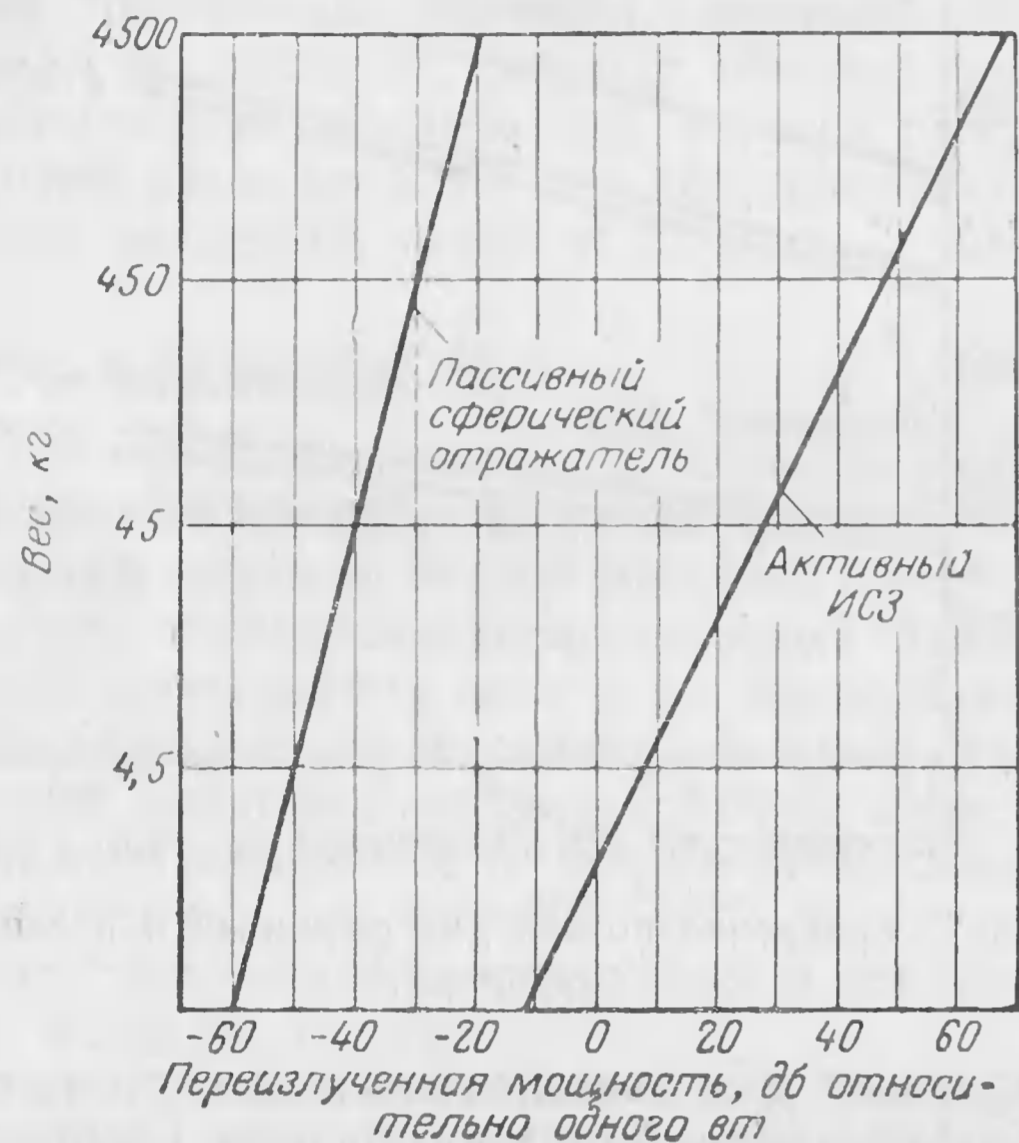
метод непригоден для широкополосных систем, поскольку разброс запаздывания при многопутном распространении достигает 2 мсек, а разброс доплеровского смещения частоты на частоте 8 000 Мгц достигает 5 кгц [5]. Кроме того, связь с объектами в космосе через такой пояс на резонансных частотах диполей была бы сильно затруднена.

Преимущество пассивного ИСЗ заключается в отсутствии на нем электронных приборов. Недостаток состоит в том, что деформация поверхности ИСЗ со временем приведет к уменьшению ее коэффициента отражения.

Например, у ИСЗ «Эхо», функционировавшего весьма успешно, деформация оболочки вызвала сильное «замирание» отраженных сигналов.

Основной недостаток использования пассивных ИСЗ с ненаправленной диаграммой излучения заключается в сравнительно малом отношении сигнал/шум, получаемом на межконтинентальных трассах большой протяженности. Поскольку потери при распространении зависят от отражения,

то они изменяются пропорционально четвертой степени расстояния. С другой стороны, для активного ИСЗ потери на распространение пропорциональны только квадрату расстояния, так как ИСЗ усиливает принятый сигнал перед тем,

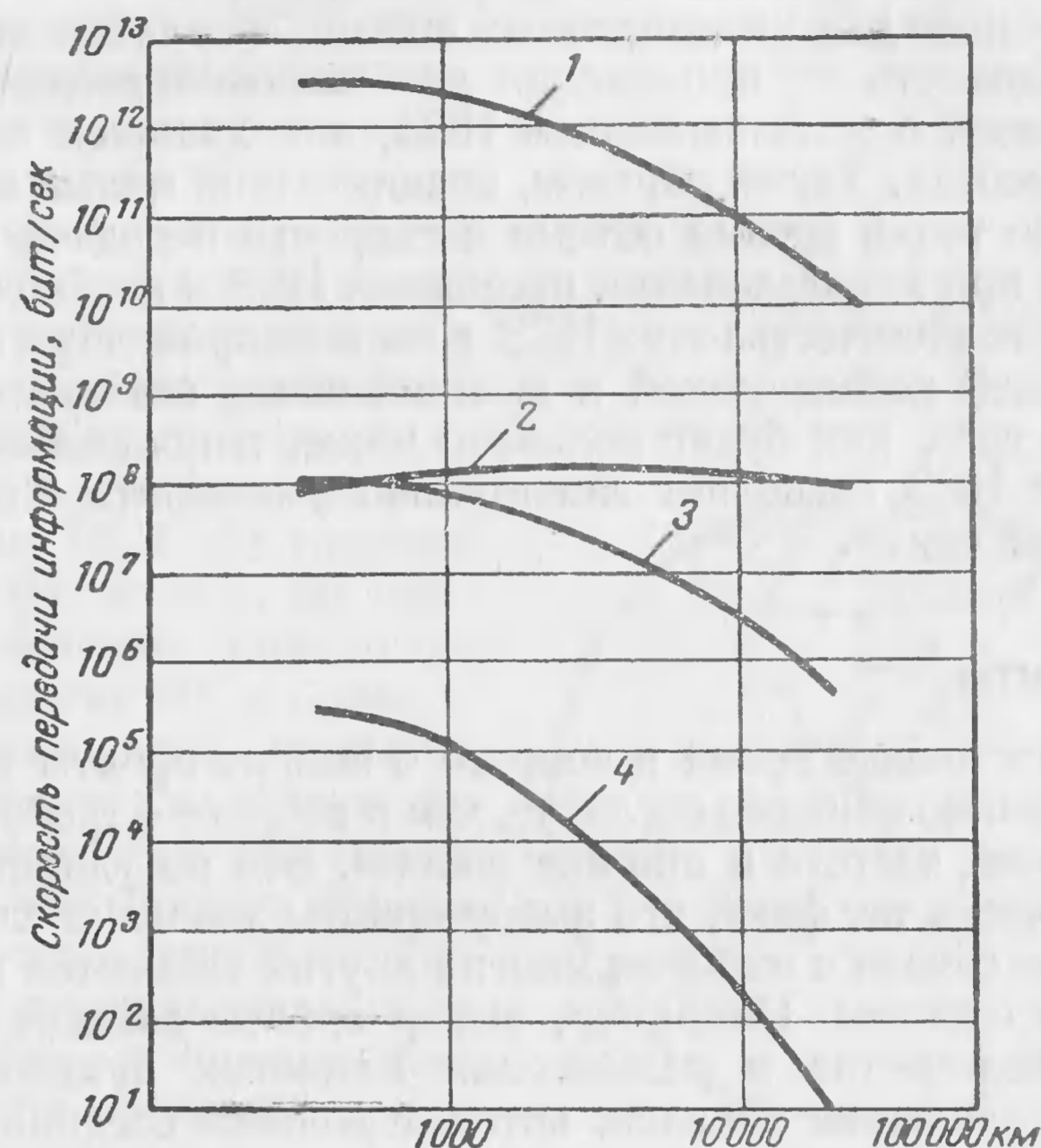


Фиг. 3. Зависимость веса ИСЗ от излучаемой мощности.

как растраслировать его. На фиг. 2 сравниваются потери на распространение для активных и пассивных ИСЗ. Увеличение диаметра сферического пассивного ИСЗ в 2 раза уменьшает потери на распространение только на 6 дБ. Верхняя кривая для активного ИСЗ относится к случаю применения на нем ненаправленной антенны. Ясно, что потери на распространение могут быть уменьшены в случае применения на ИСЗ направленной антенны. В качестве примера на фиг. 2 приведена кривая для антенны с коэффициентом усиления в 10 дБ.

На фиг. 3 дано сравнение весов пассивных и активных ИСЗ. Из приведенных кривых видно, что увеличение раз-

меров пассивного ИСЗ для получения большого усиления по мощности быстро приводит к недопустимому увеличению веса.



Фиг. 4. Зависимость скорости передачи информации от высоты для четырех типов связных ИСЗ.

1 — активный ИСЗ, мощность 1 Вт, ширина диаграммы 1°; 2 — активный ИСЗ, мощность 1 Вт, облучается вся видимая поверхность Земли; 3 — активный ИСЗ, мощность 1 Вт, направленная антенна; 4 — пассивный сферический ИСЗ, диаметр 30 м.

Количество информации, которое может быть передано с помощью активных и пассивных ИСЗ в единицу времени, приведено с учетом реальных ограничений систем на фиг. 4. Очевидно, что нет смысла передавать сигналы телефонного канала с помощью пассивного отражателя, поднятого на высоту более 3 700 км, однако даже при такой высоте, очевидно, не удастся выполнить минимальные требования к отношению сигнал/шум для магистральных линий связи. Активный ИСЗ с ненаправленными антеннами, предназна-

ченный для передачи качественного телевидения с точки зрения уменьшения потерь на распространение, должен находиться на высотах, не превышающих 7 500 км. Кривые, построенные для направленных антенн, ясно указывают на необходимость их применения для широкополосных дальних связей с использованием ИСЗ, находящихся на больших высотах. Таким образом, сравнительно малые возможности (с точки зрения объема и скорости передачи информации) при использовании пассивных ИСЗ и необходимость большого количества этих ИСЗ в системе приводят к выбору для целей коммерческой и военной связи активных ИСЗ. Кроме того, как будет показано ниже, использование активных ИСЗ позволяет значительно уменьшить стоимость системы связи.

4. Орбиты

В настоящее время в вопросе о выборе орбиты имеется значительно меньшее согласие, чем в вопросе о требованиях к рабочей частоте и ширине полосы. Это не удивительно, если учесть тот факт, что выбор орбиты довольно сложным образом связан с выбором многих других элементов и параметров системы. Например, выбор орбиты зависит от

- 1) количества и размещения наземных пунктов;
- 2) количества каналов, которые должны соединять различные пары наземных пунктов;
- 3) качества обслуживания, особенно: а) распределения времени ожидания, б) времени запаздывания сигналов для дуплексной телефонной линии;
- 4) ракеты-носителя: а) нагрузочных характеристик, б) стоимости, в) надежности, г) доступности;
- 5) ИСЗ: а) веса, б) стоимости, в) надежности;
- 6) наземной станции: а) сложности, б) стоимости;
- 7) проблем, связанных с координацией системы;
- 8) влияния космических условий на долговечность аппаратуры ИСЗ в зависимости от высоты.

Имеется, очевидно, бесконечное множество возможных и, вероятно, даже реализуемых орбит. Мы попытаемся в этом разделе установить некоторые критерии, с помощью которых можно будет свести это множество к одной орбите или по крайней мере к нескольким наиболее благоприятным.

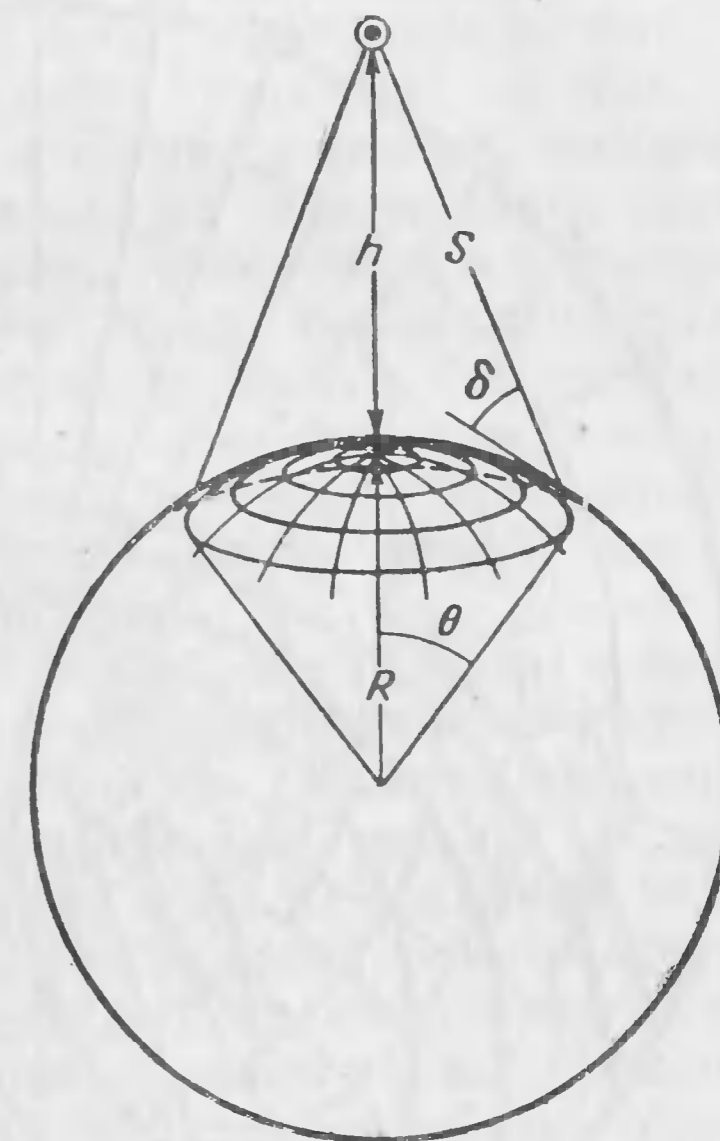
Каждый ИСЗ будет виден из любой точки Земли, находящейся в пределах окружности, центр которой находится прямо под ним, а диаметр увеличивается с увеличением высоты орбиты ИСЗ. По мере приближения к периметру этой окружности все большая часть земной атмосферы оказывается на пути к ИСЗ, что при очень малых углах возвышения приводит к частотно-селективному затуханию радиоволн. Это явление быстро ослабевает с увеличением угла подъема ИСЗ над горизонтом и фактически им можно пренебречь при углах возвышения 10° и более.

Кроме того, наземная антенна своим главным лепестком обычно при малых углах возвышения облучает и часть земной поверхности, в результате чего ее эффективная шумовая температура представляет собой нечто среднее между температурой космоса и Земли. Следовательно, для удовлетворительной связи ИСЗ всегда должен находиться по крайней мере на несколько градусов выше горизонта для той точки земной поверхности, в которой собираются использовать ИСЗ. Это минимальное возвышение δ может находиться между 5 и 10° в зависимости от требуемого качества связи и типа используемой аппаратуры. Во всех расчетах, приводимых далее в настоящей работе, угол δ принимается равным $7,5^\circ$.

Радиус перекрываемой окружности определяется углом θ (фиг. 5)

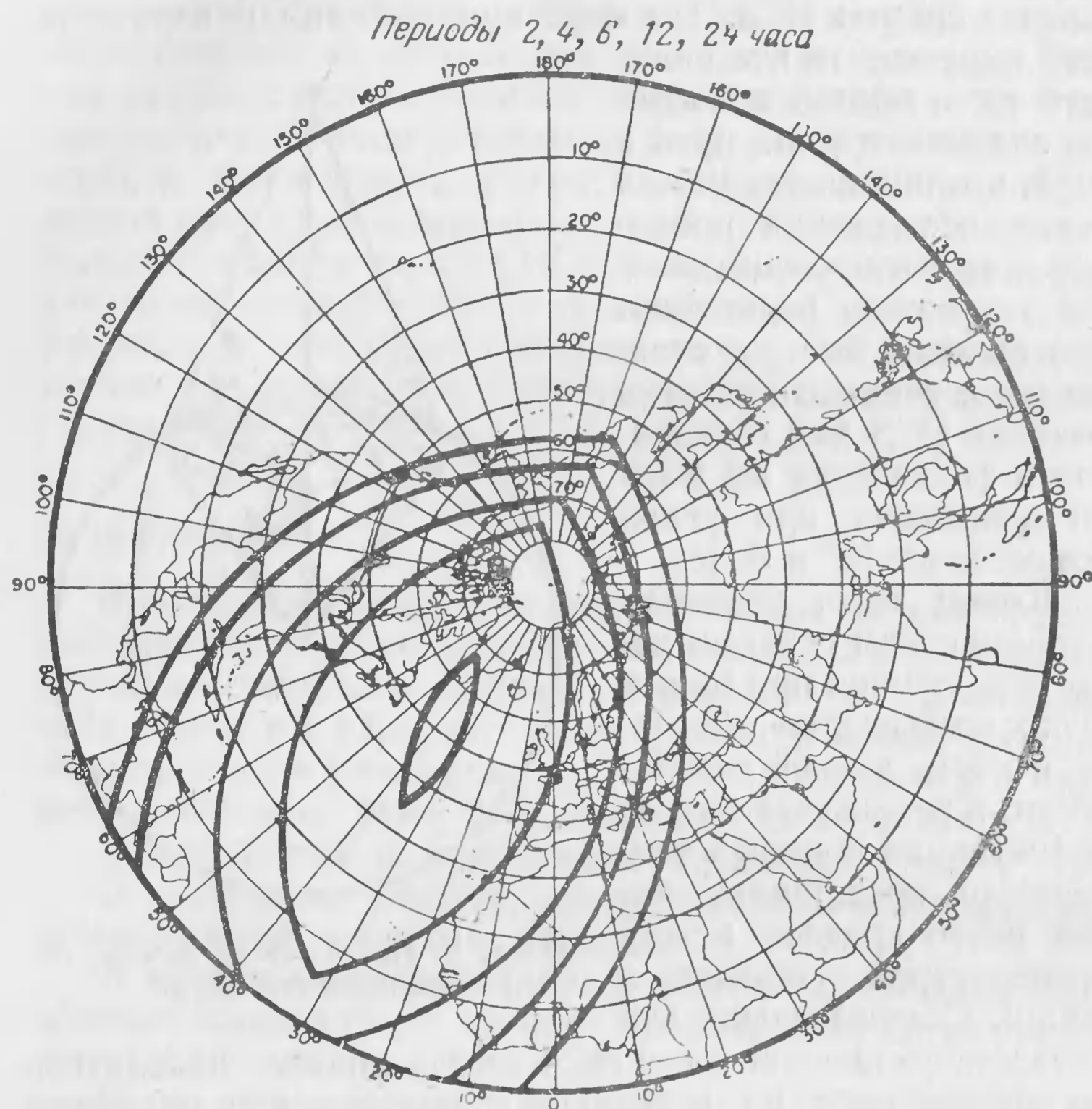
$$\theta = \left[\arccos \left(\frac{R}{R+h} \cos \delta \right) \right] - \delta,$$

где R — радиус Земли и h — высота орбиты ИСЗ.



Фиг. 5. Поверхность Земли, перекрываемая ИСЗ.

Увеличение площади перекрытия, получающееся за счет увеличения высоты ИСЗ, является чрезвычайно существенным на всех высотах примерно до 8 000 км. Однако



Фиг. 6. Области взаимной видимости для Нью-Йорка и Парижа при различных высотах.

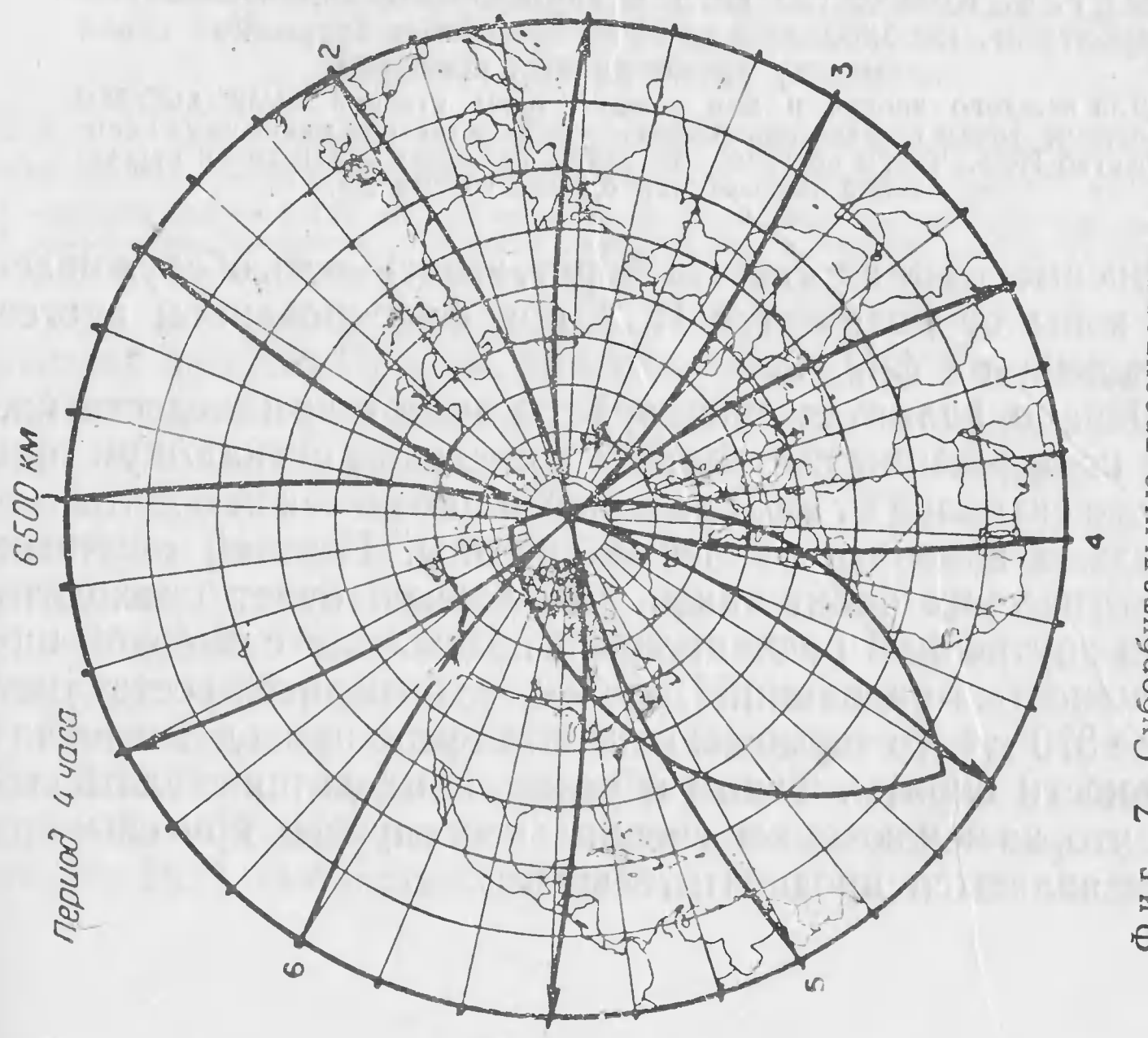
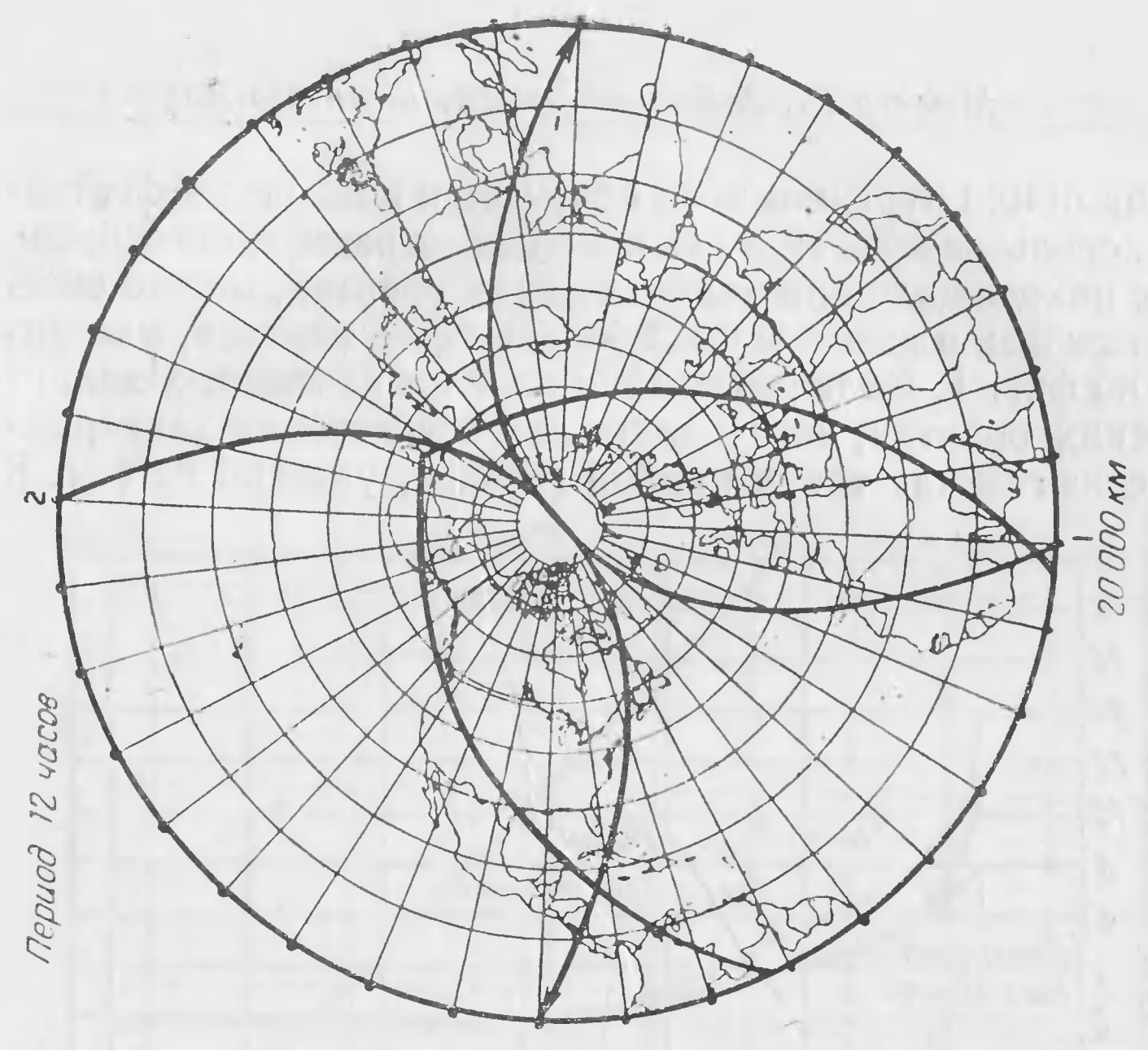
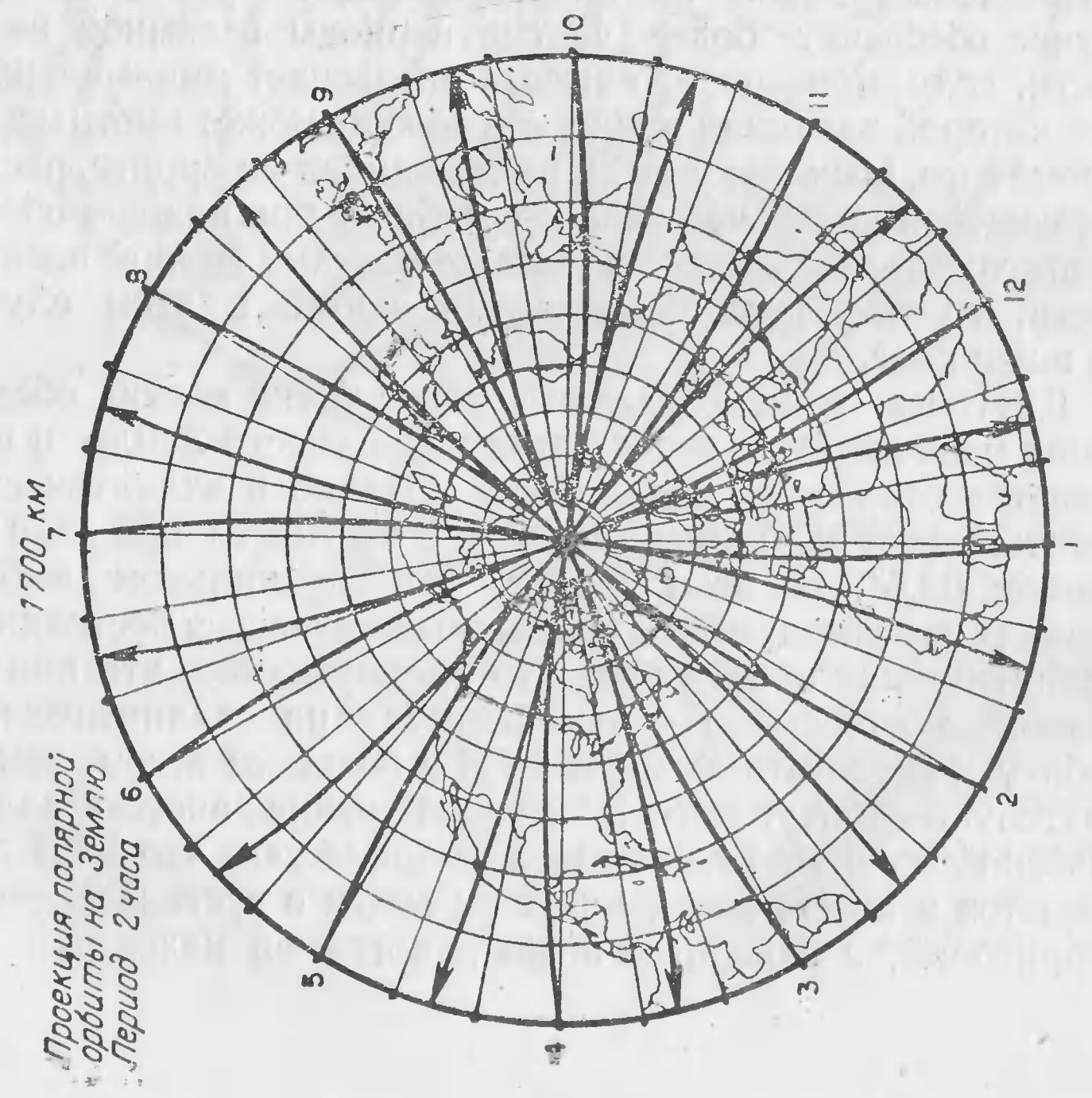
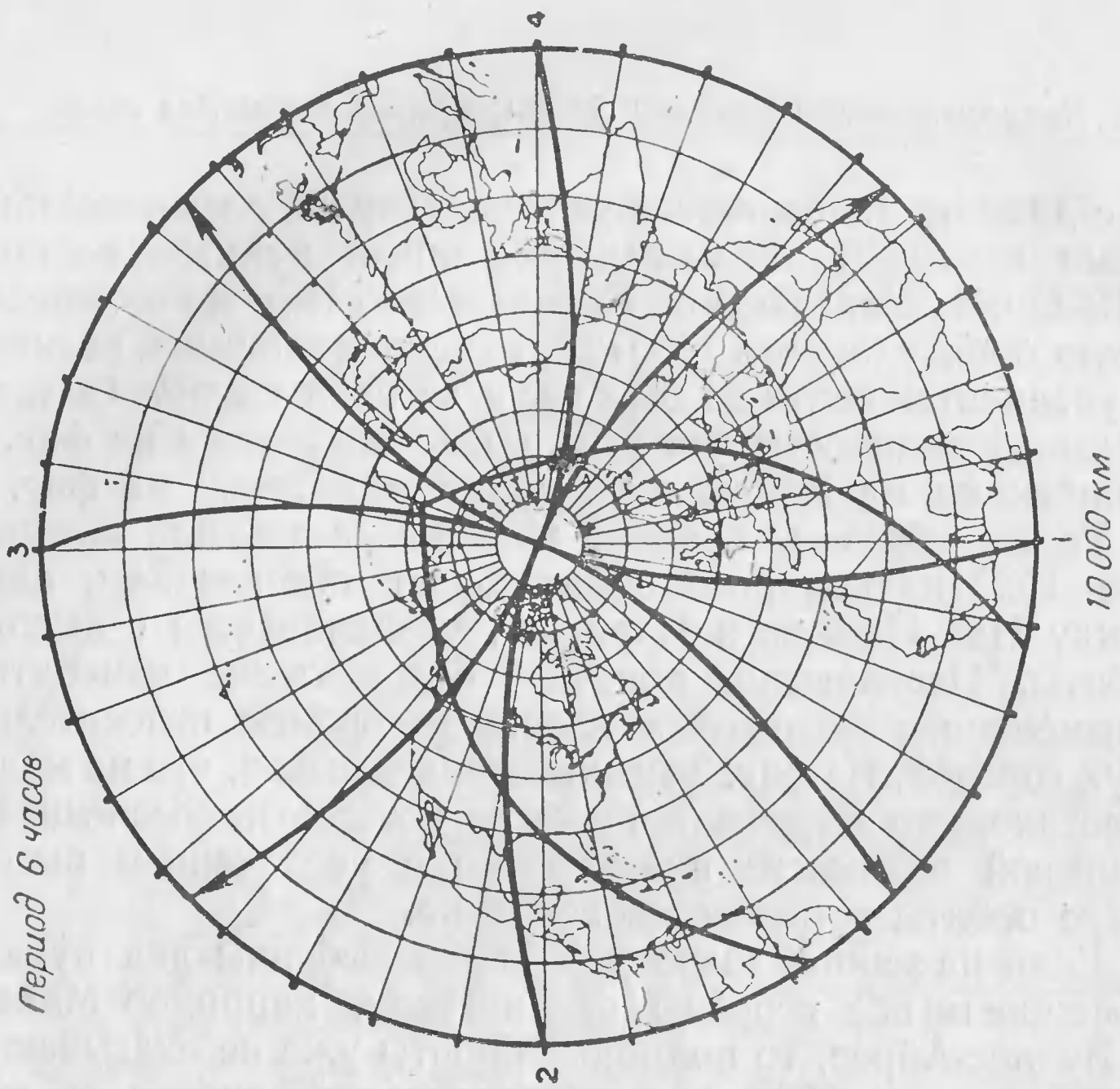
дальнейшее увеличение высоты приводит к менее заметному увеличению площади перекрытия. Если мы возьмем две точки на земном шаре, между которыми мы хотим осуществить связь, например Нью-Йорк и Париж, и ИСЗ на круговой полярной орбите, проходящей между этими двумя пунктами, то при двухчасовой орбите (высота 1930 км при угле $\theta = 30^\circ$) и, следовательно, окружности перекрытия на Зем-

ле с диаметром, соответствующим углу 60° , максимальное время взаимной видимости указанных пунктов составит ~ 10 мин за один оборот. Если поднять ИСЗ на четырехчасовую орбиту (высота 7350 км), то период взаимной видимости увеличится почти до двух часов за один оборот. Области взаимной видимости для этих орбит приведены на фиг. 6, а проекции на Землю этих орбит показаны на фиг. 7.

Таким образом, процент времени, в течение которого один ИСЗ на полярной орбите будет обеспечивать связь между Нью-Йорком и Парижем, увеличивается с высотой орбиты. Перекрытие, конечно, будет также изменяться с изменением положения плоскости орбиты относительно двух городов. Из фиг. 7 можно сделать вывод, что на малых высотах часто встречаются орбиты, которые не обеспечивают взаимной видимости пунктов, но с увеличением высоты такие орбиты встречаются все реже.

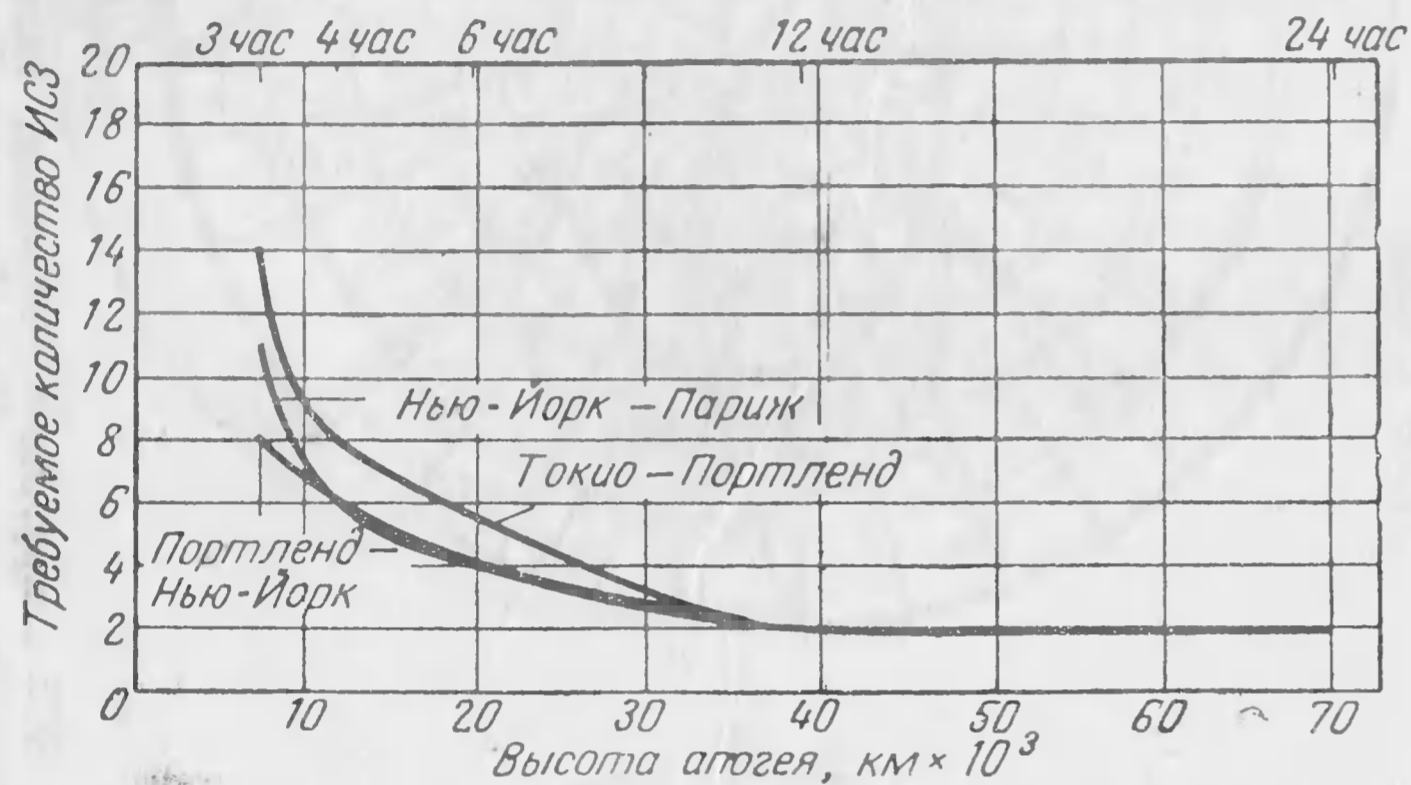
Если на земном шаре для связи выбраны два пункта, лежащие по обе стороны от экватора, например Майами и Буэнос-Айрес, то полярные орбиты уже не оказываются оптимальными. ИСЗ на экваториальной орбите в этом случае обеспечит более частые периоды взаимной видимости, если, конечно, его высота превышает минимальную, при которой взаимная видимость вообще может иметь место. Кроме того, поскольку ИСЗ, находящийся на орбите, располагающейся прямо над экватором, будет при каждом обороте проходить над одними и теми же точками земной поверхности, то проблема бесполезных орбит в этом случае не возникает.

Круговые орбиты более выгодны с точки зрения обеспечения равномерного перекрытия поверхности Земли и постоянства отношения сигнал/шум. Однако и эллиптические орбиты имеют свои преимущества, в частности орбиты с наклоном $63,5^\circ$. В этом случае при правильном выборе периода проекция орбиты на Землю оказывается постоянной. Эллиптическая орбита имеет то преимущество, что при заданной мощности ракеты-носителя на эллиптическую орбиту может быть выведен ИСЗ с большим весом, чем на круговую орбиту, высота которой равна апогею эллиптической орбиты. Если орбита выбрана так, что ИСЗ оказывается в апогее днем, когда он виден с густонаселенных территорий, а в перигее ночью, когда он находится над



Фиг. 7. Суборбитальные траектории для полярных ИСЗ с круговыми орбитами, имеющими различную высоту, показывающие взаимную видимость между Нью-Йорком и Парижем.

океанами или пустынями, то получается наиболее эффективное использование ИСЗ. С помощью ограниченного числа ИСЗ, находящихся на эллиптических орбитах, можно обеспечить связь в дневные часы большинства центров, указанных на фиг. 1. Количество ИСЗ на этих наклонных эллиптических орбитах, необходимое для обеспечения непрерывной связи между тремя парами городов, указано на фиг. 8



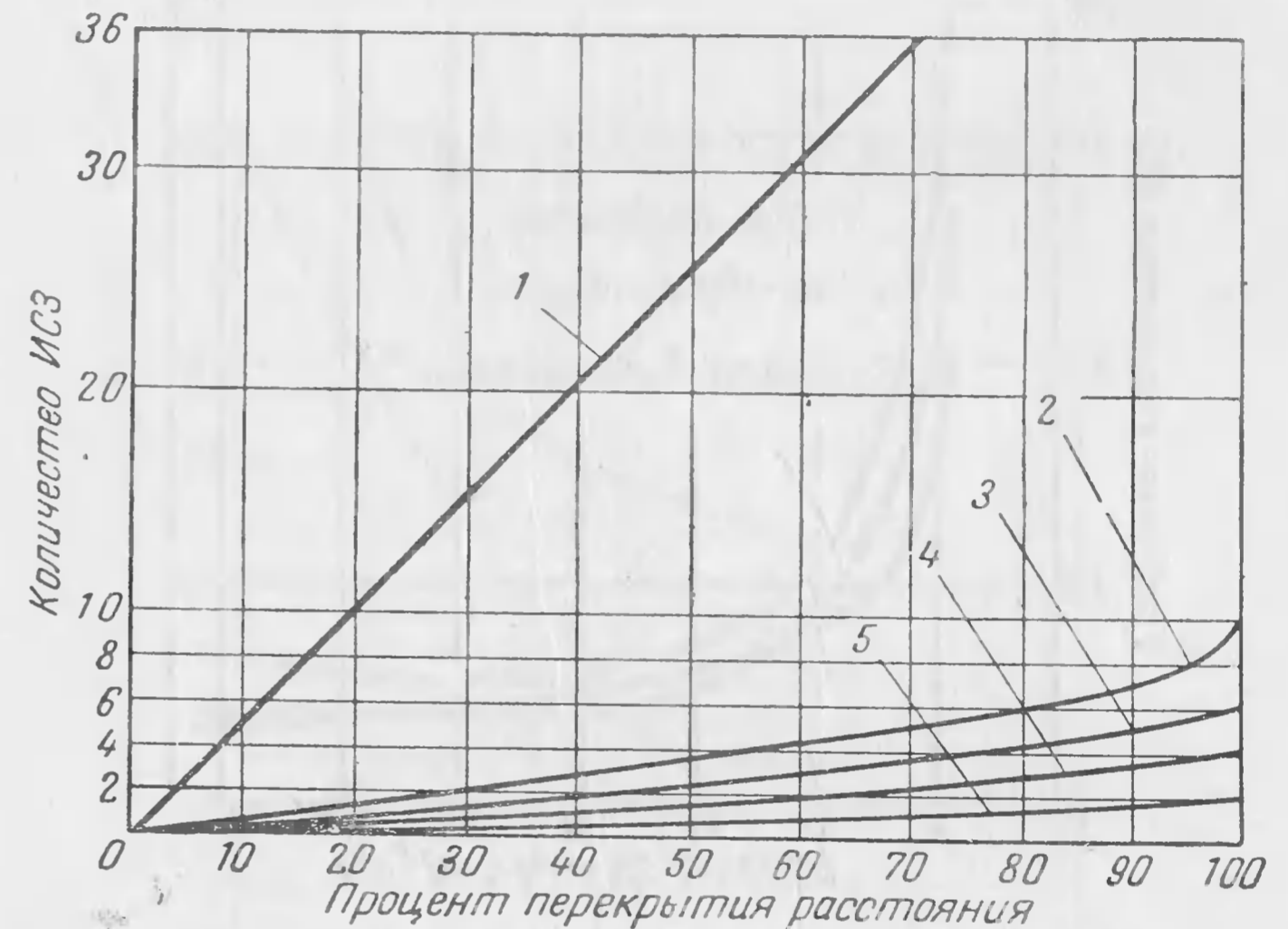
Фиг. 8. Количество ИСЗ с наклонными эллиптическими орбитами, необходимых для обеспечения непрерывной связи между тремя парами городов.

Для каждого апогея и для каждой пары станций были выбраны высшие точки пересечения орбит, чтобы свести к минимуму количество ИСЗ. Таким образом, не везде на кривых эти точки пересечений оказываются одними и теми же.

в зависимости от апогея. Наоборот, зависимость обслуживаемой зоны от количества ИСЗ при фиксированном апогее приведена на фиг. 9.

Однако эллиптические орбиты имеют три недостатка. Для поддержания постоянного отношения сигнал/шум при приеме сигналов от ИСЗ в случае эллиптической орбиты необходимо изменять усиление антенны. Перигей обычных эллиптических орбит таков, что должен будет проходить через внутренний радиационный пояс Земли с высокой интенсивностью радиации. Наконец, если перигей составляет менее 370 км, то торможение в атмосфере приведет к нестабильности орбиты. Таким образом, приходится сделать вывод, что, за исключением специальных случаев, круговые орбиты являются предпочтительными.

Для уменьшения сложности системы высота орбиты должна превышать некоторый минимум. Приведем пример. Если желательно осуществить передачу с западного побережья Соединенных Штатов в Японию, то необходимо иметь ИСЗ в средней точке дуги большого круга, соединяющей

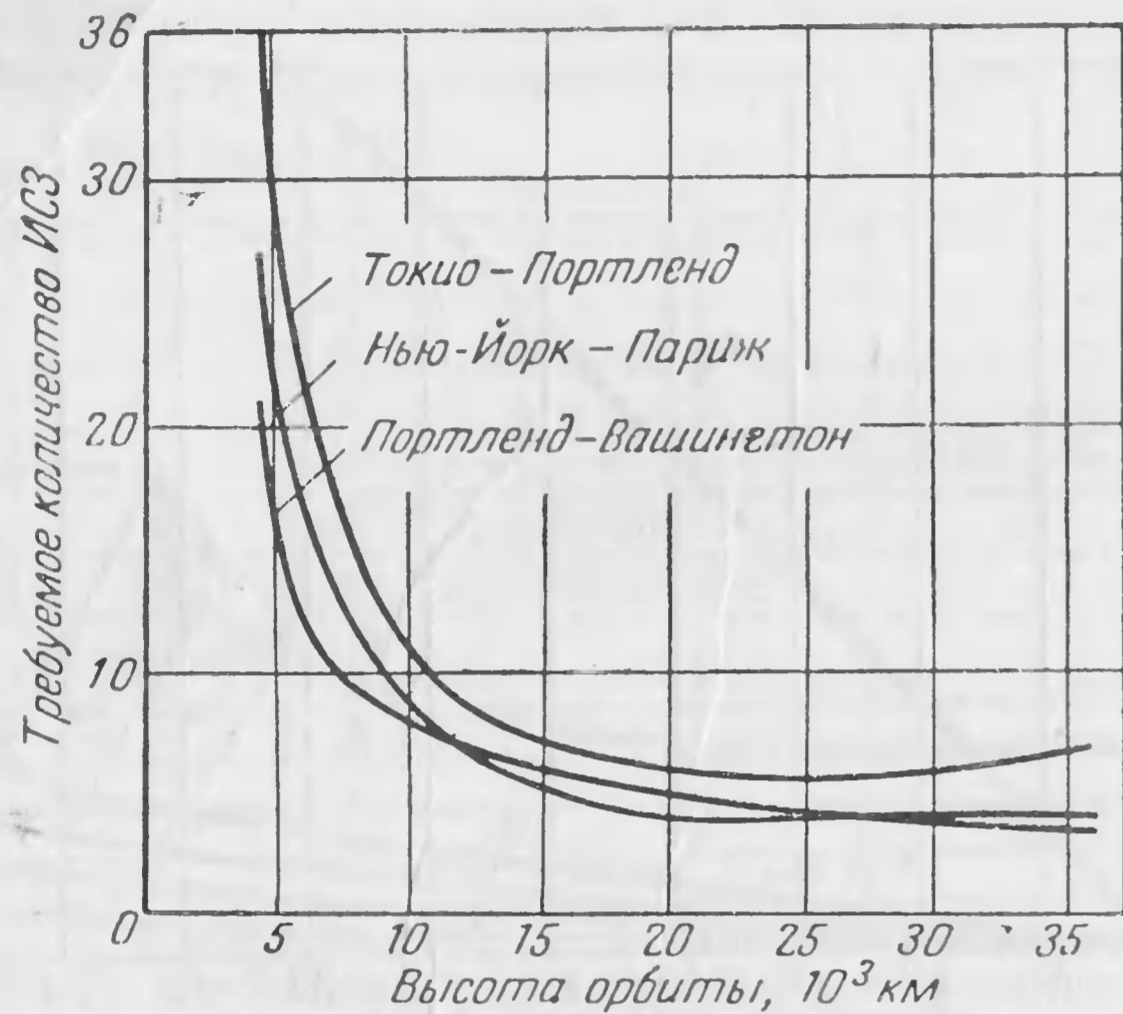


Фиг. 9. Связь между Нью-Йорком и Парижем с помощью ИСЗ на наклонных эллиптических орбитах при различной высоте апогея. 1 — высота апогея 2 420 км, период 2 час; 2 — высота апогея 7 400 км, период 3 час; 3 — высота апогея 11 900 км, период 4 час; 4 — высота апогея 19 800 км, период 6 час; 5 — высота апогея 29 800 км, период 12 час.

эти два пункта. Причем, для того чтобы ИСЗ все время находился в поле зрения обеих станций, высота орбиты должна составлять по меньшей мере 1670 км. Для того чтобы поддерживать связь между Сан-Франциско и Токио, что соответствует разности долгот 30° (что потребует минимум 12 ИСЗ), необходимо иметь ИСЗ на экваториальной орбите с высотой более 13 000 км. Кроме того, можно показать, что для непрерывной связи Сан-Франциско — Токио потребуется не менее 5 ИСЗ на экваториальных орбитах или 6 ИСЗ на полярных орбитах, расположенных на любой, даже бесконечной высоте. Единственным исключением является ИСЗ на синхронной орбите. В этом случае достаточ-

но одного ИСЗ. На фиг. 10 приведены данные о количестве ИСЗ на круговых полярных орбитах, необходимом для получения непрерывной связи между тремя парами городов.

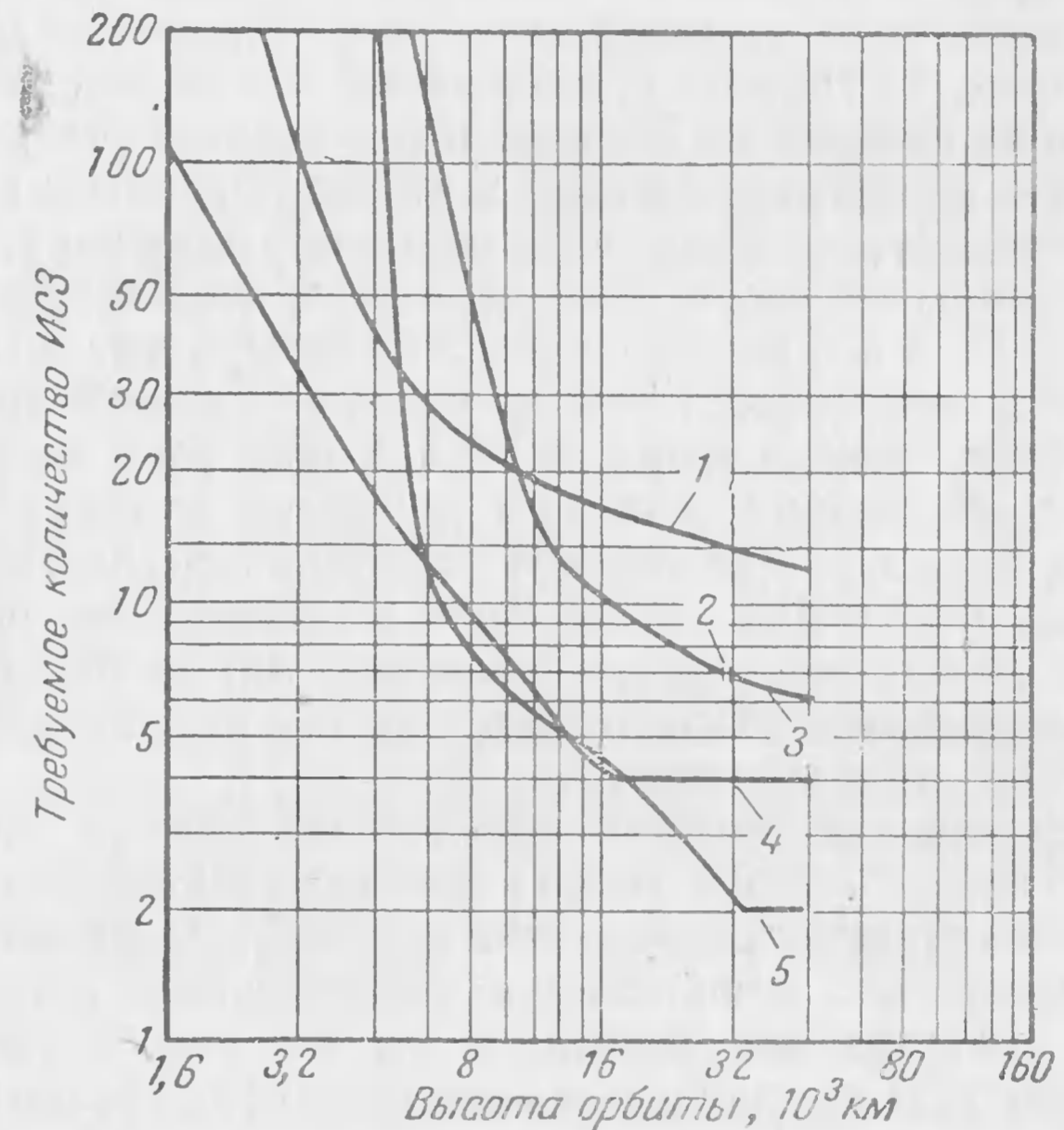
При построении кривых фиг. 10 предполагалось, что можно управлять положением ИСЗ на орбите, причем может



Фиг. 10. Количество ИСЗ с круговыми полярными орбитами, необходимое для обеспечения непрерывной связи между тремя парами городов.

изменяться их начальное положение на орбите и в дальнейшем это положение за время существования ИСЗ может сохраняться. С другой стороны, для экономии веса системы управления ИСЗ можно запускать на определенную круговую орбиту, не пытаясь управлять его положением на этой орбите. Для того чтобы обеспечить взаимную надежную видимость одного ИСЗ из двух наземных пунктов при произвольном размещении ИСЗ на орбите, необходимо иметь значительно большее их количество. Однако и в этом случае требуемое количество резко зависит от высоты орбиты, если она меньше 9250 км. Как следует из фиг. 11, для получения 99% перекрытия между Нью-Йорком и Парижем при произвольном расположении ИСЗ на круговой полярной орби-

те высотой 3700 км нужно иметь 100 спутников, а при высоте орбиты 9250 км — только 25. Для получения такого же перекрытия между Токио и Портлендом (шт. Орегон) необходимо большее количество ИСЗ. Фактически количество произвольно размещенных на орбите ИСЗ, необходимое для



Фиг. 11. Количество ИСЗ, необходимое для обеспечения связи между Нью-Йорком и Парижем для орбит четырех типов.

1 — произвольное расположение на круговой орбите (перекрытие 99%); 2 — на этой высоте требуется только один ИСЗ; 3 — круговая экваториальная орбита, ИСЗ со стабилизацией; 4 — круговая полярная орбита, ИСЗ со стабилизацией; 5 — эллиптическая наклонная орбита (угол наклона $63,5^\circ$), ИСЗ со стабилизацией.

связи между двумя этими городами, в то же время почти обеспечивает глобальную связь.

При ненаправленных антеннах на активном ИСЗ-ретрансляторе, очевидно, невозможно обеспечить требуемое качество телевидения при высоте орбиты более 7400 км. Таким образом, если должна использоваться ненаправлен-

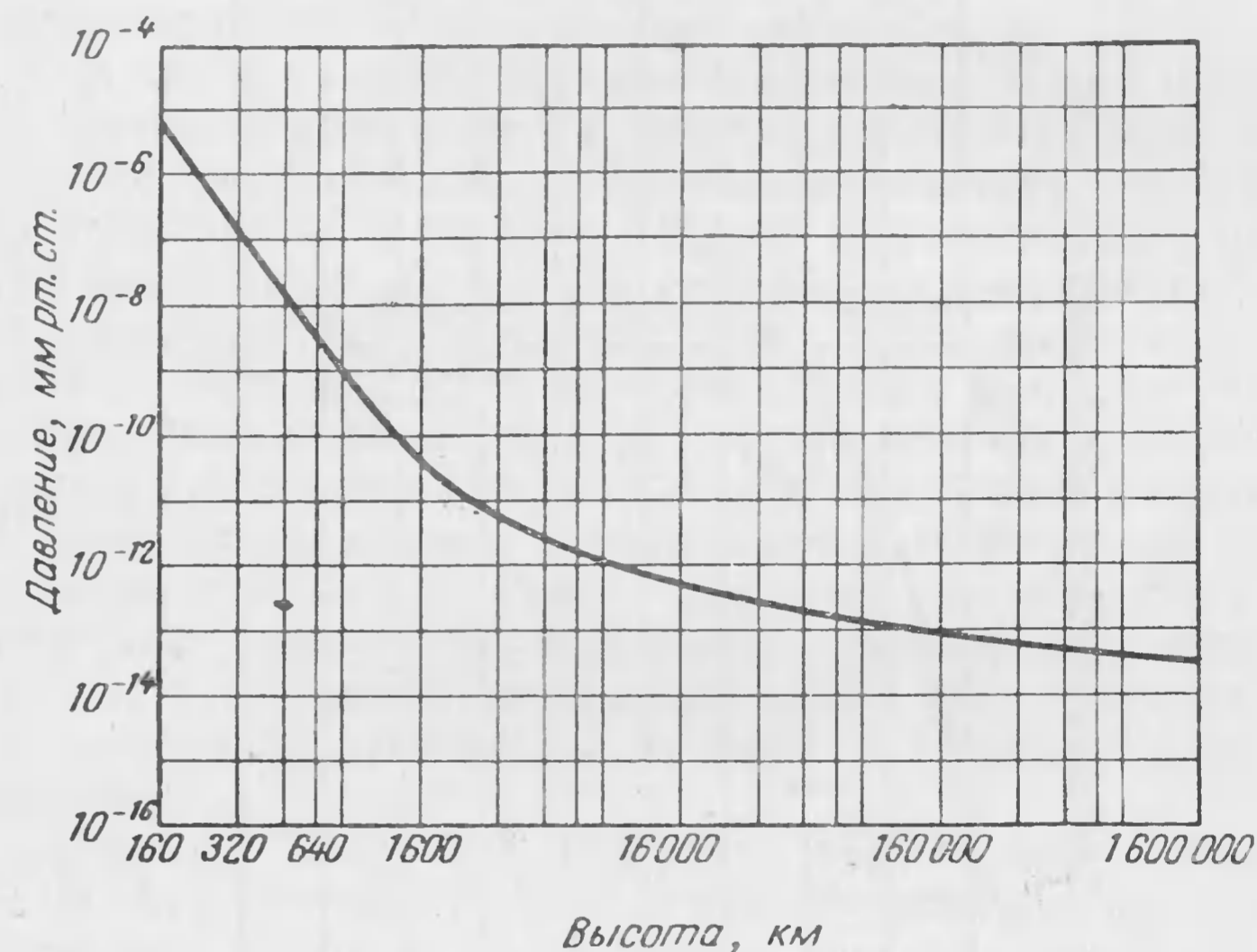
ная антенна, то орбита должна иметь меньшую высоту, желательно не более 3700 км. При большой высоте необходимо вводить систему стабилизации положения ИСЗ для обеспечения поворота направленных антенн к Земле. При наличии системы стабилизации положения некоторые другие подсистемы ИСЗ либо упрощаются, либо уменьшается их вес. Если в качестве источников питания используются солнечные батареи, то система стабилизации может обеспечивать ориентацию батарей на Солнце, что позволяет значительно уменьшить количество батарей и их вес. Проблема поддержания температуры также упрощается при наличии системы стабилизации, так как то обстоятельство, что некоторые поверхности ИСЗ всегда повернуты к Солнцу, а другие всегда остаются в тени, может быть использовано для обеспечения эффективного отвода тепла от ИСЗ. Кроме того, поскольку система стабилизации позволяет все время направлять антенны на Землю, то для данного участка поверхности Земли требуемое отношение сигнал/шум не зависит от высоты; по мере увеличения высоты освещение той же площади на поверхности Земли обеспечивается антенной с более острой диаграммой направленности.

Таким образом, имеется критическая высота порядка 9250 км, ниже которой можно использовать ненаправленные антенны и относительно простые ИСЗ. На больших высотах желательно использовать направленные антенны и систему стабилизации. Однако в то же время при высоте более 9250 км требуемое количество ИСЗ резко сокращается.

Важным обстоятельством при выборе высоты ИСЗ является запаздывание, получающееся при прохождении сигнала по всей линии связи. В настоящее время производится исследование влияния этого запаздывания на телефонный разговор [9]. Возможно, что общее запаздывание в 0,6 сек, вводимое системой ретрансляции с помощью ИСЗ на расстояниях, соответствующих синхронной орбите, сделает непригодной такую орбиту для коммерческой телефонной связи, если только не будут разработаны специальные методы передачи и приема. С другой стороны, это запаздывание не будет нарушать одностороннюю связь и не будет влиять на выполнение военных требований. В военной связи запаздывание может оказаться даже полезным

с точки зрения упрощения техники защиты от создаваемых противником помех.

Следующим фактором, который нужно учитывать при выборе высоты ИСЗ, является влияние на ИСЗ космических условий. Следующие 7 из известных в настоящее время факторов космической среды могут оказывать вредное воздействие: высокий вакуум, микрометеориты, ультрафиолето-

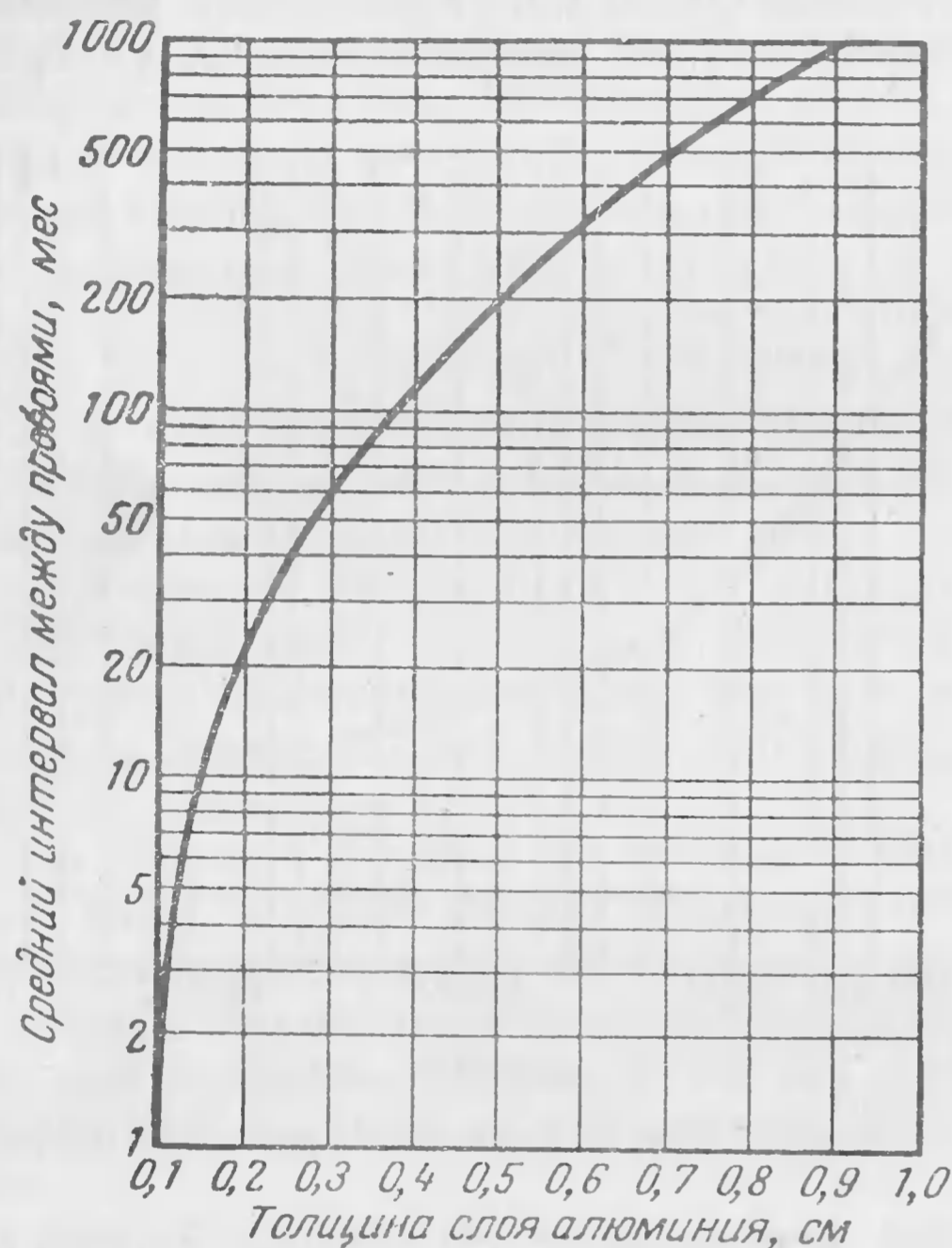


Фиг. 12. Зависимость атмосферного давления от высоты.

вое излучение, рентгеновское излучение, γ -лучи, захваченные электроны и захваченные протоны. Последние четыре фактора в значительной степени зависят от выбранной высоты. Влияние магнитных полей, инфракрасных и космических лучей, нейтронов, α -частиц и частиц с большей массой может не учитываться либо вследствие пренебрежимо малого эффекта, производимого ими, либо вследствие пренебрежимо малой вероятности их воздействия [3].

Высокий вакуум космического пространства, который, как показано на фиг. 12, приближается к 10^{-12} мм рт. ст. на высотах 9250—3700 км, оказывает сильное влияние на твердые материалы. Ускоряются процессы испарения и возгонки, так как молекулы, покидающие поверхность ма-

териала, имеют меньшую вероятность столкновения с молекулами атмосферы, а следовательно, и возвращения в материал. Кроме того, устранение газовой поверхностной пленки, которая покрывает поверхности всех материалов при атмосферном давлении, соответствующем уровню моря,



Фиг. 13. Вероятная частота пробивания микрометеоритами алюминиевой сферы диаметром 3 м в космическом пространстве вблизи Земли.

приводит к соединению их с любой находящейся с ними в контакте поверхностью. Использование материалов с низким давлением паров (пластики, алюминий, бериллий, титан и золото) может уменьшить влияние этих факторов до ничтожно малой величины и решает первую проблему. Правильная конструкция, устраняющая трущиеся поверхности, может решить вторую проблему. Как можно видеть из

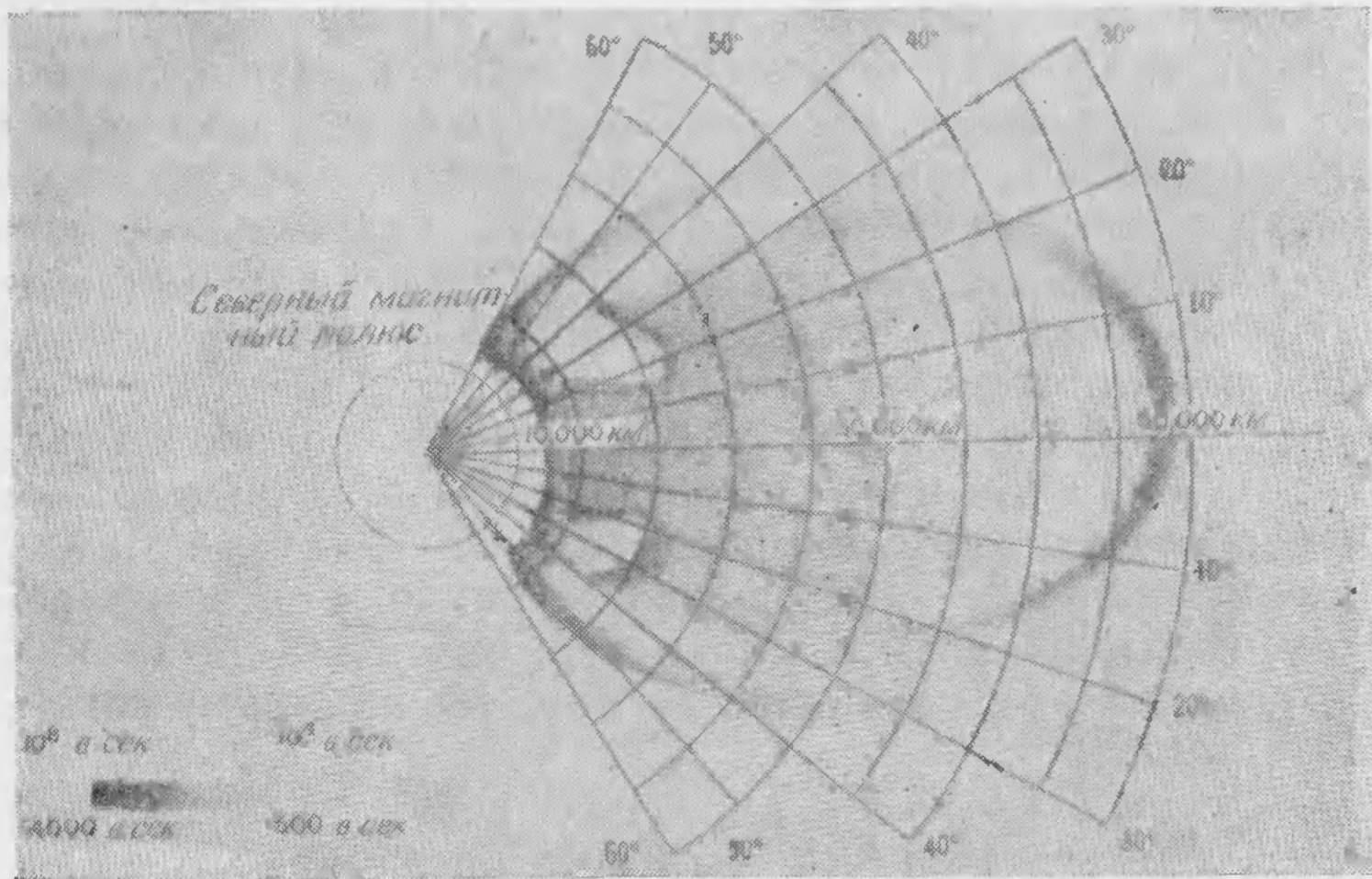
фиг. 12, на высотах более 1850 км изменение атмосферного давления с высотой очень мало. Влияние ультрафиолетового излучения в космическом пространстве также приводит к ускорению возгонки материалов; его можно ослаблять тем же способом — выбором слабозгоняющихся материалов.

На фиг. 13 приведена кривая, полученная во время последних исследований количества и распределения энергии микрометеоритов в космическом пространстве.

Она характеризует вероятность пробивания ИСЗ микрометеоритом. Пробивание микрометеоритом возможно, но, как показано на фиг. 13, в необходимых случаях, например для герметически запаянных батарей, оно может быть предотвращено путем увеличения толщины оболочки, обеспечивая их сохранность в течение всего времени существования ИСЗ. Под действием столкновений с микрометеоритами, обладающими меньшей энергией, будут возникать эрозия и шероховатость поверхности ИСЗ. Вредное влияние эрозии, например на поглощение тепла, может быть устранено специальным предварительным огрублением поверхности или оксидированием ее. Установлено, что обычно поток микрометеоритов с высотой уменьшается, так что требования к экранировке, вытекающие из фиг. 13, являются максимальными.

Солнечная энергия в диапазоне рентгеновских лучей (1—100 Å) и γ -лучей (0,1—1 Å) пренебрежимо мала, за исключением периодов интенсивных вспышек на Солнце, однако интегральный эффект этих вспышек недостаточен для того, чтобы вызвать существенные повреждения аппаратуры ИСЗ. Повреждение ИСЗ может быть вызвано эффектом тормозного излучения, при котором часть энергии излучаемых частиц, взаимодействуя с окружающей материей, приводит к появлению γ -лучей. Хотя энергия этого вторичного излучения всегда значительно ниже энергии первичного излучения, то обстоятельство, что тормозное излучение обладает большой проникающей способностью, делает экранировку затруднительной, а его влияние на полупроводниковые приборы и органические материалы, используемые для изоляции, может с течением времени резко ухудшить их рабочие характеристики. Тем не менее защита от первичного излучения исключит в то же время возможность повреждения аппаратуры γ -лучами.

Первичный космический поток состоит из частиц, энергия которых колеблется от нескольких до 10^9 миллионов *Мэв*, причем поток на 80% состоит из протонов. Максимальная плотность космических лучей составляет примерно $2 \text{ частицы/см}^2 \cdot \text{сек}$. Такая плотность достигается над экватором на высотах более $27\,800 \text{ км}$, а в полярных районах более $18\,520 \text{ км}$. Максимальная ионизация в любом



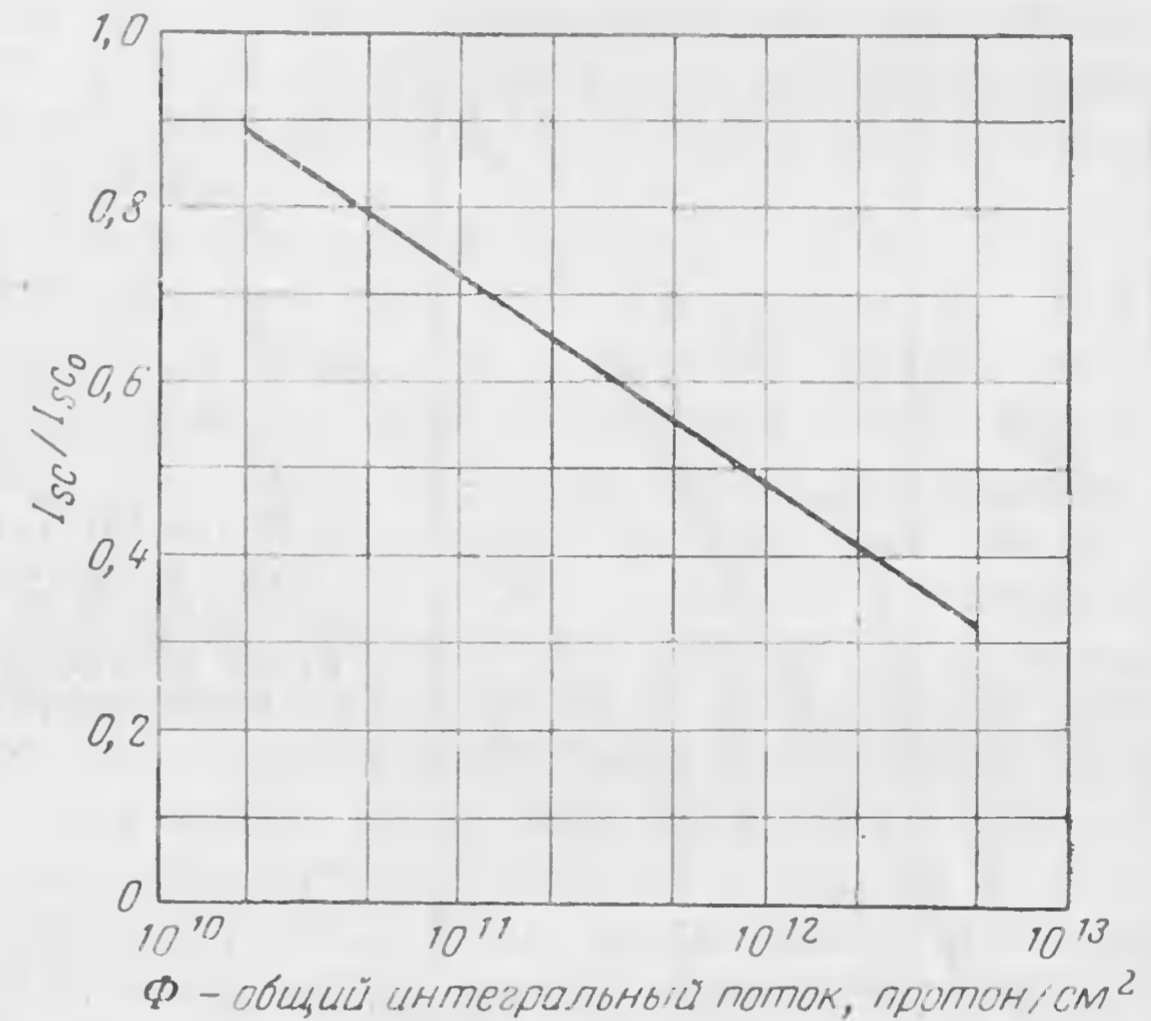
Фиг. 14. Радиационные пояса Земли.

материале, вызванная космическими лучами, составляет $1 \text{ миллирентген/час}$ и не может существенно влиять на работу ИСЗ.

Достаточно полная карта ионизирующего излучения, улавливаемого магнитным полем Земли, была создана по результатам, полученным в опытах с ИСЗ «Эксплоурер-6» (фиг. 14). Из этих данных и проделанных ранее измерений можно сделать вывод о наличии двух основных поясов радиации — внутреннего пояса, состоящего главным образом из протонов с высокой энергией, и внешнего пояса, состоящего в основном из электронов с малой энергией.

Механизм основных повреждений, вызываемых излучением, заключается в ионизации и смещении атомов облу-

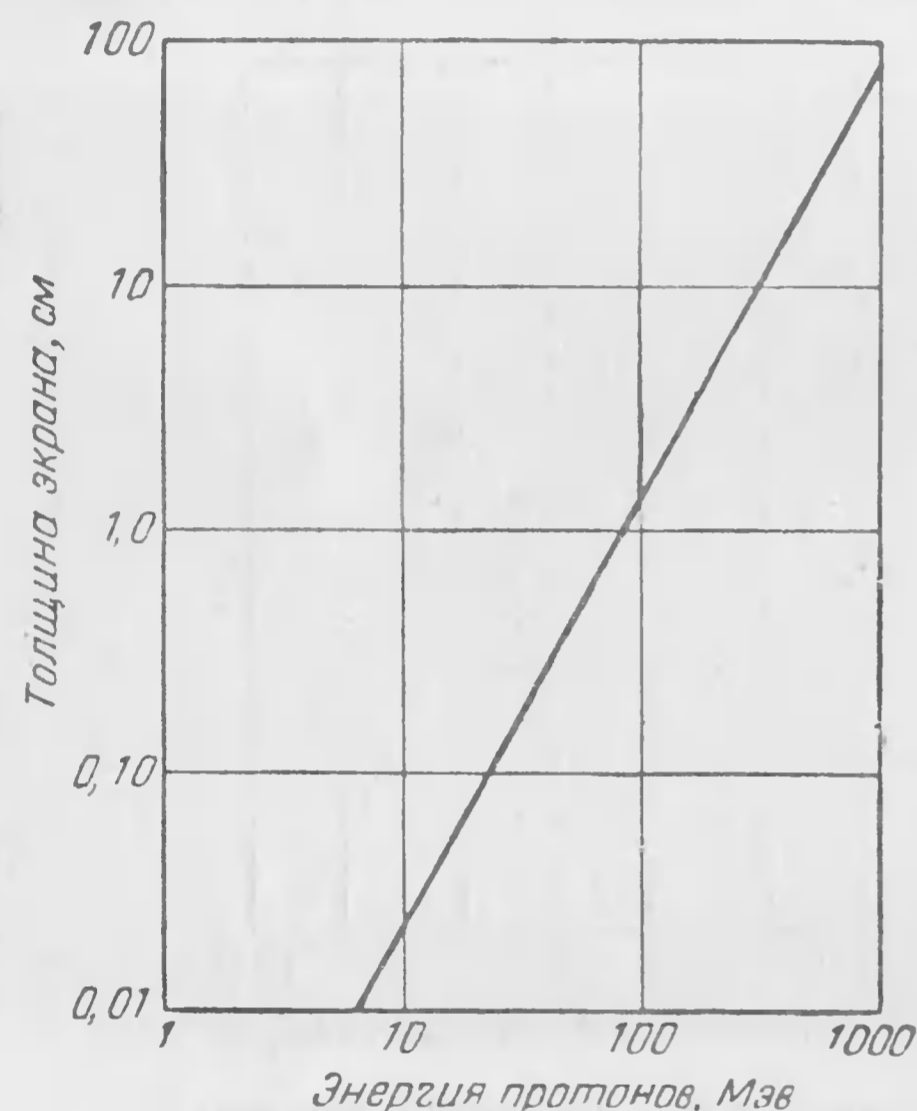
ченного материала, в результате чего возникают изменения электрической проводимости и физических свойств материала. Экранировка от электронов, обладающих малой энергией, встречающихся в космосе повсюду, почти не требует увеличения веса, однако экранировка против воздействия протонов с большой энергией во внешнем поясе радиа-



Фиг. 15. Уменьшение тока короткого замыкания при воздействии протонов с энергией 740 Мэв .

ции почти невозможна. Плотность потока протонов с энергиями $20\text{—}75 \text{ Мэв}$ может достигать $10^4\text{—}10^6 \text{ протонов/см}^2 \cdot \text{сек}$ на высотах от 1850 до $18\,500 \text{ км}$. Протоны с наивысшими энергиями (700 Мэв и больше) встречаются на высотах от 3700 до 7400 км . Повреждения, которые могут быть вызваны этим излучением, иллюстрируются фиг. 15. Кривая характеризует изменение тока короткого замыкания кремниевых солнечных батарей до и после облучения протонами с энергией 740 Мэв [1]. Интегральный поток плотностью всего $7,5 \cdot 10^{10} \text{ протон/см}^2$ при энергии 740 Мэв приводит к уменьшению тока батареи на 25%. При плотности потока $10^{12} \text{ протон/см}^2$ ток уменьшается на 50%.

Защита от излучений может быть обеспечена соответствующей экранировкой. Экранировка, требуемая для защиты от протонов, обладающих высокими энергиями, может быть найдена из графика фиг. 16. Очевидно, что защита от повреждений, вызываемых протонами, встречающимися во внутреннем поясе радиации, требует наличия экрана из наиболее



Фиг. 16. Толщина экрана, необходимая для защиты от воздействия протонов с высокими энергиями.

эффективного против протонов материала толщиной по меньшей мере 25 см. Отсюда следует, что единственным надежным способом защиты связных ИСЗ от повреждения потоком протонов является выбор орбиты, проходящей ниже или выше внутреннего пояса радиации. Это означает, что ИСЗ должен находиться на высотах ниже 1850 км или выше 18 500 км.

Таким образом, из сказанного выше следует, что высота, равная примерно 9000 км, является довольно четкой границей, разделяющей требования, предъявляемые к сложности систем связных ИСЗ, с одной стороны, и к количеству ИСЗ, необходимых для обеспечения заданного перекрытия, с другой стороны. На высотах от 1850 до 9000 км активный связной ИСЗ не может долго работать. Если высота менее

1850 км, то требования будут выполнены при ненаправленных антеннах и относительно простых подсистемах ИСЗ. Поскольку межконтинентальная видимость обеспечивается при наименьшей высоте порядка 3 700 км, то можно сделать вывод, что активные ИСЗ, находящиеся на низких орбитах и использующие полупроводниковые приборы, непригодны. В любом случае при круговых орбитах с высотой 1 850—3 700 км потребуются сотни ИСЗ для обеспечения надежного обслуживания. Поддержание работоспособности системы потребует производить ежегодно запуск большого количества ИСЗ.

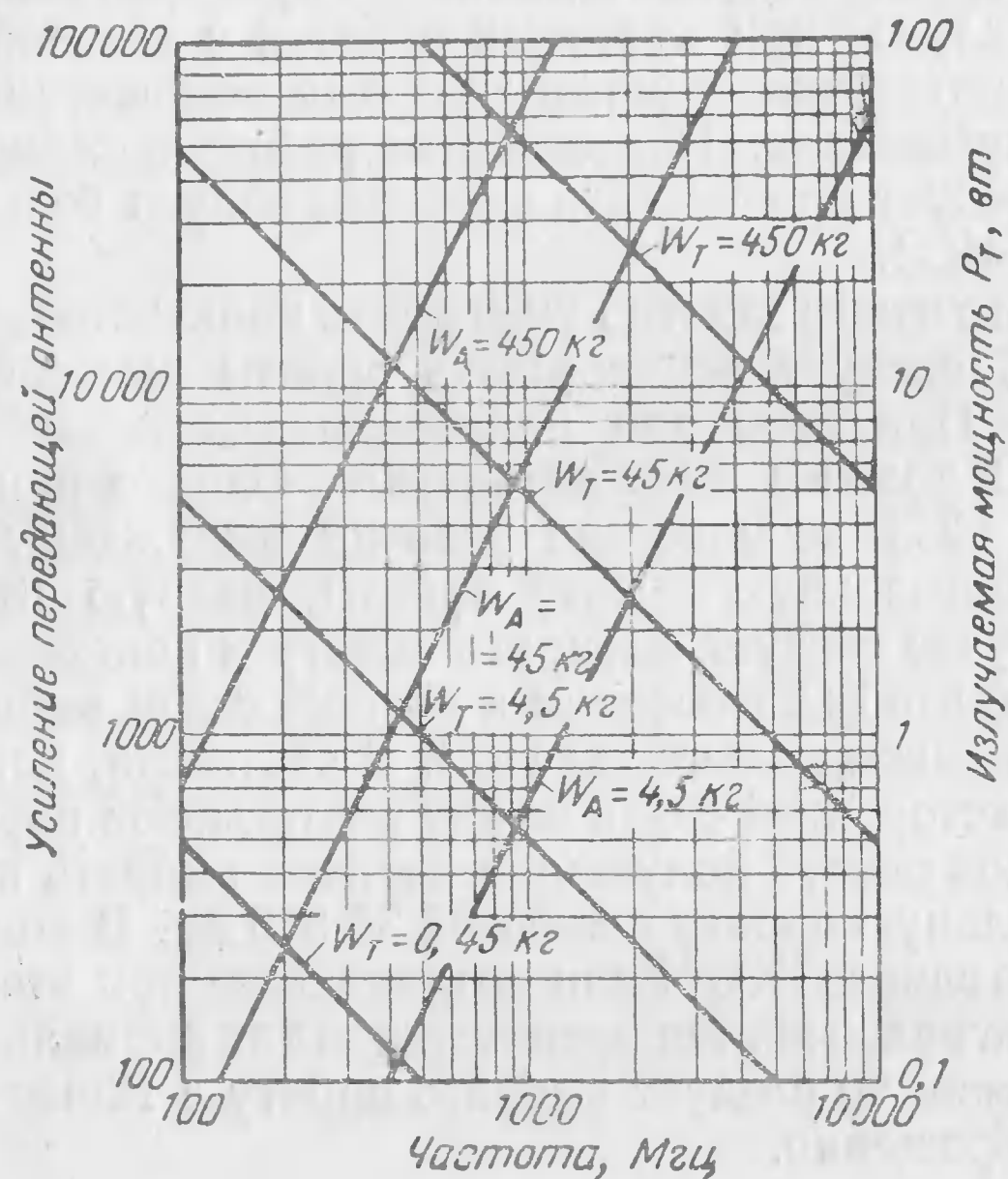
Для того чтобы заметно уменьшить количество запускаемых ИСЗ, следует использовать орбиты высотой более 9 000 км. При этом для получения высококачественной связи ИСЗ должны быть активными. Однако при выборе активных ИСЗ космические условия вынуждают использовать минимальную высоту орбиты, равную 18 500 км. В этом случае следует выбирать высоту и положение орбиты такими, чтобы требования к системе связи выполнялись при наименьшем количестве ИСЗ. В частности, для обеспечения двухсторонней связи между почти любой парой крупных городов одного полушария логично выбрать круговую экваториальную орбиту с высотой 35 810 км. В этом случае достаточно одного ИСЗ. Если возникающее при этом запаздывание сигналов явится препятствием для нормальной телефонной связи, то следует выбрать орбиту с 12-часовым периодом обращения.

5. Выбор частоты

Определяющей при выборе частоты является среда и ее характеристики. ИСЗ, находящиеся в течение длительного времени на геоцентрической орбите, должны обеспечивать связь с Землей при наличии всевозможных радиозумов неба, включая шумы Солнца. На Земле на выбор частоты влияют тепловые шумы, вызываемые температурой Земли, и затухание в атмосфере.

Проблема выбора оптимальной частоты для космической связи уже исследовалась [6]. Основные ограничения проиллюстрированы на фиг. 17. Для связных ИСЗ с ненаправленными антеннами оптимальная частота передачи с земли на

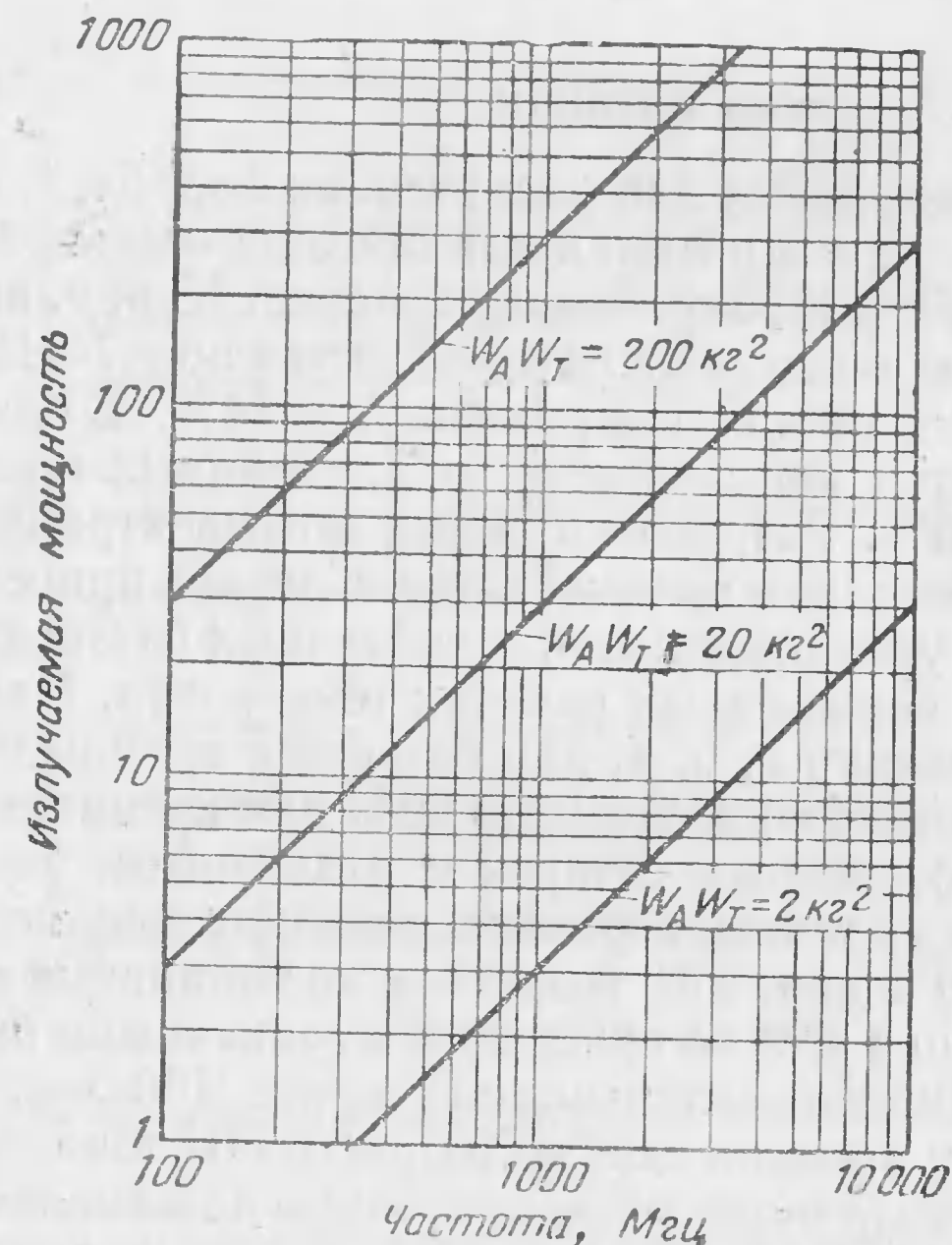
ИСЗ составляет 400 Мгц, в то время как частота передачи со спутника на Землю вследствие шумов галактики должна быть выше 1 000 Мгц. В случае направленных антенн и пассивных ИСЗ оптимальная частота с точки зрения влияния окружающей среды на передачу должна лежать между 1 000



Фиг. 17. Зависимость усиления антенны ИСЗ от частоты при трех значениях ее веса W_A и излучаемой мощности P_T для четырех значений веса передатчика.

и 10 000 Мгц. Другим фактором, влияющим на выбор частоты, является зависимость веса от характеристик оборудования связных subsystem ИСЗ. В недавно проведенных опытах с высокочастотными элементами получены определенные соотношения между такими параметрами, как усиление, частота и вес передатчика, включая источники питания и приборы регулирования температуры. Эти соотношения графически изображены на фиг. 17. По сути дела, эти кривые являются выражением того факта, что усиление

антенны пропорционально квадрату ее диаметра, выраженному в длинах волн, вес антенны пропорционален ее площади, а вес источников питания увеличивается с частотой из-за уменьшения к. п. д. передатчиков. В настоящее время можно получить к. п. д. 50—80% для передатчиков,



Фиг. 18. Зависимость излучаемой мощности от частоты для трех значений веса, приходящегося на передающие антенны и передатчики.

работающих на частотах ниже 1 000 Мгц, и 50—10% на частотах выше 1 000 Мгц.

Произведение излучаемой мощности на усиление антенны дает эффективную излучаемую мощность, зависимость которой от частоты приведена на фиг. 18. Очевидно, что на частотах до 10 000 Мгц, на которых используются направленные антенны, увеличение частоты приводит к увеличению эффективной излучаемой мощности. На частотах выше 10 000 Мгц невозможность выполнения возрастающих тре-

бований к механическим допускам приводит к погрешности при использовании кривых фиг. 18. Жесткие механические допуски и увеличение затухания в атмосфере на частотах выше 10 000 Мгц ограничивают верхний предел диапазона связных ИСЗ частотой порядка 10 000 Мгц.

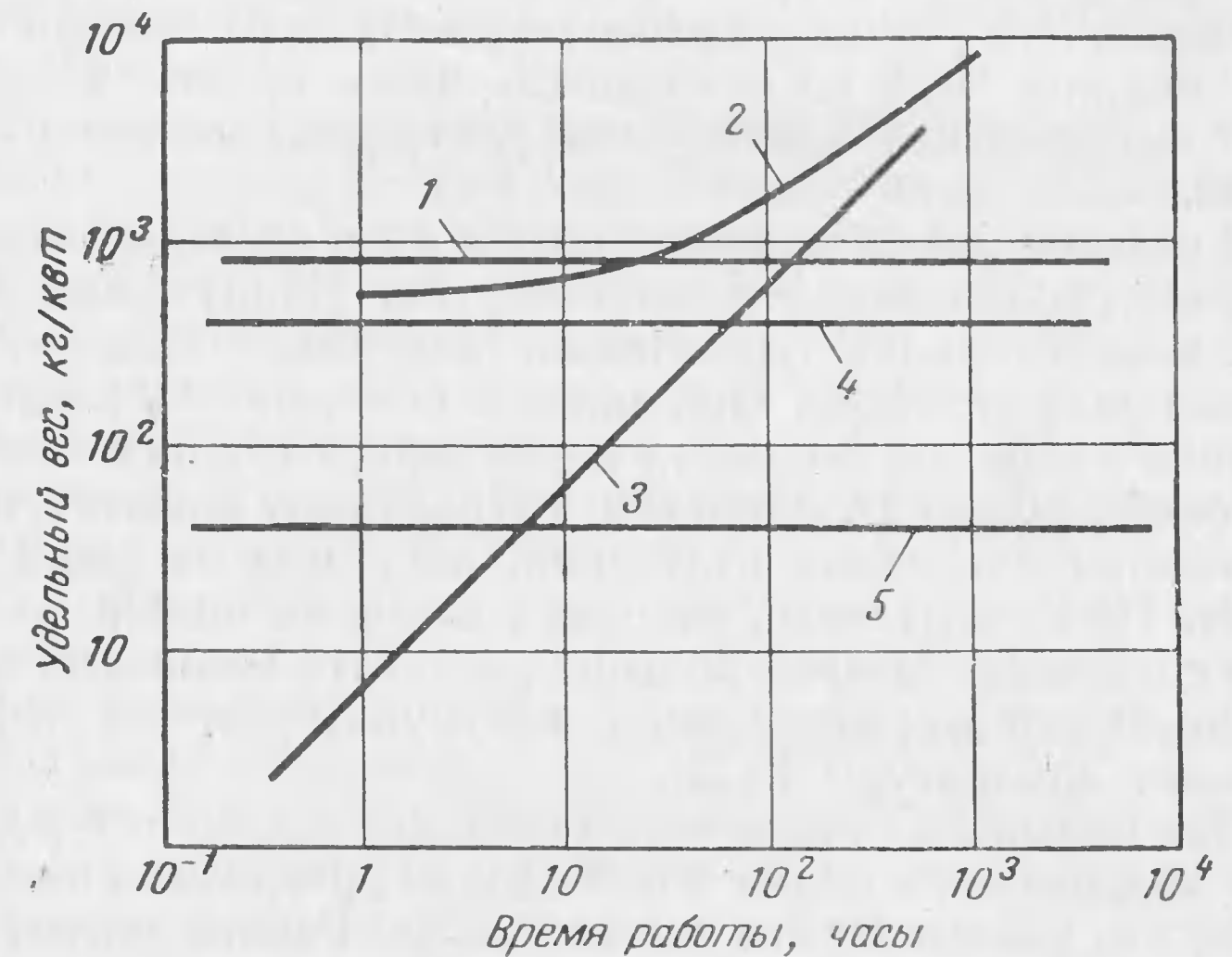
6. Выбор источников питания

В настоящее время для космических кораблей, нуждающихся в источниках питания для продолжительной работы, производятся серийно солнечные батареи. К. п. д. имеющихся кремниевых солнечных батарей составляет 7—12%. В лабораториях получен к. п. д., близкий к 14%. В ближайшие годы ожидается повышение к. п. д. серийных кремниевых батарей до 15%. Разработка новых фотоэлектрических материалов, таких, как арсенид галлия, может привести к существенному увеличению к. п. д. солнечных батарей, особенно в области повышенных рабочих температур. Максимальный теоретический к. п. д. для батарей с арсенидом галлия составляет примерно 25% вместо 20% для кремниевых батарей. Набор солнечных батарей с различными энергетическими уровнями также, вероятно, позволит повысить к. п. д.

Из фиг. 19 видно, что теоретически топливные элементы дают выигрыш в весе по сравнению с солнечными батареями при работе продолжительностью менее 100 час. Однако к настоящему времени еще не разработаны топливные элементы регенеративного типа, пригодные для использования на ИСЗ, и их разработка потребует еще несколько лет. При этом для связных ИСЗ рабочее время должно составлять по меньшей мере 10 000 час. На фиг. 19 приводится также сравнение современных солнечных коллекторов, используемых в качестве источников тепла для турбогенераторов, с набором ориентированных солнечных батарей.

В настоящее время считают, что турбогенераторы, использующие в качестве источника энергии для рабочей жидкости радиоактивные изотопы, в отношении веса будут иметь преимущество перед солнечными батареями. Недостатками ядерных устройств, используемых в качестве источников питания, является необходимость их экранировки для защиты остальной аппаратуры ИСЗ и опасность, которую они собой представляют во время запуска. Взрыв

в это время может привести к заражению стартовой площадки, если ИСЗ содержал ядерный источник питания. Но, пожалуй, главным препятствием является еще сравнительно ранняя стадия разработки ядерных источников питания, а отсюда и отсутствие уверенности в способности этих



Фиг. 19. Удельный вес различных источников питания для ИСЗ.

1 — солнечный коллектор; 2 — термоэлектрический преобразователь; 3 — топливные элементы; 4 — ориентированные солнечные батареи; 5 — ядерный турбогенератор.

источников обеспечивать надежную работу в течение длительных периодов времени.

Если солнечные батареи покрыть сверху стеклянными пластинами толщиной 1,65 мм, а сзади — слоем алюминия толщиной 0,68 мм, то этим достигается полная защита от электронов с энергией до 0,8 Мэв и протонов с энергией до 17 Мэв. Эта защита достаточна для любых орбит, за исключением тех, которые проходят через нижний земной пояс радиации. Представляется, что практически невозможно создать такую защиту, которая обеспечила бы работу ИСЗ в этой зоне продолжительностью более нескольких дней.

Модульная конструкция должна быть достаточно массивной, чтобы поддерживать температуру лопасти с батареями выше -130°C в течение двухчасового затенения¹⁾). Ультрафиолетовые и инфракрасные покрытия служат для уменьшения поглощения солнечной энергии в тех частях спектра, в которых чувствительность солнечных батарей ничтожна. Это уменьшает рабочую температуру лопасти при прохождении ИСЗ по освещенной части орбиты и защищает связывающее вещество от ультрафиолетового излучения.

С солнечными батареями должны быть связаны устройства аккумуляции электроэнергии. Наилучшими для этой цели являются герметически запаянные никель-кадмиевые аккумуляторы. Они должны обеспечивать электропитание в периоды затенения и в те периоды, когда солнечные батареи располагаются так, что получают недостаточное количество солнечного излучения, например во время запуска. При нормальных условиях во время полета по орбите солнечные батареи должны развивать мощность, достаточную как для подзарядки аккумуляторов, так и для питания аппаратуры ИСЗ.

При малых высотах орбиты (1 850 км) аккумулятор должен выдерживать около 6 000 зарядно-разрядных циклов в год, что уменьшает его долговечность. Работа аккумулятора в сильной степени зависит от его конструкции, внутренней температуры, глубины разряда при повторяющихся зарядно-разрядных циклах и способа зарядки. Для получения большой долговечности разряд в течение каждого цикла должен составлять только часть номинальной емкости аккумулятора.

Таким образом, мы приходим к выводу, что в настоящее время лучшим источником питания для связных ИСЗ является система солнечная батарея — аккумулятор. В дальнейшем, когда от источников питания потребуется большая мощность, а разработки успешно продвинулись вперед, одинаково перспективными станут ядерные источники питания и солнечные коллекторы.

¹⁾ На синхронной орбите могут иметь место затенения продолжительностью до 74 мин.

7. Стабилизация положения ИСЗ

Проще всего управлять положением ИСЗ, заставив его вращаться вокруг оси минимальной или максимальной инерции. Момент вращения приводит к тому, что ось вращения оказывается фиксированной в инерциальном пространстве. Этот метод успешно использовался в первых ИСЗ, таких, как «Пионер-5».

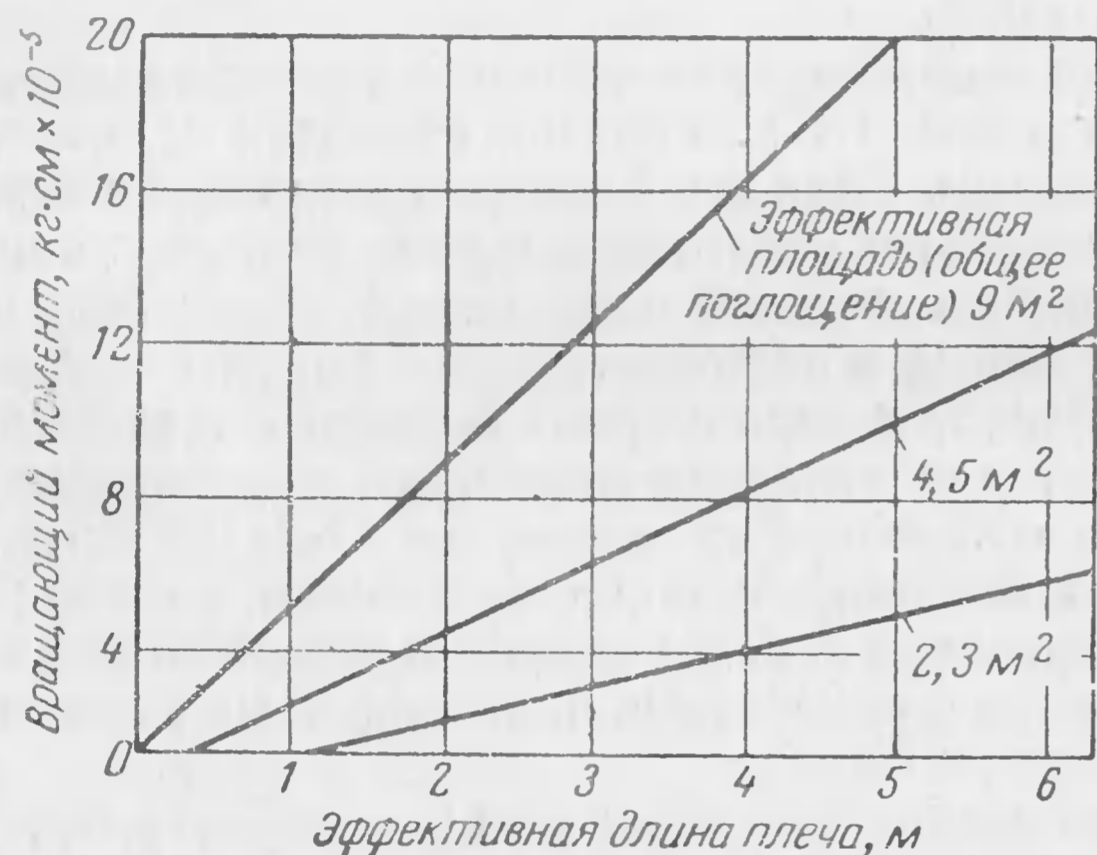
Однако использование вращения в качестве метода стабилизации связных ИСЗ на больших высотах не представляется практичным. Если ось вращения направлена вдоль местной земной вертикали, то необходимо иметь постоянный импульс, обеспечивающий прецессию ИСЗ на 360° в сутки. При возможных в настоящее время импульсах такая прецессия потребует недопустимо большого увеличения веса. Например, для создания типичного углового момента в $400\text{ кг}\cdot\text{м}\cdot\text{сек}$ потребуется импульс в $1,3\cdot 10^6\text{ кг}\cdot\text{сек}$. Кроме того, при стабилизации оси вращением по направлению земной вертикали к. п. д. солнечных батарей будет в лучшем случае составлять 25% от к. п. д. солнечных батарей, ориентированных на Солнце.

Ориентация оси вращения на Солнце потребует прецессии оси вращения со скоростью всего один оборот в год плюс скорость, необходимая для компенсации регрессии узловых точек орбиты. Она позволяет получить такой же к. п. д. солнечных батарей, как при ориентированных лопастях с батареями. Однако в этом случае возникает необходимость в отдельных системах ориентации антенн ИСЗ, что приводит к увеличению веса.

В дополнение к весу системы, необходимой для ориентации антенны, поддержание ориентации оси вращения ИСЗ весом 654 кг в направлении на Солнце в течение года потребует пневматического импульса примерно в $3\,270\text{ кг}\cdot\text{сек}$, что эквивалентно использованию в оптимальной системе 130 кг азота.

Ориентация оси вращения в направлении нормали к плоскости орбиты ИСЗ является компромиссом между указанными выше двумя системами ориентации, но и в этом случае требуется весьма значительное увеличение веса для компенсации уменьшения усиления антенны и к. п. д. источников питания. К. п. д. солнечных батарей при такой

ориентации будет составлять на экваториальной орбите в лучшем случае 28%. При долговечности ИСЗ, равной 1 году, в результате чередования экваториальных орбит и орбит, имеющих затененные участки, к. п. д. уменьшится до 22%. На полярной орбите максимальный к. п. д. солнечных батарей при ориентации их на Солнце будет составлять 25%.

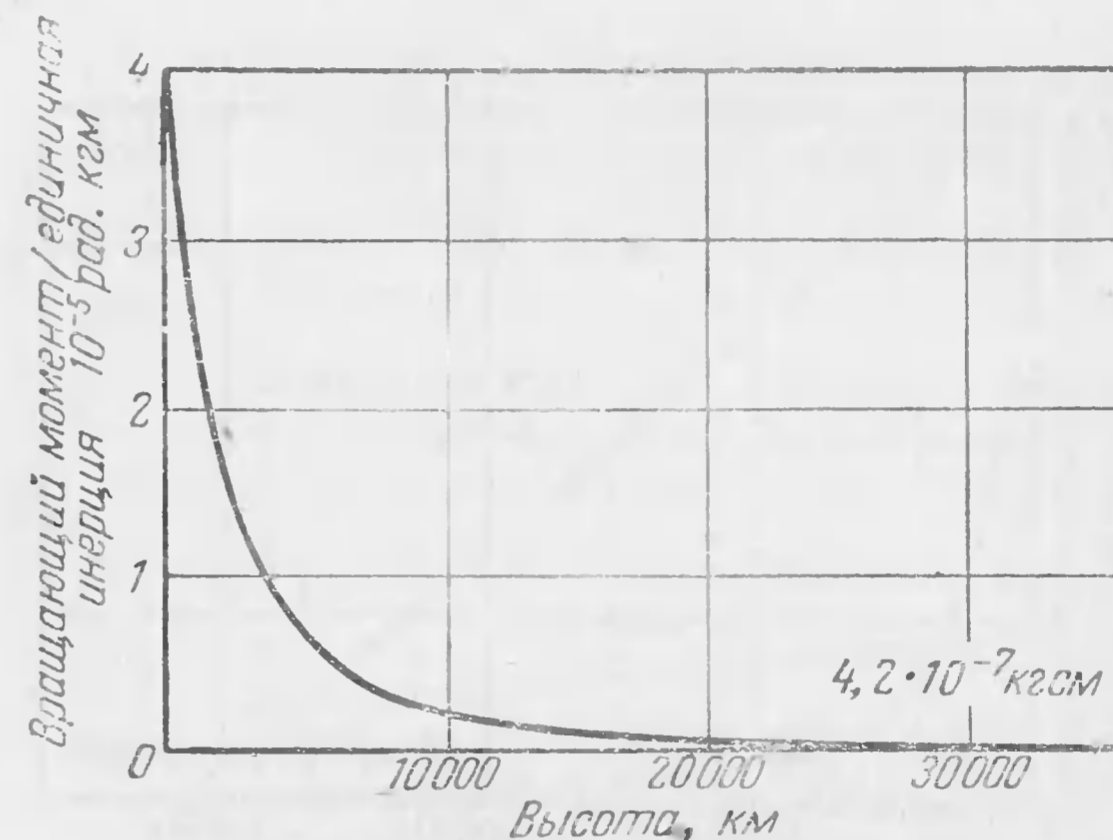


Фиг. 20. Зависимость вращающего момента, возникающего под действием солнечной радиации, от площади и длины плеча.

При вращении ИСЗ вокруг Земли на него действуют различные силы: солнечное излучение, гравитационное поле, магнитное поле, микрометеориты, внутренние вращающиеся части и атмосферное торможение. Каждая из этих вращающих сил, за исключением тех, которые возникают под действием микрометеоритов, совместно с маломощными реактивными двигателями может использоваться для получения управляющих моментов или же все эти силы могут рассматриваться как возмущающие, и их влияние должно преодолеваться некоторой другой системой, порождающей моменты вращения.

Были изучены вопросы использования солнечного излучения для образования таких моментов вращения. Между центром давления, создаваемого солнечным излу-

чением, и центром тяжести ИСЗ можно поместить рычаг с укрепленной на нем большой поверхностью, часто называемой «солнечным парусом». Требуемая длина плеча рычага для получения достаточного вращающего момента под действием солнечного излучения показана на фиг. 20. Этот момент можно регулировать либо вращением ИСЗ, либо изменением положения «паруса». Необходимые размеры

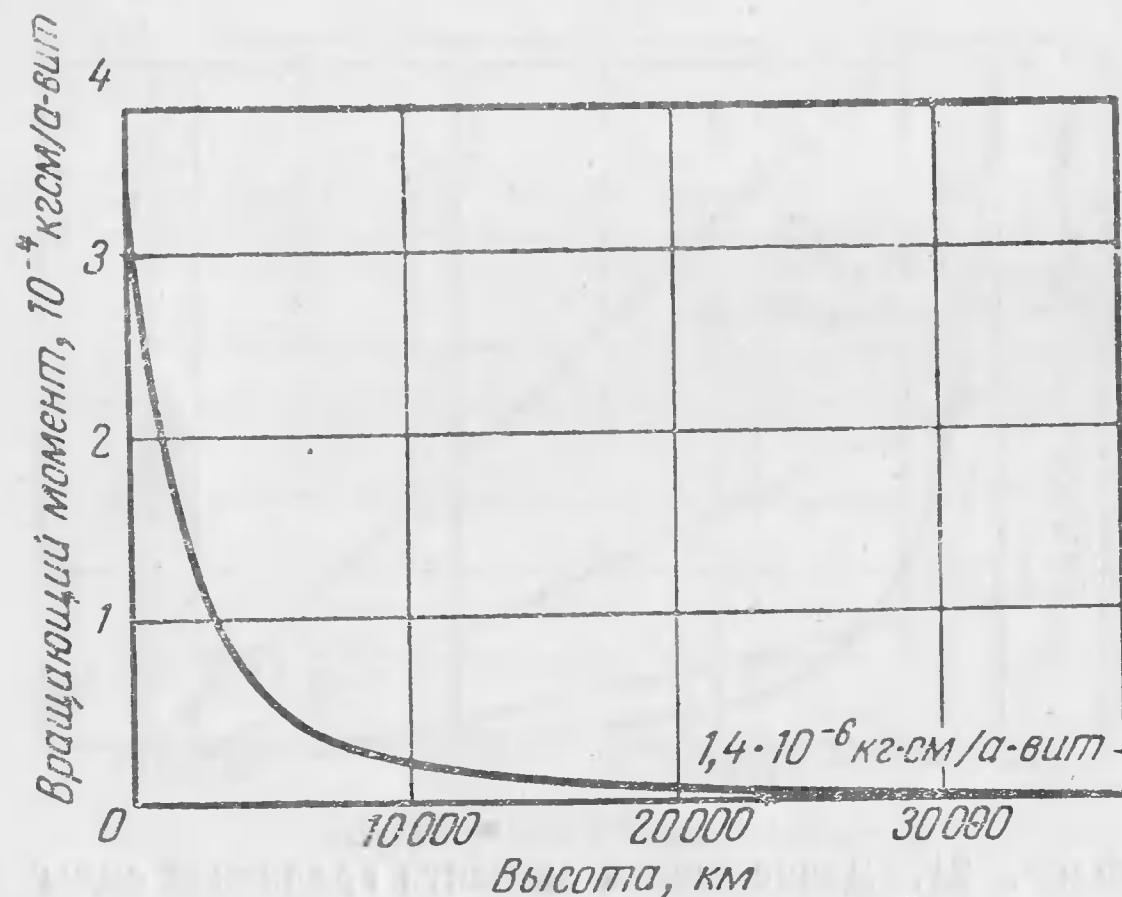


Фиг. 21. Зависимость момента градиента силы тяжести от высоты.

«паруса», проблемы упаковки его на период запуска и необходимость управления его положением в периоды затенения делают этот метод практически непригодным для использования в системе ориентации связных ИСЗ.

ИСЗ с несимметричными главными моментами инерции будет иметь тенденцию занимать такое положение, при котором его минимальная ось будет направлена вдоль местной земной вертикали, что является результатом наличия градиента вектора гравитации по длине тела спутника. Это означает, что если сила тяжести действует не вдоль линии, проходящей через центр тяжести, то возникает момент, стремящийся повернуть ИСЗ. Этот момент можно использовать для стабилизации ИСЗ в том случае, если в его конструкции это обстоятельство предусмотрено. Влияние градиента весьма заметно на малых высотах (ниже 550 км).

В спутнике «Мидас» градиент силы тяжести успешно используется для ориентации относительно Земли. Это явление быстро ослабевает с высотой и на высотах более 1850 км его очень трудно использовать. Зависимость моментов вращения, возникающих под действием градиента силы тяжести, от высоты приведена на фиг. 21. Поскольку



Фиг. 22. Взаимодействие контура, обтекаемого током, с магнитным полем Земли.

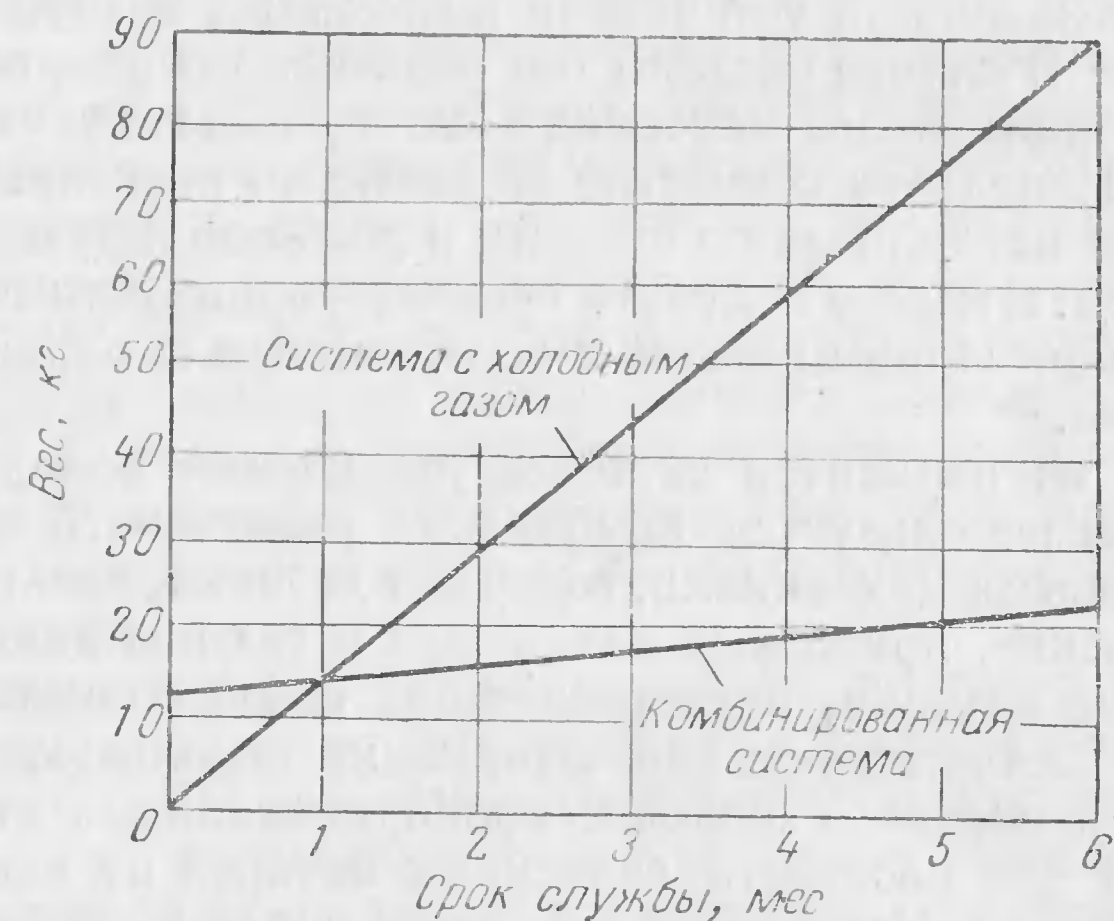
реальный связной ИСЗ должен находиться на большой высоте, этот метод стабилизации также представляется непригодным.

Исследования, основанные на изучении магнитных систем демпфирования вращения метеорологических спутников «Тирос» 1 и 2, показали, что имеется возможность использования магнитного поля Земли для получения управляющих моментов вращения. Поскольку напряженность магнитного поля на больших высотах очень мала, то для получения достаточного вращающего момента пришлось бы использовать весьма длинные магнитные диполи. Зависимость вращающего момента от высоты приведена на фиг. 22.

На малых высотах, 185 км и ниже, в качестве источника вращающего момента можно использовать молекулы воз-

духа, однако тот источник нельзя использовать на больших высотах. Кроме того, такой метод потребует переменной ориентации солнечных батарей по отношению к плоскости орбиты.

Возможно также управление положением ИСЗ с помощью вращающих моментов, создаваемых реактивными силами



Фиг. 23. Зависимость веса от срока службы для системы управления положением, использующей реактивные роторы и комбинацию реактивных роторов и холодного газа.

(выбрасывание под давлением холодных или горячих газов, применение ионных или плазменных двигателей). Среди методов, использующих реактивные силы, наиболее широко используются системы выбрасывания холодных газов, поскольку они полнее изучены и более надежны. Однако такие системы требуют большего веса, чем комбинированная система с холодным газом и реактивными маховиками (имеются в виду космические корабли с большой долговечностью). На фиг. 23 представлена зависимость между весом ИСЗ и его долговечностью в случае использования системы только с холодным газом или системы с комбинацией газа и реактивных маховиков.

Инерциальный маховик, раскручиваемый мотором, обеспечивает накопление момента, который может использоваться либо для демпфирования, либо для накопления периодических изменений возмущающих моментов. Комбинация реактивного маховика и системы реактивного выброса исключает необходимость выбрасывания газа во время периодических изменений вращающего момента и обеспечивает возможность устранения постоянных возмущающих моментов. В случае системы без реактивного выброса размеры инерциального маховика и его привода будут очень велики. Используя совместно способность реактивных маховиков к накоплению момента и реакцию истечения холодного газа, можно получить систему управления положением с минимальным весом и долговечностью порядка одного года.

Один из вариантов системы управления положением, в котором используется комбинация реактивного выброса с реактивными маховиками, содержит датчики, электронное оборудование, приводные механизмы и газ под давлением. Солнечные датчики, представляющие собой солнечные батареи с соответствующими шторками, используются для получения сигналов ошибки, пропорциональных отклонению ИСЗ или плоскости солнечных батарей от направления на Солнце. Устройства, чувствительные к инфракрасному излучению, используются для обнаружения Земли. Электронные устройства обеспечивают необходимое усиление и обработку сигналов, а также логические операции, необходимые для приведения в действие источников вращающего момента или приводных механизмов. Вращающие моменты создаются пневматическими газовыми струями и инерционными маховиками, раскручиваемыми небольшими серводвигателями. Благодаря свойству маховика накапливать момент количества движения используются периодические вращающие моменты, возникающие в результате возмущений и изменений орбитальной скорости. Струи азота вызывают появление моментов, необходимых при нулевых начальных скоростях и для противодействия постоянным возмущающим моментам.

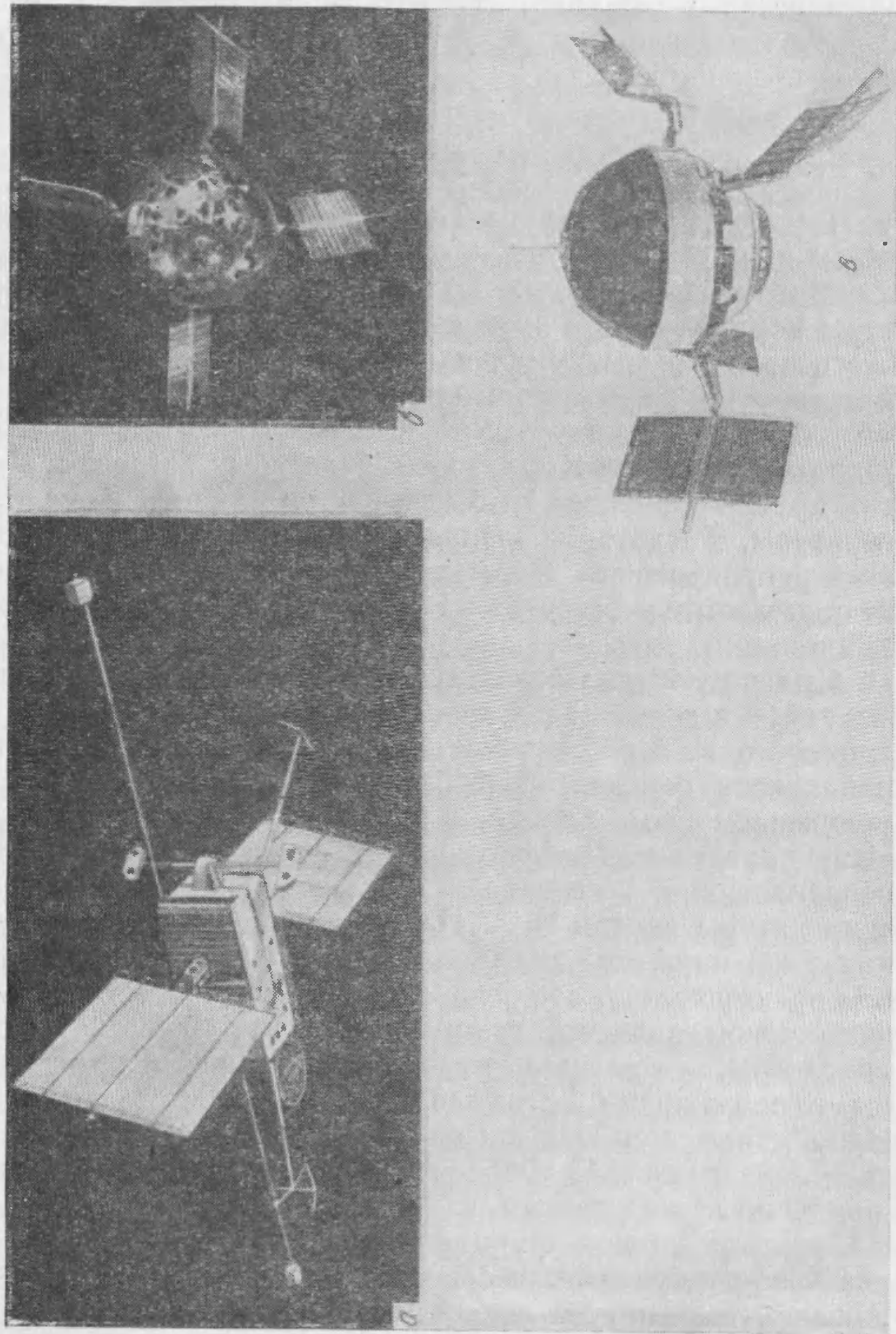
Лопать, на которой расположены солнечные батареи, снабжена сервосистемами и приводными механизмами для обеспечения ее правильного положения относительно осей

космического корабля. Герметически запаянный блок с серводвигателями и редуктором управляет ориентацией солнечных батарей.

8. Регулирование температуры

Температуру связного ИСЗ следует выбирать такой, чтобы для его элементов и subsystem обеспечивались благоприятные окружающие условия. Поддержание температуры корпуса ИСЗ в пределах 10—25° С создает условия, обеспечивающие минимальную частоту возникновения неисправностей элементов, что является весьма существенной чертой систем, долговечность которых должна измеряться годами. К. п. д. аккумуляторов, солнечных батарей и многих других элементов ИСЗ изменяется с изменением температуры. В некоторых случаях дополнительный вес устройства регулирования температуры благодаря оптимизации к. п. д. некоторых агрегатов ИСЗ приводит в конечном счете к экономии веса.

Существуют два основных метода регулирования температуры в космосе: пассивный, при котором внешняя поверхность ИСЗ рассчитывается таким образом, чтобы устанавливался определенный баланс между поглощением и излучением света и тепла, и активный, при котором изменение внутренней температуры приводит в действие систему регулирования, обеспечивающую поддержание неизменной температуры внутри ИСЗ. Пассивный метод, который был применен на спутнике «Пионер-5» (фиг. 24), имеет очевидное преимущество, заключающееся в его простоте, но его недостатком является то, что изменение свойств поверхности ИСЗ со временем приводит к изменениям температуры его поверхности. Активный метод также достаточно прост. Например, использовавшиеся в качестве датчиков термические лопасти на ИСЗ «Эйбл-5» (см. фиг. 24) были достаточно просты и так же надежны, как пассивная система. Но какой бы простой по конструкции активная система ни была, она требует большего веса, чем пассивная. Практически, конечно, температура любой поверхности в космосе определяется временем ее облучения Солнцем и другими излучающими телами, отношением излучаемой этой поверхностью энергии к поглощаемой и ее тепловым контактом с корпу-



Фиг. 24. Внешний вид трех ИСЗ, иллюстрирующий методы регулирования температуры.

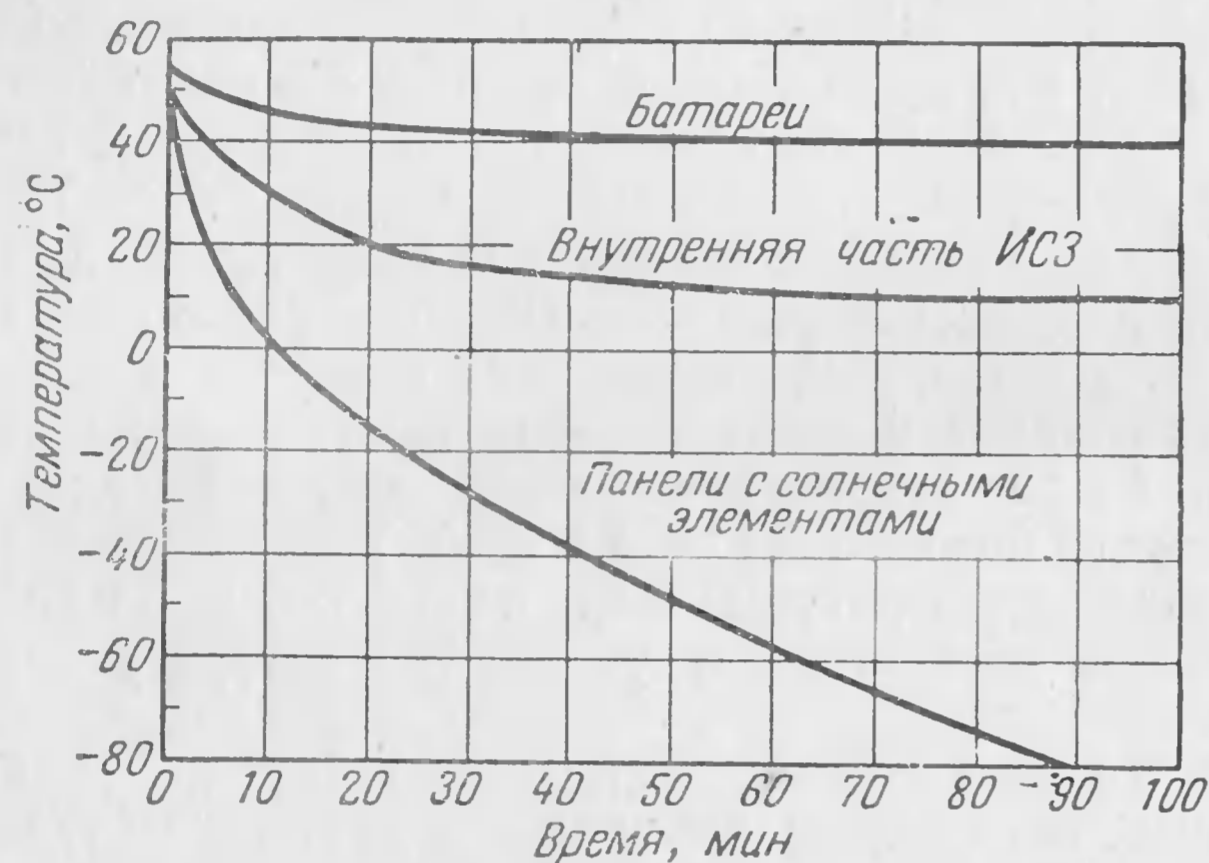
сом космического корабля. Устройство любой системы регулирования температуры в космосе основано на поглощении и излучении тепла поверхностями.

Если ориентация связного ИСЗ относительно Солнца регулируется, что по ряду причин желательно, то проблема регулирования температуры значительно упрощается. Те части ИСЗ, которые никогда не обращены к Солнцу, могут использоваться в качестве эффективных излучателей тепла, в то время как другие части поверхности могут быть изолированы. Система регулирования температуры, основанная на этом принципе, состоит всего из трех частей: изоляции, жалюзи на затененной части и соответствующим образом подобранных поверхностей. Поскольку ИСЗ всегда будет рассеивать тепло, выделяемое заключенными в нем приборами, то это тепло можно использовать для поддержания температуры выше некоторого желательного минимума, включая периоды пребывания ИСЗ в тени. Такой принцип регулирования температуры был использован на ИСЗ-геофизической обсерватории, устройство которого показано на фиг. 24.

Две боковые стенки ИСЗ, перпендикулярные панели солнечных батарей, используемые в качестве излучающих поверхностей, могут быть выполнены в виде сотовой структуры из алюминия, обладающего хорошей теплопроводностью. Толщина этой структуры должна быть достаточной для распределения внутреннего тепла равномерно по всей поверхности. Основные требующие рассеивания тепла приборы управления положением, телеметрии и связи могут быть смонтированы непосредственно на этих боковых стенках. Внешние поверхности могут быть покрыты материалом, у которого излучательная способность в ИК-части спектра соответствует черному телу.

Регулирование излучения может осуществляться с помощью температурных датчиков и системы жалюзи. Жалюзи покрыты полужеркальным материалом с высоким коэффициентом отражения, например листовым алюминием или алюминием, распыленным в вакууме. Они могут поворачиваться при помощи рычажного механизма, приводимого в действие системой привода, наполненной жидкостью, например, пентаном, имеющим высокий коэффициент объемного теплового расширения. Приводная система сое-

динена с трубкой, наполненной рабочей жидкостью, прикрепленной к внутренней стороне излучающих пластин. Длина и расположение трубки подобраны таким образом, что система реагирует на среднее значение температуры пластин. Колебания температуры пластин преобразуются в изменение положения жалюзи из-за изменения объема жидкости.



Фиг. 25. Зависимость температуры ИСЗ от времени на теневой части орбиты.

Этим обеспечивается надежное автоматическое регулирование температуры ИСЗ, которое обеспечивает поддержание постоянства температуры (когда ИСЗ не находится на теневой части орбиты) в пределах $\pm 2^\circ \text{C}$. На теневой части орбиты температура зависит от мощности, рассеиваемой внутри ИСЗ. Типичный пример ожидаемых изменений температуры ИСЗ приведен на фиг. 25.

Разработка «суперизоляции» оказалась очень полезной для космических кораблей. Внешние поверхности корпуса ИСЗ, за исключением двух сторон, используемых в качестве излучателей, должны быть изолированы с помощью такого материала. Принцип суперизоляции заключается в создании большого количества излучающих экранов, поверхность которых плохо поглощает и излучает энергию. Эти экраны обычно представляют собой тонкие листы алюминия или искусственной пленки (милара) с нанесенным

на них с двух сторон в вакууме алюминием. Они разделены материалом с плохой теплопроводностью, например, стекловолокном. Типичная конструкция состоит из 12—15 чередующихся слоев стекловолокна и алюминиевой фольги толщиной 0,6 мм. Все это потом помещается в кожух, и для наземных применений в упаковке поддерживается вакуум. В космосе вакуум поддерживается автоматически.

Части ИСЗ, расположенные вне его корпуса, как-то: солнечные батареи и антенны, — обычно управляются пассивными средствами. Использование в солнечных батареях кварцевых или стеклянных экранов с нанесенным на них в вакууме фильтром может обеспечить поддержание их температуры ниже той, которая может ухудшить их работу, в то время как в теневой части орбиты может поддерживаться минимальная температура, исключая повреждение батарей, благодаря достаточной теплоемкости поддерживающих конструкций.

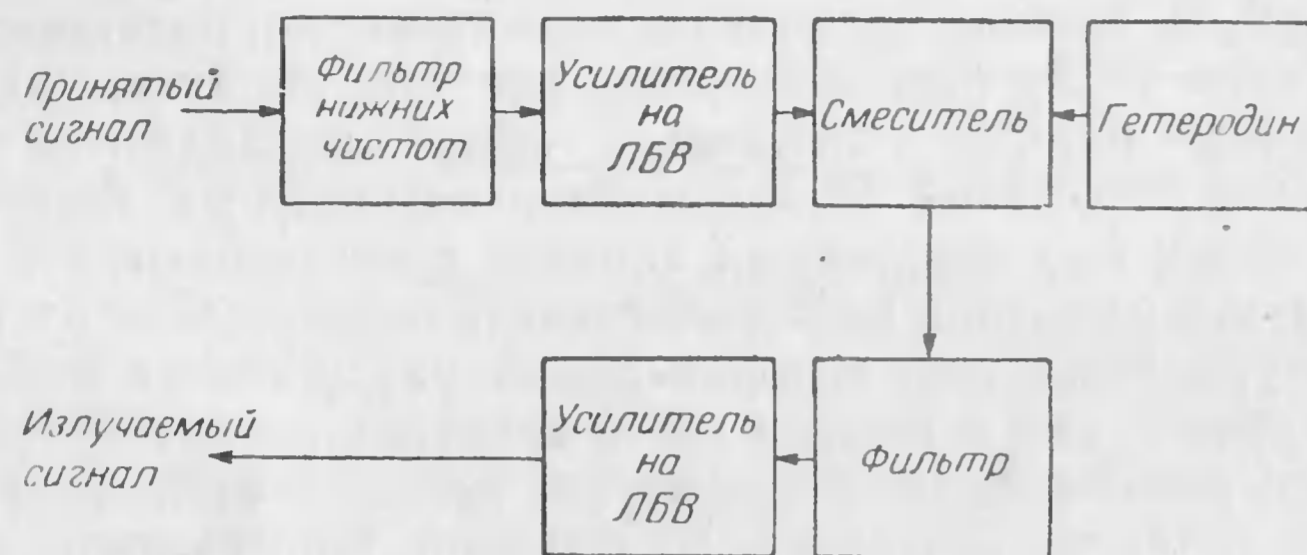
Сравнение описанных выше систем с другими возможными вариантами привело нас к выводу, что комбинация пассивных и активных систем регулирования температуры обеспечит при заданном весе наиболее устойчивую температуру важнейших элементов ИСЗ и может надежно действовать в условиях космоса в течение длительного времени.

9. Системы связи

Ретранслятор на связном ИСЗ должен иметь усилитель, способный принимать с Земли очень слабые сигналы, усиливать их, преобразовывать их частоту и затем опять усиливать для передачи на Землю. Антенная система может состоять из простого диполя или из антенны направленного действия, постоянно обращенной к Земле.

В разд. 2, в котором рассматривались различные системы связи, было показано, что оптимальная активная система связи должна содержать широкополосный ретранслятор, приспособленный к работе при различных видах модуляции. Наличие ЛБВ с шириной полосы пропускания в 100 МГц, с высокой надежностью, малым весом и достаточной выходной мощностью делает возможным реализацию такой системы уже в настоящее время.

Одна из возможных блок-схем такого ретранслятора приведена на фиг. 26. Принимаемые сигналы проходят через фильтр и поступают на первый усилитель, собранный на ЛБВ. Фильтр исключает обратное воздействие сигналов, ретранслированных системой, которые смещены по частоте

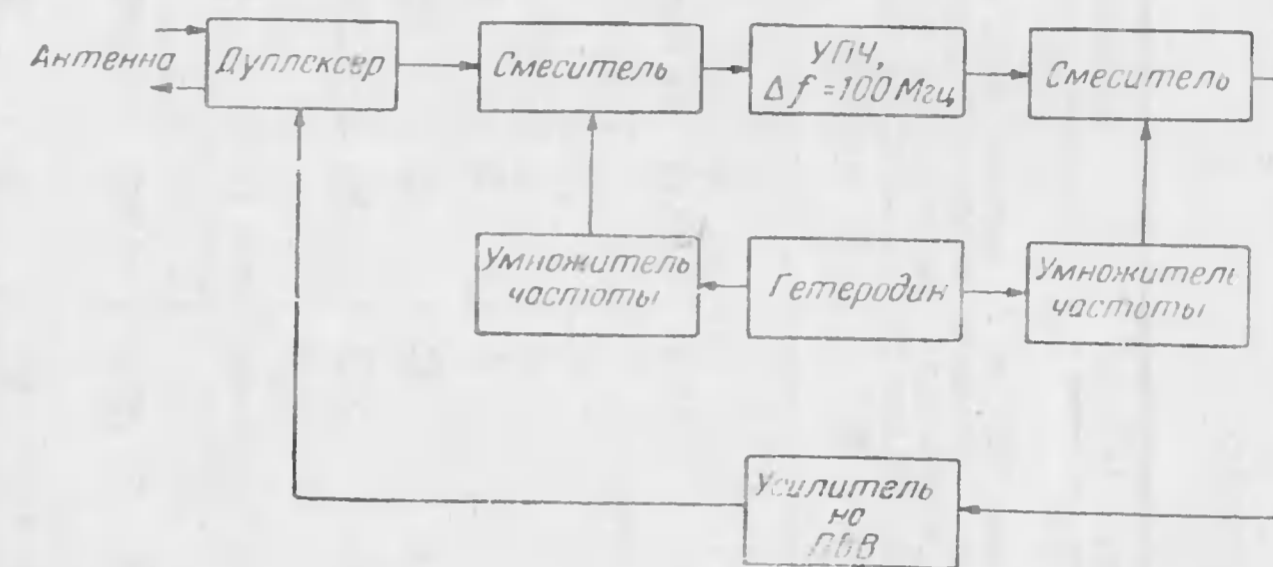


Ф и г. 26. Упрощенная блок-схема ИСЗ-ретранслятора.

относительно принятого сигнала. Первый усилитель на ЛБВ, работающий в недонапряженном режиме, определяет общий коэффициент шума системы ИСЗ. Усиленный выходной сигнал смешивается с напряжением гетеродина, получая необходимый сдвиг по частоте. Выходное напряжение смесителя фильтруется и подается на окончательный каскад усилителя на ЛБВ.

Если выбрана ЛБВ с полосой пропускания 10 Мгц, то прежде всего нужно сделать выбор между линейным усилением и нелинейным усилением с жестким ограничением. Выходной сигнал в последнем случае почти не зависит от уровня входного сигнала. Исследование работы усилителей с жестким ограничением показало, что они хорошо работают в качестве многоканальных усилителей сигналов, модулированных по частоте. Поскольку требования к мощности, стабильности вспомогательных систем, и, следовательно, к надежности при таком виде работы выше, то описанный вариант представляется целесообразным. Использование усилителя с жестким ограничением накладывает ограничение на возможные виды модуляции. Наиболее подходящими являются частотная модуляция, фазовая модуляция и различные виды импульсно-кодовой модуляции.

В другом варианте блок-схемы ретранслятора (фиг. 27) принимаемый сигнал при помощи гетеродина транспортируется в область промежуточных частот. После полупроводникового УПЧ стоит еще один смеситель, транспортирующий сигнал на частоту передачи (смещенную относительно частоты принимаемого сигнала). После смесителя снова включен усилитель на ЛБВ. Преимущество такой



Ф и г. 27. Блок-схема второго варианта ретранслятора.

схемы заключается в том, что основное усиление обеспечивается с помощью полупроводниковых приборов, потребляющих очень мало энергии и обладающих очень высокой надежностью. ЛБВ также используются в оптимальных условиях.

Следующим важным шагом является определение мощности. Очевидно, что она зависит от ряда факторов, в том числе от усиления наземной антенны, усиления антенны ИСЗ, высоты, уровня шумов, требуемого отношения сигнал/шум, уровня шума усилителей и других факторов.

В табл. 2 приведены результаты исследования возможных вариантов для линий Земля—ИСЗ и ИСЗ—Земля, которые в настоящее время представляются наиболее разумными. Основные соображения, на основании которых производился выбор параметров, приведенных в этой таблице, заключались в том, чтобы сделать активный ИСЗ наиболее простым и надежным. Надежность повышается за счет использования малой мощности, поскольку при этом повышается надежность лампы, передатчика, а также упрощается система питания и облегчается режим ее работы. По-

Таблица 2

Типичные характеристики связанных радиорелейных линий с использованием ИСЗ на 12 и 24-часовых орбитах

	12-часовая орбита			24-часовая орбита		
	антенна ИСЗ с шириной главного лепестка диаграммы направленности 25°	антенна ИСЗ с шириной главного лепестка диаграммы направленности 1°	антенна ИСЗ с шириной главного лепестка диаграммы направленности 20°	антенна ИСЗ с шириной главного лепестка диаграммы направленности 20°	антенна ИСЗ с шириной главного лепестка диаграммы направленности 1°	антенна ИСЗ с шириной главного лепестка диаграммы направленности 1°
Частота, Мгц	1000	10 000	1000	10 000	1000	10 000
Земля — ИСЗ:						
Излучаемая мощность, квт	1	1	1	1	1	1
Усиление антенны (диам. 18 м), дБ	42	62	42	62	42	62
Потери на распространение, дБ	180	200	180	200	185	205
Усиление антенны ИСЗ, дБ	16	16	44	44	18	44
Эффективная шумовая температура приемника, °К	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Отношение сигнал/шум на входе в полосу 20 Мгц ¹⁾ , дБ	29	29	57	57	26	52

Продолжение табл. 2

	12-часовая орбита			24-часовая орбита		
	антенна ИСЗ с шириной главного лепестка диаграммы направленности 25°	антенна ИСЗ с шириной главного лепестка диаграммы направленности 1°	антенна ИСЗ с шириной главного лепестка диаграммы направленности 1°	антенна ИСЗ с шириной главного лепестка диаграммы направленности 20°	антенна ИСЗ с шириной главного лепестка диаграммы направленности 1°	антенна ИСЗ с шириной главного лепестка диаграммы направленности 1°
Спутник — Земля:						
Излучаемая мощность, вт	1	1	1	1	1	1
Усиление антенны ИСЗ, дБ	16	16	44	18	44	44
Потери на распространение, дБ	180	200	180	185	205	205
Усиление наземной антенны (диаметром 18 м), дБ	42	62	42	42	62	62
Эффективная шумовая температура приемника, °К	20	20	20	20	20	20
Отношение сигнал/шум на входе (в полосе 100 Мгц), дБ	10	10	38	7	33	33
Отношение сигнал/шум на выходе (телевизионный канал 5 Мгц), дБ	35	35	63	32	58	58

¹⁾ Поляризационные и другие потери приняты равными 4 дБ.

этому мощность передатчика ИСЗ выбирается возможно более низкой, но такой, при которой можно получить стандартное для кабельных линий связи отношение сигнал/шум на выходе наземной приемной системы. Соответствующим образом подбираются остальные характеристики.

Эффективная мощность сигнала, излучаемого ИСЗ, может быть повышена путем увеличения мощности передатчика ИСЗ, повышения к. п. д. передатчика или увеличения усиления антенны. Для увеличения мощности передатчика необходимы более мощные источники питания с большим весом, а также более тяжелые и сложные механизмы для регулирования температуры. Все это в результате приводит к почти линейному увеличению веса ИСЗ с увеличением мощности (см. фиг. 3). Было показано, что долговечность усилительной аппаратуры является функцией уровня мощности, причем пределом, желательным в настоящее время, является уровень ниже 10 *вт*. Антенны ИСЗ с весьма большим коэффициентом усиления также могут быть получены лишь за счет увеличения веса и сужения полосы, что ограничивает облучаемую территорию и повышает требования к точности системы ориентации.

Усиление или направленность антенны ИСЗ определяется ее апертурой. С точки зрения полосы пропускания и веса наилучшей является, по-видимому, параболическая антенна. Размеры антенны ИСЗ являются, очевидно, функцией рабочей частоты и требуемой ширины диаграммы направленности. На частоте 8 000 *Мгц* параболическая антенна диаметром 11,5 *см* имеет ширину главного лепестка диаграммы направленности 20°, что обеспечивает запас ~2,5° по сравнению с углом 17,5°, под которым видна Земля с высоты синхронной орбиты. Ширина главного лепестка диаграммы направленности в 1° получается на частоте 8 000 *Мгц* при диаметре антенны 230 *см*. На частоте 2 000 *Мгц* для получения главного лепестка диаграммы направленности шириной 20° антенна должна иметь в диаметре 46 *см*.

Наконец, существует проблема, связанная с обеспечением наземных пунктов телеметрической информацией, характеризующей работу самого ИСЗ. Тщательное рассмотрение усложнений, возникающих при введении телеметрических сигналов в систему связи и, в частности, ограниче-

ний, накладываемых видом модуляции, с которым должна работать система ИСЗ, привело к выводу, что целесообразно применять отдельную телеметрическую систему. Это позволяет повысить общую надежность системы. Телеметрическая система рассматривается в разделе 10. Необходимость уменьшения веса и упрощения аппаратуры ИСЗ при разработке системы связи требует, чтобы внимание уделялось приемной аппаратуре наземных станций.

Улучшение характеристик, достигнутое при разработке наземных станций, не потребует увеличения веса ИСЗ. Доступность наземного оборудования позволяет за счет усложнения и улучшения характеристик этого оборудования упростить аппаратуру ИСЗ.

Отношение сигнал/шум наземной системы может быть улучшено либо за счет увеличения площади приемной антенны, либо путем уменьшения эффективной шумовой температуры входных цепей приемника. Даже с лучшими предварительными усилителями — парамагнитными, общая эффективная шумовая температура приемной системы не может быть сделана ниже 20° *К* из-за шумов антенны. Таким образом, практически невозможно дальнейшее снижение эффективной шумовой температуры приемной системы.

Диаметр антенны связан с другими параметрами системы соотношением

$$D = 4R \left(\frac{l k T B n \frac{S}{N}}{P_T G_T \epsilon} \right)^{1/2},$$

где D — диаметр наземной приемной антенны, *м*; $kT = 1,3 \cdot 10^{-23} \cdot 300 = 4 \cdot 10^{-21}$ *дж*; R — расстояние до ИСЗ, *м*; n — коэффициент шума приемника; S/N — требуемое отношение сигнал/шум; P_T — мощность, излучаемая передатчиком спутника, *вт*; G_T — усиление передающей антенны ИСЗ; B — ширина полосы, *гц*; l — поляризационные потери, потери в кабелях и т. п.; ϵ — к. п. д. антенны.

Зададимся следующими параметрами системы связи с использованием ИСЗ: $R = 3,5 \cdot 10^7$ *м*; $n = 1,07$ или 0,7 *дб*; $S/N = 50$ *дб*; $P_T = 1$ *вт*; $G_T = 18$ *дб*; $B = 100$ *Мгц*; $l = 3$ *дб*; $\epsilon = 0,5$. Тогда минимальный диаметр наземной приемной антенны оказывается порядка 10 *м*. В реальной

установке применение параметрического усилителя в наземной приемной системе может увеличить величину n приблизительно до 2 дб. При этих значениях адекватный прием обеспечивается антенной с эффективным диаметром 15 м. Для обеспечения гибкости и запаса по усилению представляется целесообразным иметь на наземной станции антенну диаметром 18 м.

Размеры антенны наземной станции ограничиваются точностью, с которой может осуществляться слежение за ИСЗ, и точностью размеров антенны, выраженных через длину волны, с которой она может быть изготовлена и которая может сохраняться в процессе эксплуатации. В настоящее время наивысшая частота, при которой точность изготовления антенны диаметром 18 м оказывается достаточной, равна 10 000 Мгц. Ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны при этом составляет 0,1°. Такая ширина диаграммы соответствует необходимой точности слежения за ИСЗ с наземной станции. Усиление антенны равно примерно 63 дб.

Для получения возможно более низкой эффективной шумовой температуры наземного приемника следует использовать рупорно-параболическую антенну. При наличии такой антенны предварительный парамагнитный усилитель может дать при углах возвышения порядка 10° над горизонтом и выше уровень шума, соответствующий 20° К. Эта эффективная шумовая температура использовалась при расчете табл. 2. Очевидно, что и здесь возможна замена рупорно-параболических антенн на значительно более простые параболические антенны, так же, как замена парамагнитных усилителей на параметрические. Представляется, что основные требования системы связи с использованием ИСЗ могут быть выполнены при использовании управляемой параболической антенны диаметром 18 м и параметрического усилителя.

На линии Земля — ИСЗ целесообразно использовать антенну с такой же эффективной апертурой. Для разделения излучаемых сигналов наземной станции и принимаемых сигналов, имеющих разные частоты, можно применять дуплексеры, что, вероятно, экономически более целесообразно, чем использование отдельной наземной передающей антенны. Мощность наземного передатчика вычисляется

по формуле

$$P = \frac{16R^2 kT B n \frac{S}{N}}{D^2 G_T \epsilon}$$

Следовательно, для получения отношения сигнал/шум 40 дб на входе приемника ИСЗ требуется передатчик мощностью от 2 до 1 000 вт, в зависимости от усиления антенны ИСЗ. Для обеспечения некоторого запаса, вероятно, в любом случае есть смысл использовать передатчик мощностью 1 000 вт.

10. Телеметрия, сопровождение и управление

Для сбора информации относительно местоположения и состояния связного ИСЗ, а также для управления его работой необходима отдельная система, аппаратура которой располагается как на ИСЗ, так и на Земле. Как отмечалось в разд. 9, нежелательно усложнять саму систему связи с целью использования ее радиочастотного канала для телеметрии, сопровождения и передачи команд управления. Однако целесообразно объединить эти три функции в одной системе, как это было сделано, например, на ИСЗ «Эксплорер-6» и «Пионер-5». Объединение функций оказывается возможным благодаря тому, что радиолиния Земля — ИСЗ, служащая для передачи команд, может использоваться одновременно для сопровождения ИСЗ по сигналам управления, которые переизлучаются обратно на Землю. Аналогичным образом сигнал радиолинии, возвращающийся на Землю и служащий для целей слежения, может также модулироваться телеметрической информацией. Желательно объединение функций и многоцелевое использование приемника, передатчика и антенной системы ИСЗ, поскольку это позволяет получить существенный выигрыш в весе и габаритах оборудования без ухудшения его надежности. Поскольку выход из строя одного из трех элементов — телеметрии, сопровождения или управления на активном ИСЗ — ретрансляторе, управляемом с Земли, делает работу двух других элементов бесполезной, то при разделении их общая надежность ИСЗ не повышается.

Получаемая с ИСЗ информация делится на две категории: информация системы сопровождения, определяющей

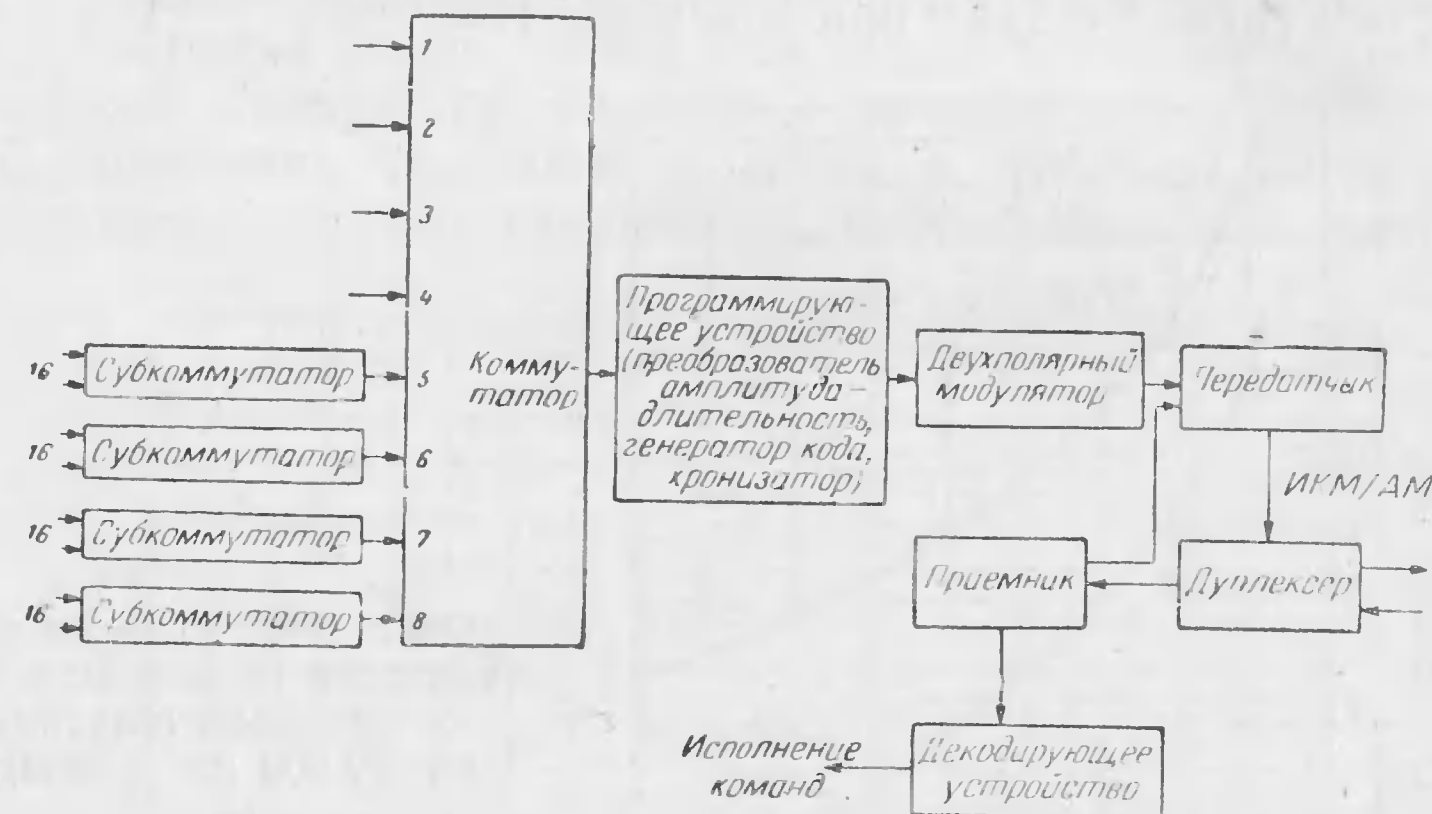
положение ИСЗ, и телеметрическая информация о состоянии и работе ИСЗ и связного ретранслятора.

На основе этих двух видов информации наземная система сопровождения и обработки данных вычисляет требуемый закон управления диаграммами излучения наземных антенн и определяет команды, которые должны быть переданы на ИСЗ. Для вычисления координат ИСЗ желательно иметь один центральный пункт обработки и анализа информации. Этот пункт должен быть оборудован быстродействующими электронными вычислительными машинами и для облегчения работы этого центра желательно использовать цифровую технику как для телеметрии, так и для управления.

На ИСЗ, находящийся на синхронной орбите, необходимо передавать примерно 60 различных команд, обеспечивающих коррекцию орбиты и положения ИСЗ, управляющих передатчиками, связным оборудованием и выполняющих другие функции. Следует предусмотреть возможность контроля такого же количества параметров ИСЗ (температура, напряжения, токи, показания тахометра системы управления положением, давление газа и т. д.). Сопровождение обеспечивается путем определения скорости изменения дальности доплеровским методом.

Медленные изменения потока информации, передаваемой по телеметрическому каналу, позволяют ограничиться сравнительно узкой полосой порядка 300 гц, причем результаты отдельных измерений передаются по телеметрическому каналу, например, два раза в 1 сек, один раз в 10 сек или даже еще медленнее, в зависимости от вида измеряемой величины или вероятной скорости ее изменения. Из многих возможных методов кодирования телеметрической информации для передачи по линии ИСЗ — Земля наиболее простыми, а следовательно, наиболее точными с точки зрения требований, которые должны быть выполнены при сравнительно малой частоте передачи данных, являются импульсно-кодовая модуляция (ИКМ) и амплитудно-импульсная модуляция (АИМ). Поскольку ИКМ может обеспечить значительно лучшее отношение сигнал/шум, то она заслуживает предпочтения. Используя восьмиразрядный код, два разряда которого служат для опознавания, можно передавать телеметрическую информацию со скоростью 256 двоичных единиц в 1 сек.

Возможная схема последовательности передачи данных приведена на фиг. 28. В этой схеме три измерения передаются в каждом цикле, а 64 — в каждом 16-м цикле. Как следует из фиг. 28, сигнал осуществляет биполярную мо-



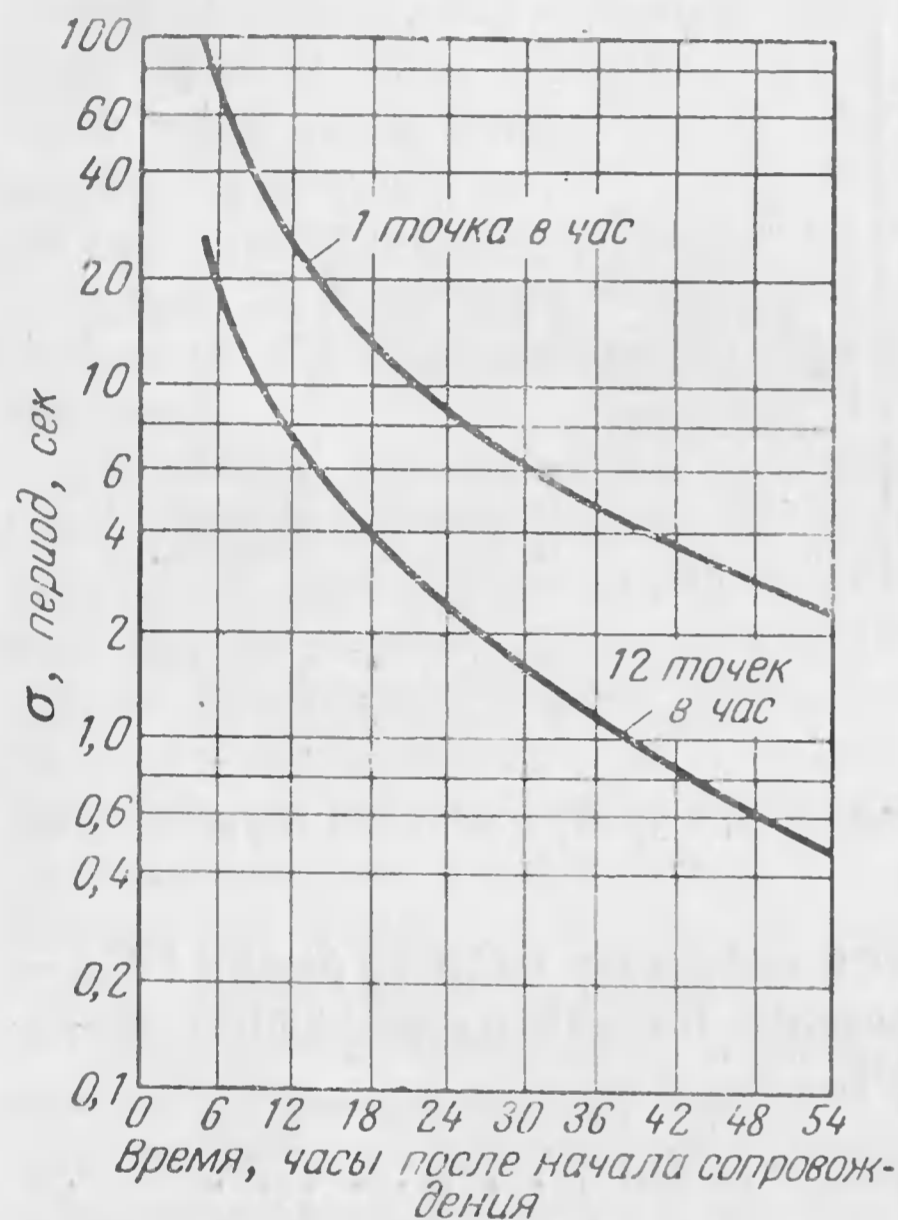
Фиг. 28. Блок-схема системы телеметрии, слежения и управления.

дуляцию несущей. Полагая несущую частоту линии ИСЗ — Земля равной 400 Мгц, можно получить следующие характеристики системы (дбм)¹.

Излучаемая спутником мощность (1 вт)	30
Усиление антенны ИСЗ	0
Усиление наземной антенны	35
Итого	+65
Потери в фидере передатчика	-1
Потери на распространение	-178
Максимальное замирание	-6
Потери в фидере приемника	-2
Поляризационные потери	-6
Итого	-193
Всего	-128

¹) дбм — децибел по отношению к одному милливатту — Прим. ред.

Опыт показал, что легко получить приемники систем телеметрии и сопровождения с чувствительностью порядка -150 дБм, а следовательно, линия ИСЗ — Земля может работать с ненаправленной антенной, обеспечивая передачу и прием сигналов даже при вращении ИСЗ.

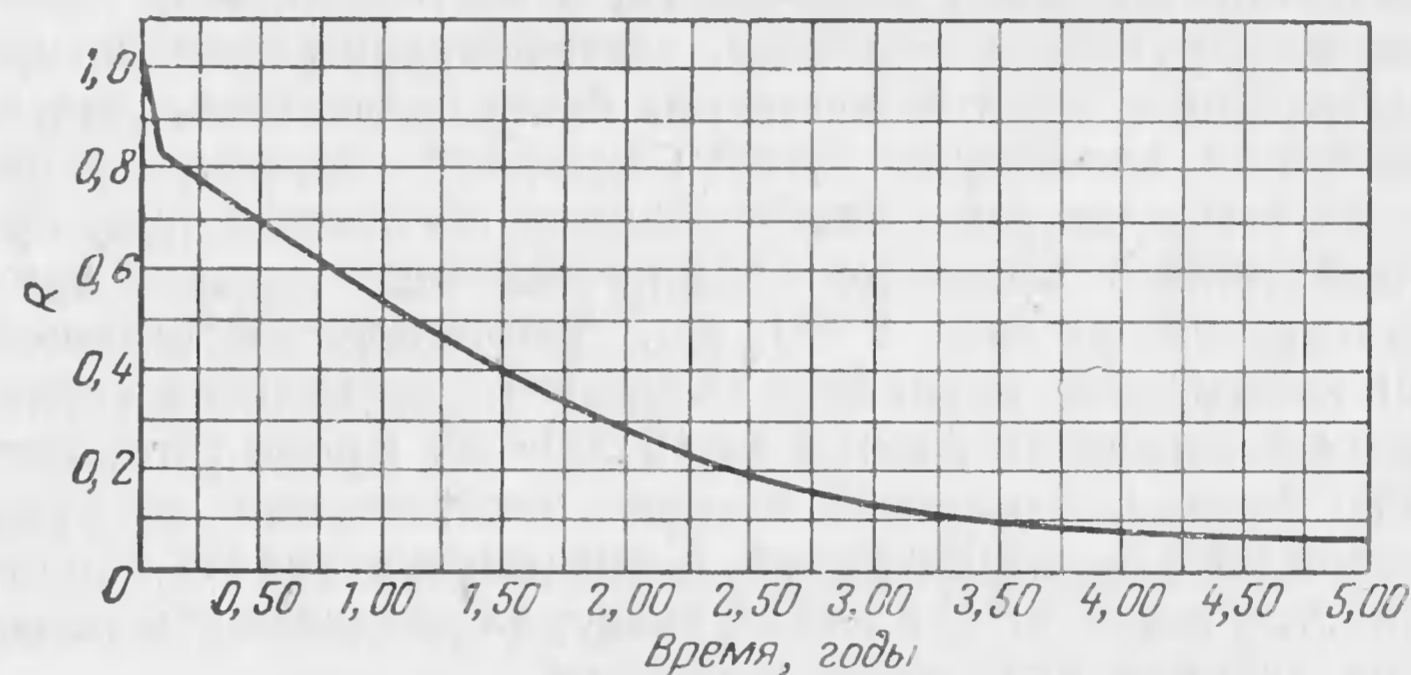


Фиг. 29. Увеличение точности сопровождения со временем (спутник на 37 000 км орбите).

Измерение доплеровского сдвига сигнала позволит непрерывно измерять скорость изменения расстояния до ИСЗ. Ответчик ИСЗ изменяет частоту принятого с Земли сигнала в целое число раз. Аппаратура наземной станции позволяет путем сравнения частоты сигнала линии Земля — ИСЗ с частотой ответного сигнала линии ИСЗ — Земля с очень высокой точностью производить измерения доплеровского сдвига частоты. Эти измерения позволяют определять скорость ИСЗ с точностью до $0,3$ м/сек при времени усреднения 1 сек. Измерения угловых величин с помощью наземной антенны при времени усреднения 1 сек обеспечивают точность не хуже 1 мрад. Сопровождение синхронного ИСЗ за продолжительный период времени может осуществляться с точностями, приведенными на фиг. 29.

11. Надежность

Для того чтобы система связи с использованием ИСЗ не оказалась слишком дорогой, необходимо, чтобы ИСЗ обладал высокой надежностью и долговечностью по меньшей мере порядка одного года. Для определения надежности сложной электронной системы в зависимости от времени мы применили классический метод, с помощью которого установили, что для гипотетического связного ИСЗ такого



Фиг. 30. Зависимость надежности ИСЗ от времени.

типа, который рассматривался в настоящей статье, среднее время безотказной работы должно составлять более полутора лет.

Кривая зависимости надежности ИСЗ от времени приведена на фиг. 30. Отклонение от распределения Пуассона объясняется использованием избыточности. Излом кривой при абсциссе, соответствующей 5 годам, получился потому, что система управления положением ИСЗ снабжена пятилетним запасом газа. Расчеты, базирующиеся на этой кривой, показывают, что среднее время безотказной работы ИСЗ составляет 1,5 года. Для компенсации неопределенностей, которые пока еще существуют в отношении космических условий, при определении частоты отказов электронных электромеханических элементов был взят коэффициент ухудшения $0,33$. Вполне возможно, что влияние космических условий оценено слишком жестко и что более подходящим коэффициентом является $0,5$ или $0,7$. Ис-

пользование этих коэффициентов повысит годовую надежность ИСЗ до 0,6—0,7 и уменьшит соответствующим образом количество требуемых запусков.

Полный выход из строя ИСЗ в нашем исследовании характеризуется следующими двумя факторами: а) неспособностью связной подсистемы передавать и принимать сигнал с достаточным уровнем мощности и б) отклонением ИСЗ от правильного положения на $1,5^\circ$.

Предполагалось разумное применение средств, позволяющих повысить надежность, в частности, использование конструктивных запасов, регулирования температуры, тщательной сборки и проверки. Было подсчитано, что активный ИСЗ — ретранслятор с активной схемой регулирования температуры и стабилизацией положения потребует 500 активных элементов, обеспечивающих среднее время безотказной работы 4 000 час. Тщательное объединение 250 избыточных активных элементов увеличивает среднее время безотказной работы до 12 000 час. Кроме того, предполагается, что каждый элемент работает при нагрузке, равной 25% от номинальной, и что температура ИСЗ не поднимается выше 30°C в любой точке, за исключением выходного каскада усилителя мощности.

Дальнейшее повышение надежности отдельных элементов будет, вероятно, достигнуто через несколько лет. Исходя из первых результатов проводимых работ можно предполагать, что долговечность связных ИСЗ может быть увеличена до 10 лет и более.

12. Стоимость

При создании и эксплуатации системы связи с ИСЗ основная стоимость распределяется между тремя элементами: самими ИСЗ, средствами запуска и наземными станциями. Стоимость этих элементов, разумеется, будет зависеть от количества и сложности каждого из них. Стоимость ИСЗ будет минимальной для небольших пассивных отражателей и максимальной для активных ретрансляторов с направленными антеннами и со стабилизацией их положения. Стоимость средств запуска будет изменяться в зависимости от того, используются ли относительно небольшие ракеты и простые способы запуска для вывода пассивных ИСЗ на

ближние орбиты или же используются мощные ракеты и более сложные методы запуска активных ретрансляторов на дальние орбиты. Требования к мощности и размерам антенн наземных станций возрастают с увеличением высоты орбиты ИСЗ, но в то же время угловая скорость перемещения наземной антенны при сопровождении с увеличением высоты ИСЗ будет уменьшаться.

Примерная суммарная стоимость одного запуска, состоящая из стоимости ИСЗ, ракеты-носителя и процедуры запуска, находится в пределах от 500 тыс. долл. до 5 млн. долл. для ИСЗ — ретрансляторов, которые не имеют средств стабилизации их положения на орбите; причем стоимость запуска возрастает с высотой ИСЗ [2]. Аналогичный расчет дает стоимость запуска управляемых ИСЗ от 5 до 9 млн. долл. Стоимость каждой наземной станции оценивается в 2,5 млн. долл.

Представляется разумным полагать среднее время безотказной работы ИСЗ — ретранслятора равным полутора годам, а вероятность успешного запуска равной 0,75. Стоимость создания системы связи с ИСЗ может быть приблизительно определена по формуле

$$C_E = C_g N_g + \frac{N_s}{pn} (C_s + nC_s).$$

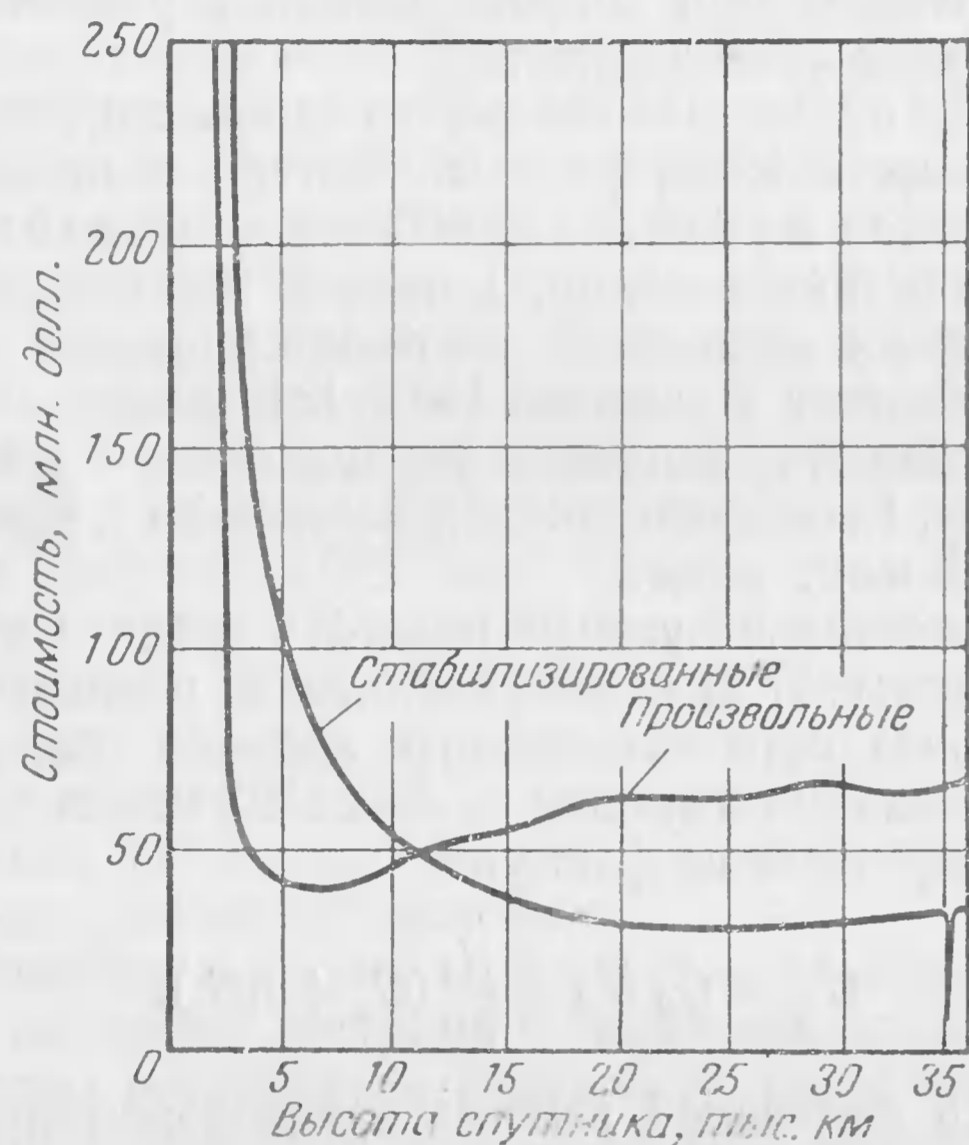
Стоимость ежегодной замены предположительно равна

$$C_M = \frac{N_s}{pnt} (C_B + nC_s),$$

где N_g — число наземных станций; N_s — число действующих ИСЗ на орбите; p — вероятность успешного запуска; t — средняя долговечность спутника; n — число запущенных спутников на одну ракету-носитель; C_g — стоимость одной наземной станции; C_B — стоимость ракеты и процедуры запуска; C_s — стоимость ракеты-носителя.

Общая стоимость, определенная таким способом, позволяет сравнивать различные системы, но, конечно, не позволяет установить точную стоимость создания современной системы, поскольку здесь не учитываются такие факторы, как стоимость разработки и эксплуатации резервного оборудования.

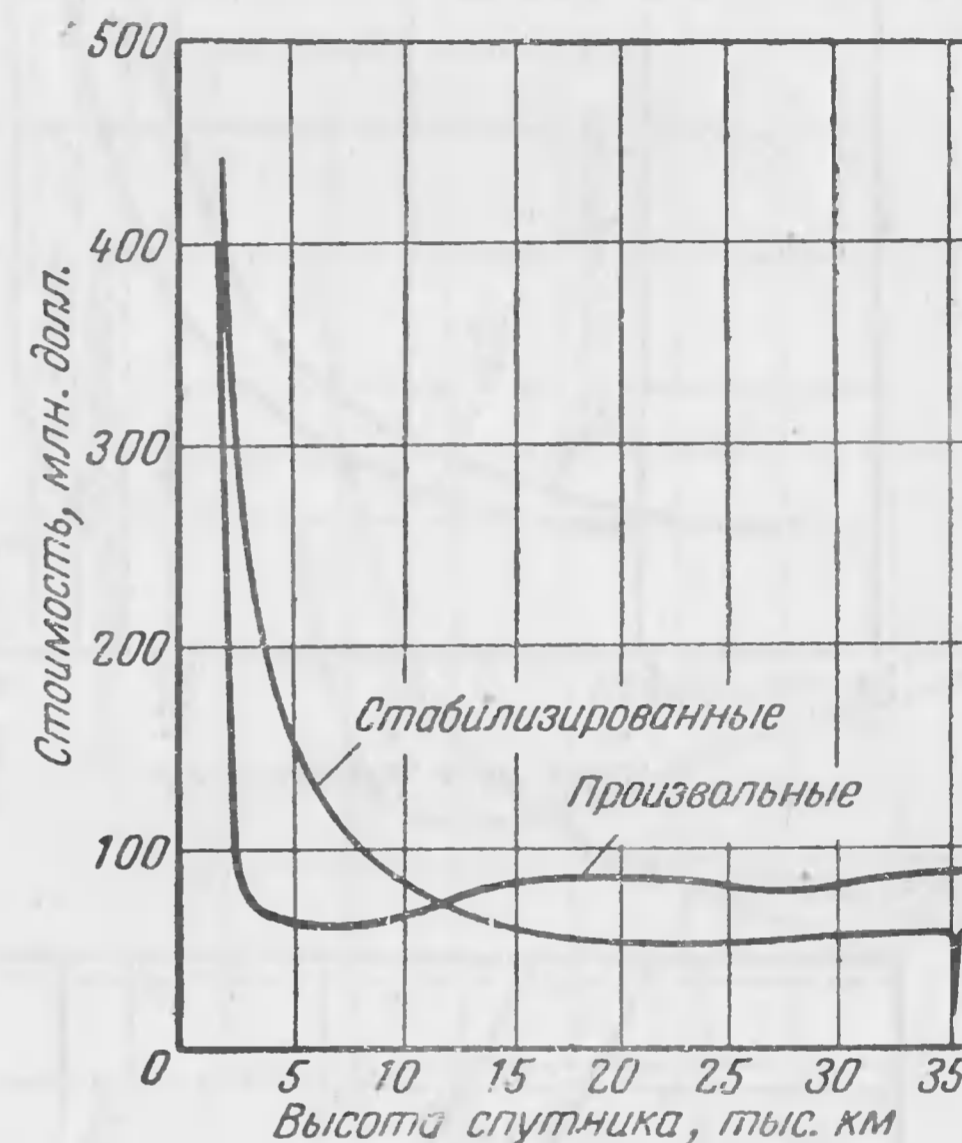
На фиг. 31—35 указана приблизительная стоимость создания и эксплуатации системы связи с ИСЗ для конкретной магистральной линии связи (Нью-Йорк — Париж) и для глобальной связи при наличии как произвольно расположенных, так и управляемых ИСЗ. Из фиг. 31 видно, что



Фиг. 31. Стоимость создания системы связи, обеспечивающей непрерывную связь на линии Нью-Йорк—Париж.

при высоких орбитах, превышающих 11 000 или 13 000 км, создание и эксплуатация линии связи между Нью-Йорком и Парижем обходится дешевле при использовании управляемых ИСЗ, несмотря на то, что стоимость отдельных ИСЗ и их запусков при этом возрастает. Более того, стоимость системы при высоте 35 810 км минимальна. Перекрытие на этой высоте может быть получено с помощью только одного ИСЗ, и для выведения ИСЗ на орбиту достаточно произвести 2 запуска. Тогда при стоимости одного запуска примерно в 9 млн. долл. создание системы потребует затрат в 18 млн. долл., а вместе со стоимостью наземных станций — 23 млн. долл. Из таких же соображений определена стои-

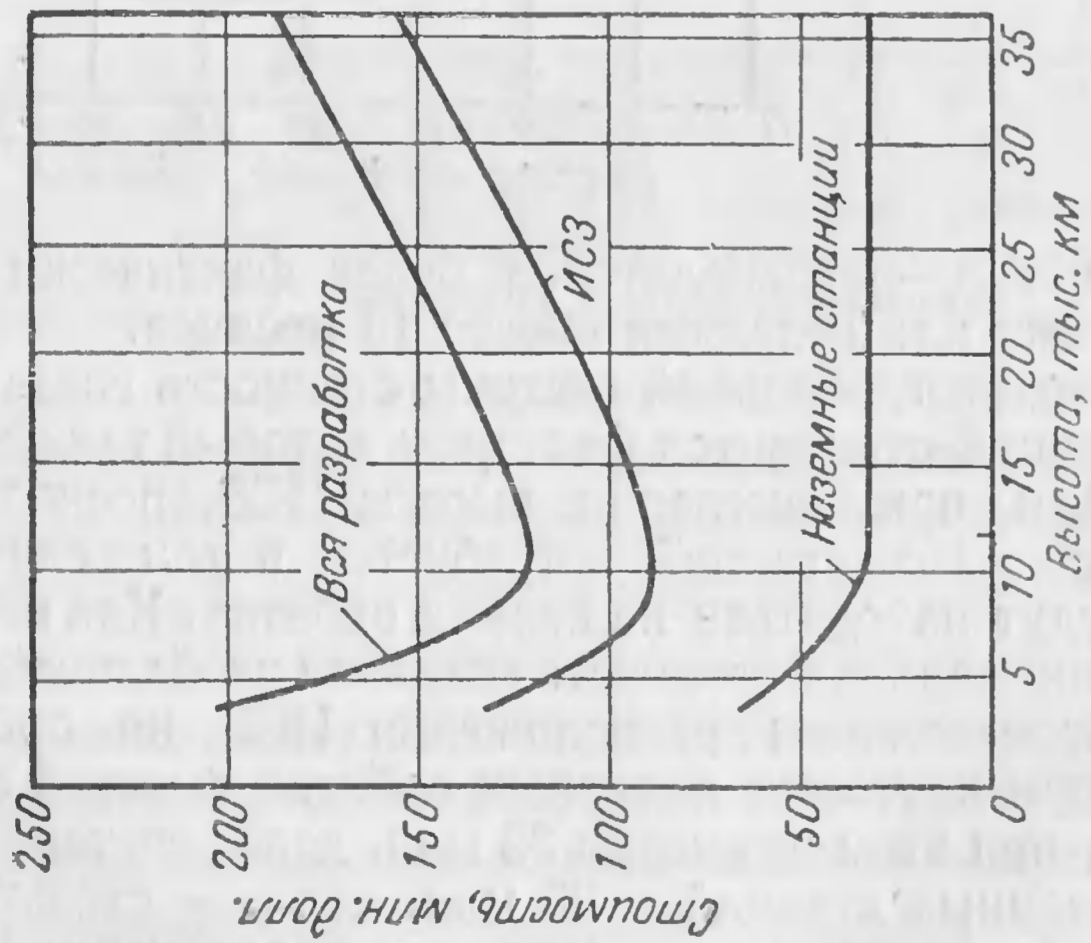
мость эксплуатации системы, которая, как следует из фиг. 32, потребует ежегодных расходов 8 млн. долл. в предположении, что для замены ИСЗ потребуется 0,9 запуска в год. Кривые фиг. 32 для высот менее 18 000 км не учитывают повреждений, которые будут возникать под действием протонов высоких энергий. Как показано выше, в этом случае



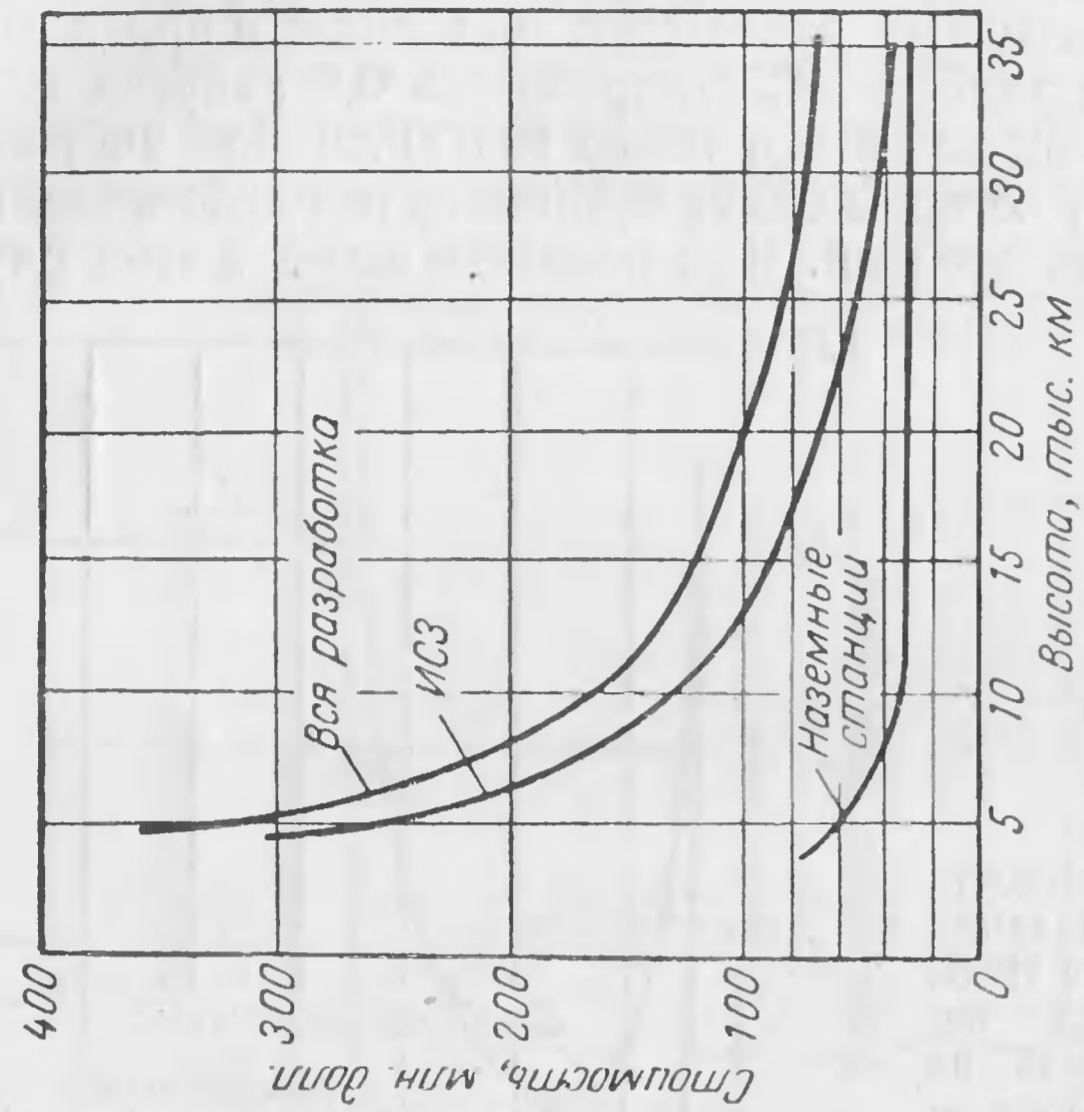
Фиг. 32. Стоимость годовой эксплуатации системы связи с ИСЗ, обеспечивающей непрерывную связь на линии Нью-Йорк — Париж.

срок службы ИСЗ—ретрансляторов будет фактически исчисляться днями или неделями вместо 18 месяцев.

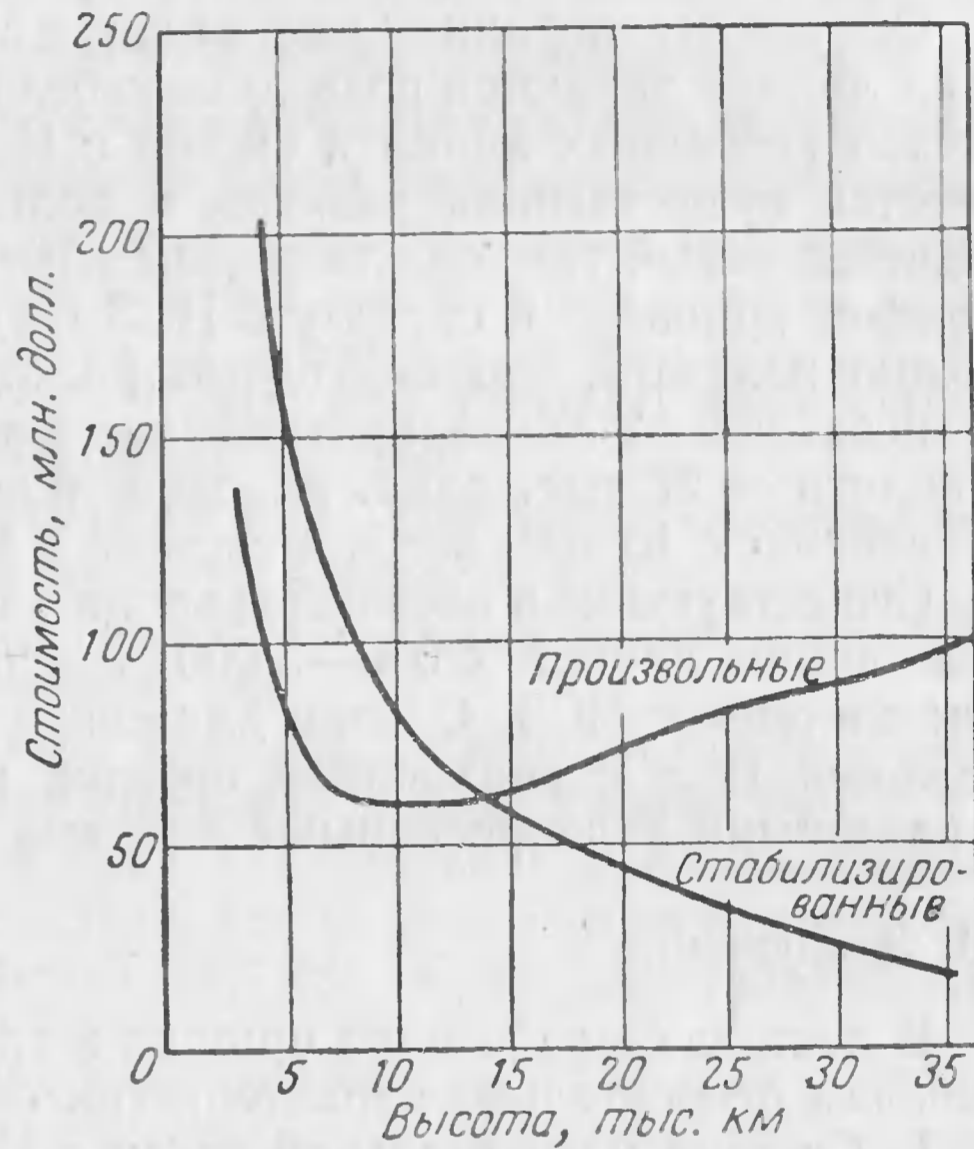
Для получения глобальной системы стоимость создания наземных станций становится фактором, который также будет изменяться при изменении высоты ИСЗ, поскольку большее количество станций потребуется в том случае, когда ИСЗ будут находиться на низких орбитах. Как видно из фиг. 33, минимальная стоимость создания глобальной системы при произвольном расположении ИСЗ на орбите имеет место при круговых полярных орбитах высотой около 11 000 км, при этом примерно 32 млн. долл. составляют стоимость наземных станций и 93 млн. долл. — стоимость ИСЗ. Минимум стоимости системы с управляемыми ИСЗ (см. фиг. 34) получается при высотах, соответствующих



Фиг. 33. Предполагаемая стоимость создания системы, обеспечивающей глобальную связь при использовании активных ИСЗ — ретрансляторов с произвольным положением на полярных орбитах.



Фиг. 34. Предполагаемая стоимость создания глобальной системы связи, использующей ИСЗ — ретрансляторы со стабилизированным положением на орбитах.



Фиг. 35. Предполагаемая стоимость годичной эксплуатации глобальной системы связи с использованием ИСЗ.

повреждений ИСЗ протонами высоких энергий на высотах менее 18 000 км.

Если исключить все орбиты ниже 18 000 км, то останутся только 12-часовые круговые полярные орбиты, 12-часовые круговые экваториальные орбиты и синхронные орбиты.

Если учитывать только стоимость, то следует исключить 12-часовые орбиты и сделать вывод о том, что оптимальной будет система с синхронной орбитой. Однако запаздывание сигналов в такой системе может помешать ее применению для коммерческой телефонной связи. Вопрос о том, будет ли это запаздывание серьезным препятствием для телефонной связи, пока еще не решен. Было проведено ограниченное количество испытаний, в которых имитировались как запазды-

вание сигналов, так и их выпадение под действием экзоградителей. К сожалению, различные исследования привели к противоречивым результатам, так что до сих пор у нас нет достаточных оснований для выбора между 12-часовыми полярными и синхронными орбитами. Первый вариант может оказаться в эксплуатации в 2—3 раза дороже, но, вероятно, на это целесообразно пойти.

Основным соперником систем связи с ИСЗ на трансокеанских линиях являются подводные кабели, но сравнение стоимостей кабельных линий и систем с ИСЗ показывает, что имеется существенная разница в пользу ИСЗ. Беря для расчетов новый тип кабеля фирмы «Америкен телеграф энд телефон компани» и систему с ИСЗ на синхронной орбите, можно показать, что ежегодные расходы на содержание трансокеанской линии протяженностью 5 500 км будут составлять ~ 27 тыс. долл. на один телефонный канал по сравнению с 10 тыс. долл. в системе с ИСЗ¹⁾.

Существующие в настоящее время наземные радиорелейные линии длиной 4 000—5 000 км обходятся дешевле, чем системы с ИСЗ. Однако для связи между двумя побережьями ИСЗ с синхронной орбитой может соперничать с наземными радиорелейными линиями [4].

13. Заключение

В настоящей работе мы пришли к следующим основным выводам относительно характеристик систем связи с ИСЗ.

1. Система магистральной связи с ИСЗ экономически и технически реализуема.

2. ИСЗ должны представлять собой активные ретрансляторы.

3. Орбита должна быть круговой с периодом обращения ИСЗ 24 или 12 час.

4. Рабочие частоты должны лежать в диапазоне 1—10 Гц.

5. В качестве источников питания на ИСЗ должны использоваться солнечные батареи и аккумуляторы.

6. Положение ИСЗ на орбите должно корректироваться.

7. Необходимо применять стабилизацию положения ИСЗ.

¹⁾ Стоимость одного канала на действующем трансатлантическом кабеле (проложенном в 1956 г.) составляет 240 тыс. долл.

8. ИСЗ должны иметь активную систему регулирования температуры.

9. Срок службы ИСЗ должен быть более 18 мес.

10. Общая стоимость создания и эксплуатации системы с ИСЗ в течение 10 лет составит примерно 250 млн. долл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Denney J. M., Downing R. G., Grenall A., «High Energy Proton Damage». American Rocket Society.
2. Frequency Needs for Space Communications: Testimony and Exhibits of American Telephone and Telegraph Company before the FCC in the Matter of Allocation of Frequencies in the Bands above 890 Mc/s, 6 July 1960. Federal Communications Commission, Washington, D. C., 1960.
3. Lehr S. N., Tronolone V. J., «The Space Environment and its Effects on Materials and Component Parts», presented at the Joint Reliability Seminar, Los Angeles Section, Amer. Inst. Radio Engrs., 5 December 1960.
4. Meckling W., «The Economic Potential of Communication Satellites», The Rand Corp., Rep. P-2216, 1 March, 1961.
5. Marrow W. E., Meyer A. F., «Orbital Scatter Communication System». Transactions, Fourth Symposium on Ballistic Missile and Space Technology, vol. 4, p. 321, WDAT-60-542, 24-27 August, 1959.
6. Mueller G. E., «A Pragmatic Approach to Space Communications», *Proc. Inst. Radio Engrs.*, 48, 558 (1960).
7. Pierce J. R., Kompfner R., «Transoceanic Communications by Means of Satellites», *Proc. Inst. Radio Engrs.*, 47 372 (1959).
8. «Simulating Speech Through Space». *Bell Lab. Rec.*, 38, 296, 1960.
9. Sinden F. W., Mammel W. L., «Geometric Aspects of Satellite Communication», IRE Transaction on Space Electronics and Telemetry, SET-6, № 3—4, pp. 146—57, September — December 1960.
10. Statistical Abstracts of the United States, Washington, 1960.
11. Statistics of Communication Common Carriers, year ended 31 December 1958, Federal Communications Commission, Washington, D. C., 1960.
12. Whitford R. K., «Design of Earth Satellite Attitude Control Systems», Rep. STL-2313-0001-RU-000, 24 May, 1961.

7. Системы связи с использованием искусственных спутников Земли, обеспечивающие разделение групп каналов¹

С ан д е м а н Е.

1. Введение

Используя метод разделения групп каналов, можно при помощи ИСЗ обеспечить связь одновременно между несколькими парами наземных станций.

В основу настоящей статьи положена модель системы связи через ИСЗ, разработанная с целью определения требуемой мощности передатчика, установленного на ИСЗ. Модель впоследствии была усовершенствована с тем, чтобы она могла действовать в качестве практической системы и подтвердить исходную идею при помощи определенных цифровых величин. Описан простой метод устранения эффекта эха от дальнего конца четырехпроводной наземной линии, работающей совместно с радиолинией с использованием ИСЗ.

Требования к мощности передатчика приведены для случая применения специального кода, при котором нагрузка передатчика, расположенного на борту ИСЗ, получается минимальной. Применение этого кода несколько усложняет аппаратуру по сравнению со случаем использования аппаратуры с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ), основанной по существу на принципе цифрового вольтметра.

¹ Sandeman E. K., Communications Satellites, Academic Press, Lnd. — N. Y., 1962, p. 17—73.

Хотя описываемая здесь система связи рассматривается только для случая применения активных ИСЗ, она пригодна и при использовании пассивного ИСЗ при соблюдении следующих условий: мощность наземного передатчика должна быть порядка 100 квт; на пассивном ИСЗ не должно происходить сдвига частоты; для связи используется соответствующая длина волны.

Описываемая система связи способна работать как с ориентированным ИСЗ, находящимся на синхронной орбите, так и с группой неориентированных ИСЗ со случайными орбитами, если имеется удовлетворительное решение вопроса использования и коммутации антенных устройств.

Описываются видоизменения системы связи, позволяющие осуществлять магистральную связь, а также обслуживание определенных площадей. В первом случае обеспечивается многоканальная связь только между двумя наземными станциями, в то время как во втором случае любая из наземных станций может установить связь с любой другой станцией в пределах данной площади. В этом случае ИСЗ по существу выполняет функции телефонного коммутатора; для установления связи между двумя наземными станциями достаточно настроить передатчики и приемники этих станций на одну из частот, отведенных для связи.

2. Описание системы

А. Система дальней связи

Основные требования

а) Система должна с помощью одного ИСЗ, снабженного одним или несколькими приемопередатчиками, обеспечить передачу m телефонных разговоров между любой из G наземных станций, расположенных на обслуживаемой площади, и любой другой станцией, находящейся в пределах этой же площади. Должна быть обеспечена возможность передачи одновременно по M телефонным каналам. (Значения M и m зависят как от потребности в связях, заявленной наземными станциями, так и от пропускной способности аппаратуры ИСЗ). Магистральной связи соответствует $G = 2$.

б) Для связи между наземными станциями должны использоваться только передатчики и приемники этих стан-

ций и центральная станция управления, служащая для распределения (временного или постоянного) рабочих частот связи.

в) Взаимные помехи между телефонными каналами не должны превышать допустимую величину.

г) Искажения речи, связанные с нелинейностью частотных характеристик или шагом квантования (в системах с ИКМ), не должны быть больше допустимых.

д) Должно быть обеспечено достаточно высокое отношение сигнал/шум.

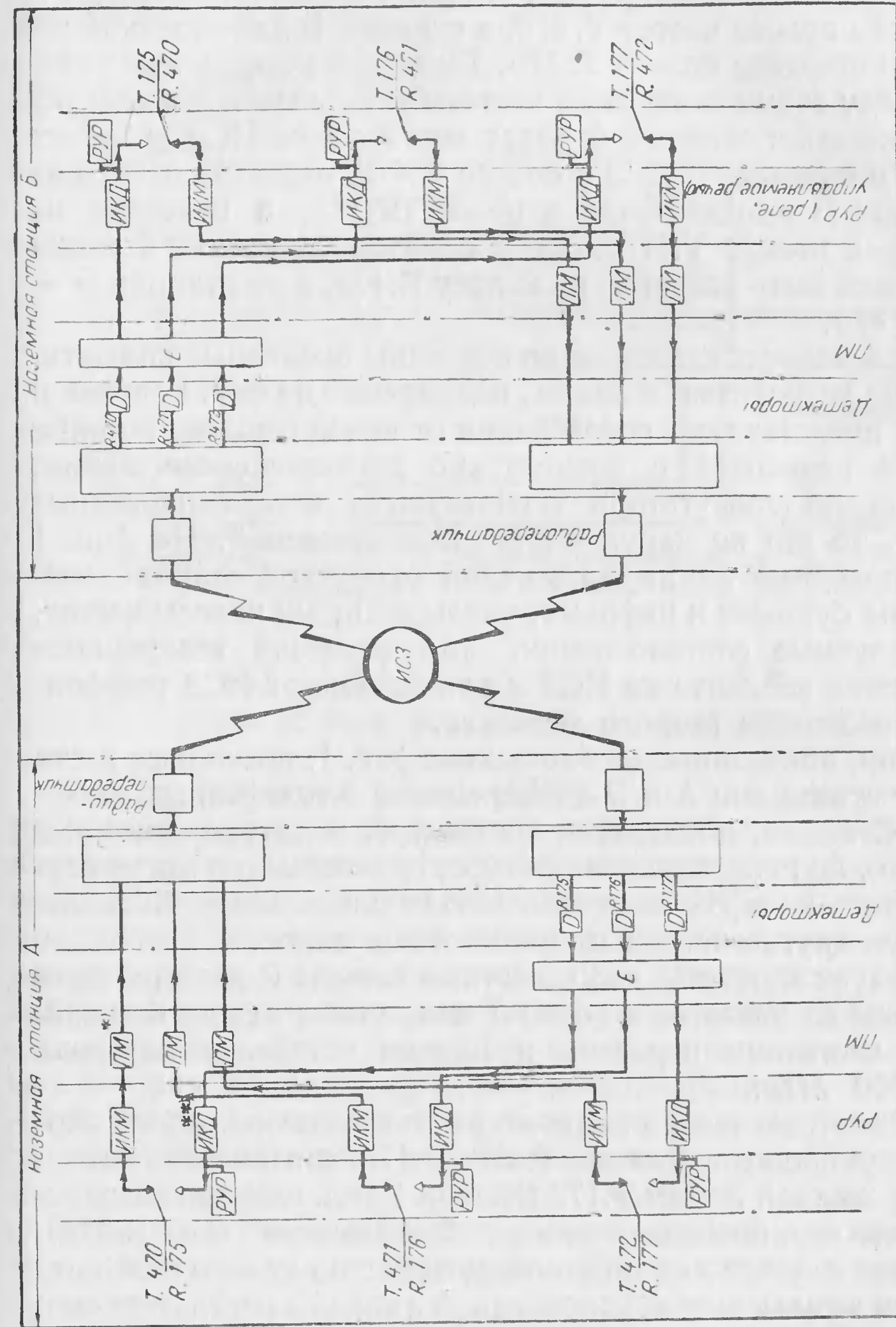
е) Для любого заданного числа каналов должен быть найден компромисс между требованиями минимальной мощности передатчика на ИСЗ, минимальной используемой ширины полосы частот и простотой аппаратуры.

Система, удовлетворяющая названным требованиям

На фиг. 1 показана блок-схема аппаратуры двух наземных станций А и Б, входящих в состав системы связи с помощью ИСЗ, удовлетворяющей основным требованиям. Эти две наземные станции входят в общую систему, в которой может быть до 20 станций. Из блок-схемы видно, что в состав наземной станции входят приемник, передатчик и вспомогательная аппаратура.

Блок-схема остается в общем неизменной независимо от числа телефонных каналов на радиолинии наземная станция — ИСЗ. При изменении числа каналов могут лишь (хотя и не обязательно) измениться обозначения некоторых элементов блок-схемы. Требования к наземной станции, которая должна принимать сообщения по одному каналу от 20 других наземных станций, очевидно, будут отличаться от требований к станции, поддерживающей телефонную связь только с одной станцией по 50 каналам.

Во всех дальнейших рассуждениях принимается, что каждой наземной станции отведено несколько частотных полос для передачи информации; эти полосы обозначаются буквой Т и числом; каждую такую полосу частот занимает один телефонный канал. На ИСЗ каждая из этих частотных полос переводится на другой участок диапазона; новая полоса частот на фиг. 1 обозначена буквой R и числом.



*) ПМ — модуляторы с подавлением одной боковой полосы
 **) ИКД — импульсно-кодовый демодулятор

Фиг. 1. Блок-схема системы связи с помощью ИСЗ.

Предположим, например, что для передатчика станции А отведена полоса частот Т. 470, а станции Б для ответной передачи отведена полоса Т. 175. Тогда для установления связи между этими станциями частоты используются в следующем порядке: станция А ведет передачу на ИСЗ в полосе Т.470 и передачу с ИСЗ в полосе R.470, передача с ИСЗ на станцию Б производится в полосе R.175, а передача на ИСЗ — в полосе Т.175. Таким образом, приемник станции А должен быть настроен на полосу R.175, а на станции Б — на R. 470.

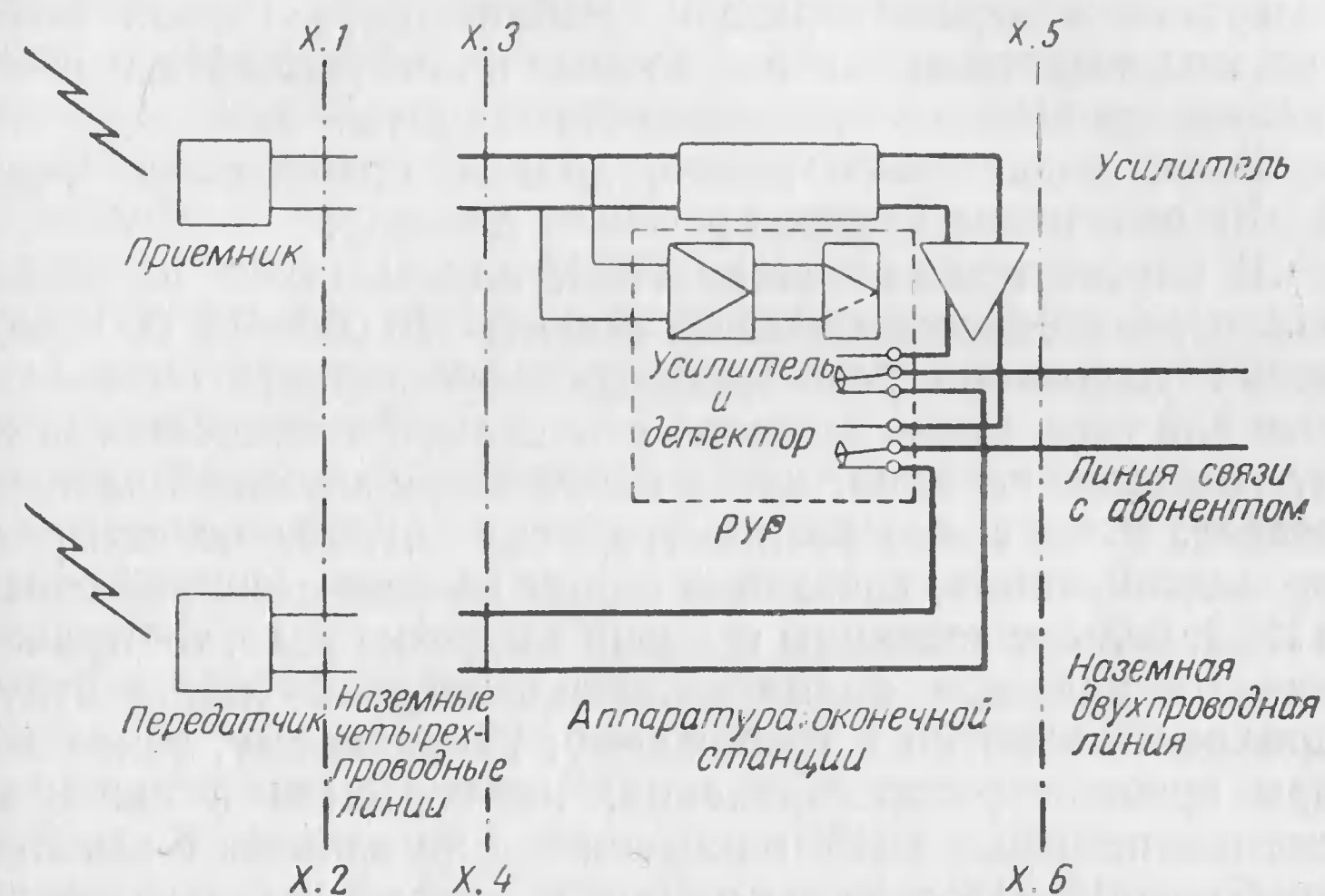
На наземных станциях не показаны оконечные коммутирующие устройства, а линии, подходящие на фиг. 1 справа и слева, представляют собой линии от коммутаторов, которые дальше переходят в абонентские двухпроводные линии. Если после коммутатора используются четырехпроводные линии, то это не нарушает хода рассуждений. На фиг. 1 двухпроводные линии на каждой оконечной станции обозначены буквами и цифрами, указывающими полосы частот, используемые соответственно для передачи телефонного сообщения абонента на ИСЗ и для приема от ИСЗ телефонного сообщения второго абонента.

Цепи, показанные на блок-схеме фиг. 1, позволяют вести между станциями А и Б одновременно 3 телефонных разговора. Станции, показанные на фигуре, и другие наземные станции, не показанные на фигуре, одновременно могут осуществлять телефонную связь между собой через ИСЗ, используя другие комбинации частотных полос.

Следует заметить, что частотные полосы R должны быть отделены от частотных полос Т так, чтобы между ближайшими частотами передачи и приема оставался интервал 100—300 Мгц.

Рассмотрим теперь аппаратуру, с помощью которой абонент двухпроводной линии Т.470 (R.175) связан с абонентом двухпроводной линии Т.175 (R.470). Здесь следует подчеркнуть, что двухпроводные линии, обозначенные Т.175 (R.470), и другие служат для обычной дуплексной телефонной связи. При этом между двухпроводной линией и передатчиком и приемником обязательно должно находиться устройство, подключающее дуплексную двухпроводную телефонную линию то к приемнику, то к передатчику. Это устройство необходимо для предотвращения прохождения звуковых

частот из цепи приема в цепь передачи, что вызывает эффекты эхо и свисты.



Ф и г. 2. Реле, управляемое речью (РУР).

Реле, управляемое речью (РУР). Это реле в отсутствие речи в цепи приема подключает двухпроводные линии на каждом конце к соответствующим передатчикам. Когда на выходе приемника появляется сигнал, РУР подключает приемник к двухпроводной линии. Блок-схема реле, управляемого речью, показана на фиг. 2; в схему введена цепь задержки для устранения ограничения речевого сигнала за счет времени срабатывания реле. Однако опыт, приобретенный автором 30 лет назад на линии связи Мадрид — Буэнос-Айрес, показал, что введение задержки не является обязательным. Работа такого устройства на линии связи Мадрид — Буэнос-Айрес или даже на длинноволновой линии связи с Регби была невозможной в связи с низким отношением сигнал/шум на выходе приемника. В этом случае пришлось применить другую систему, в которой нормально двухпроводная линия подключена к приемнику, а речевой сигнал переключает эту линию к передатчику. При использовании такой системы имеется вероятность того, что оба абонента, не зная об этом, будут говорить одновременно. Такое явление

ние может быть названо взаимной блокировкой. Вероятность взаимной блокировки возрастает с увеличением задержки в линии передачи. Работа предлагаемой здесь системы возможна, так как за счет применения ИКМ обеспечивается высокое отношение сигнал/шум.

Реле, управляемое речью, должно срабатывать через 5—10 мсек после прихода речевого сигнала.

В случае использования ИСЗ, находящихся на орбитах сравнительно небольшой высоты (10 000—13 000 км), время удержания реле необходимо установить оптимальным для того, чтобы избежать отпускания в перерывах между гласными звуками, когда напряжение звуковой частоты падает. Если время распространения сигнала по четырехпроводной линии, связанной одним концом с линией связи с ИСЗ, больше половины времени задержки реле, то отражения от дальнего конца четырехпроводной линии будут приходить обратно к говорящему. По-видимому, такое эхо при времени распространения, наблюдаемом в системах связи с помощью ИСЗ, находящихся на орбитах с высотой не более 10—13 тысяч км, может считаться допустимым, поскольку отражения приходят обратно через сравнительно небольшой интервал времени после прекращения речевого сигнала.

В случае ИСЗ, находящихся на синхронных орбитах, эхо от дальнего конца связанной с этой системой четырехпроводной линии телефонной связи может вызвать заметное ухудшение качества связи.

Если связанная с системой четырехпроводная линия характеризуется временем распространения сигналов, превышающим половину нормального времени задержки, то время задержки срабатывания реле необходимо увеличить. Это время должно выбираться или оптимальным для перекрытия промежутка между гласными буквами, или превышающим в два раза время распространения по четырехпроводной линии с запасом порядка 5 мсек (в зависимости от того, какой отрезок времени больше). Такое время задержки обеспечит отсутствие эха, и разговаривающие по системе абоненты не ощутят никаких неудобств.

Максимальное время распространения сигнала по наземным линиям связи, встречающееся на практике, составляет около 100 мсек. Для определения возможности использо-

вания реле с задержкой 200 мсек при отсутствии задержки сигнала, поступающего на РУР, необходима постановка специальных экспериментов. Если такая задержка окажется допустимой, то отпадет необходимость регулировки времени задержки в зависимости от длины линии.

Описанное устройство устраняет как явление взаимной блокировки, так и эхо, поскольку запаздывание ответа на вопрос, равное 0,6 сек, может считаться допустимым. Такая схема позволяет избежать неудобств, связанных с задержкой сигналов при использовании в системе связи ИСЗ на стационарной орбите.

Противники использования ИСЗ на стационарной орбите указывают на то, что при введении в схему устройств, устраняющих отражения сигналов от дальнего конца линии, абонент не сможет перебить речь своего собеседника. Это действительно будет иметь место, если не приняты специальные меры. Однако аналогичное явление наблюдается и при меньших высотах орбиты ИСЗ, если только не отказаться от подавления эха. Допустимость эха в системах связи с помощью ИСЗ на орбитах сравнительно небольшой высоты опровергает утверждения противников таких систем, что при их использовании качество связи будет хуже, чем при использовании существующих кабельных и наземных радиолиний связи. Для доказательства того, что большая задержка является существенным недостатком систем связи с помощью ИСЗ, находящихся на синхронных орбитах, необходимо показать, что при использовании ИСЗ с меньшими высотами орбит наличие эха более допустимо, чем отсутствие возможности быть невежливым. И, наконец, существует схема, позволяющая перебить абонента во время разговора.

Импульсно-кодовый модулятор. Вернемся теперь снова к фиг. 1 и проследим цепь от РУР до радиопередатчика. Здесь мы встретим импульсно-кодовый модулятор (ИКМ). Напряжение речевых сигналов квантуется по времени с периодом $1/8\ 000$ сек и затем кодируется с помощью 7-разрядного кода. Длительность каждого импульса в кодовой группе составляет $1/8\ 000 \times 7 = 1/56\ 000$ сек.

Таким образом, сигнал звуковой частоты по существу превращается в телеграфный, а именно в последовательность временных интервалов, в течение которых импульсы всегда

одной и той же амплитуды либо имеются, либо отсутствуют. Такая передача называется передачей двоичным кодом.

Образование полосы частот основного канала. В связи с тем что информация на выходе ИКМ модулятора, имеющая форму последовательности импульсов, занимает полосу частот, начинающуюся от нуля, не представляется возможным выделить из этой полосы боковую полосу с тем, чтобы затем транспонировать ее в другую часть спектра. В балансных модуляторах баланс недостаточен для полного подавления ненужной боковой полосы, и, следовательно, их также невозможно применить. Поэтому сперва образуют предварительную полосу частот путем модуляции некоторой несущей частоты выходными импульсами кодового модулятора и с помощью фильтров и цепей, корректирующих частотную характеристику, выделяют одну боковую полосу, несущую частоту и остаток второй боковой полосы. Коррекция частотной характеристики производится таким образом, чтобы после детектирования получить модулирующее напряжение в его первоначальном виде, т. е. в виде последовательности импульсов.

Аппаратура уплотнения. Аппаратура частотного уплотнения представляет собой систему модуляторов и фильтров, с помощью которых полоса частот основного канала переносится в нужную часть частотного спектра.

Система магистральной связи. Система магистральной связи строится путем уплотнения 12 основных каналов, соответственно транспонированных по частоте в другую часть диапазона с последующим расположением их рядом одного возле другого для получения основной группы из 12 каналов. 5 основных групп, транспонированных в соответствующую часть спектра и расположенных одна за другой, образуют основную супергруппу. Необходимое число супергрупп транспонируются по частоте и располагаются рядом. Ниже приводится численный пример такой системы уплотнения, которая называется основной системой частотного многоканального уплотнения.

Система связи, обслуживающая заданную площадь. В такой системе можно применить основной вид многоканального частотного уплотнения путем использования минимально необходимого числа элементов аппаратуры уплотнения. В этом случае уплотняется меньшее по сравнению

со случаем магистральной связи число каналов, используемых для передачи наземными станциями.

Здесь следует отметить, что выделенные для каждого передатчика полосы частот закрепляются за ним постоянно и при какой-либо модификации системы (см. ниже) набор аппаратуры уплотнения, производящий транспонирование частотных полос каналов в заданную часть спектра частот, остается неизменным; при этом аппаратура уплотнения не требует никакой настройки.

Радиопередатчик. Выходной спектр аппаратуры уплотнения подается на передатчик. В передатчике этот спектр транспонируется в подходящую для излучения часть спектра частот и передается на ИСЗ. Наиболее подходящими для пассивных ИСЗ являются частоты ~ 6000 Мгц. Эти же частоты пригодны для активных ИСЗ. Вопрос о том, почему в последнем случае должна использоваться столь высокая частота, будет рассмотрен ниже.

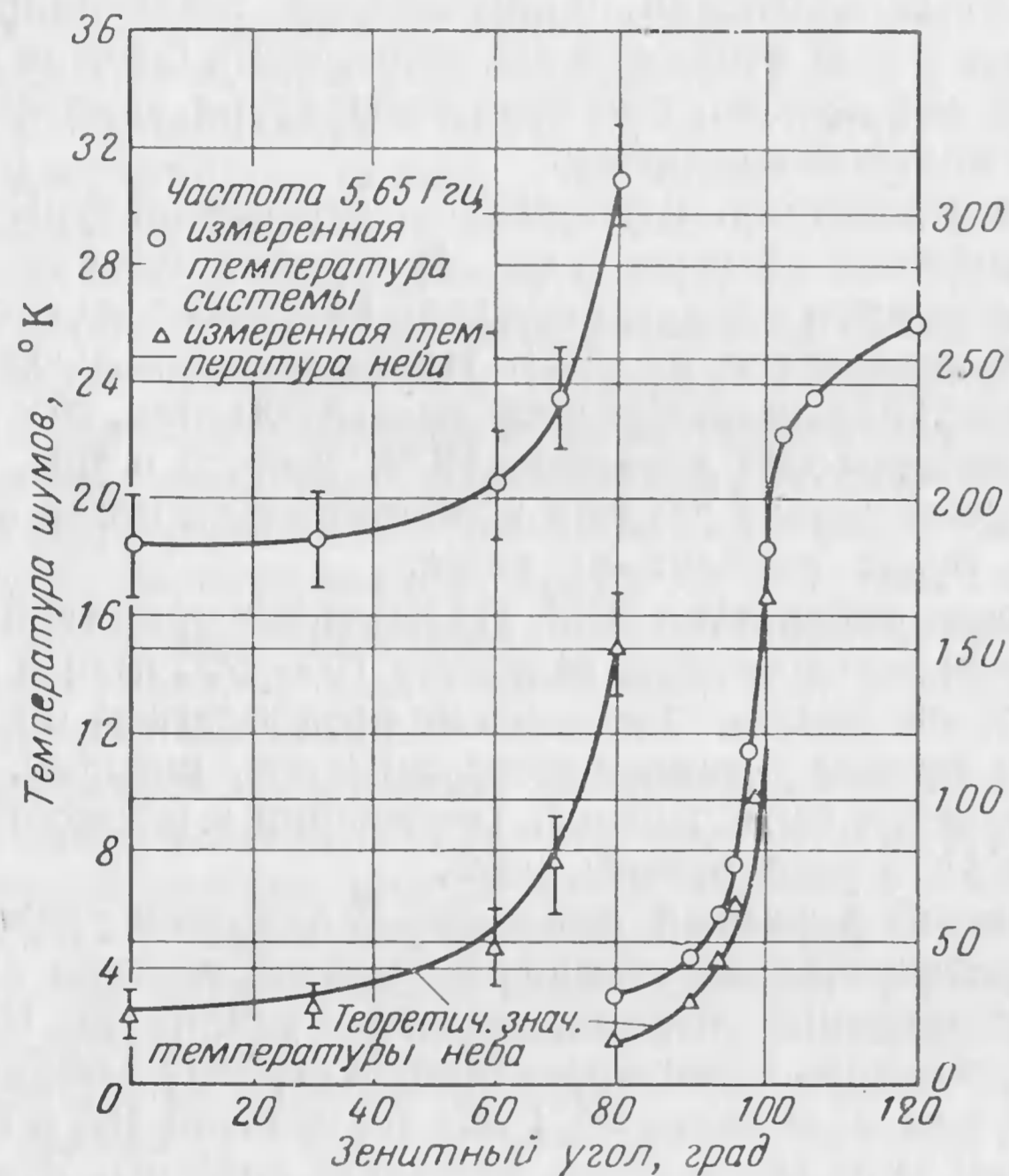
Связная аппаратура ИСЗ. На спутнике принятый сигнал сдвигается по частоте на величину 100—300 Мгц и переизлучается на Землю. Здесь мы не предполагаем обсуждать вопросы приема и коммутации сигналов, которые, по-видимому, могут быть решены. Требования к мощности передатчика ИСЗ рассмотрены ниже.

Основной наземный приемник. В наземном радиоприемнике предварительное усиление высокой частоты производится с помощью парамагнитного усилителя (мазера). Такой усилитель имеет эффективную шумовую температуру $\sim 40^\circ$ К при угле места ИСЗ над горизонтом 10° и соответствующем угле места луча приемной антенны. Эта цифра учитывает шумы неба, как это показано на фиг. 3 и 4, которые построены по материалам работы [5].

Приемник представляет собой супергетеродин с двойным или тройным преобразованием частоты и восстановлением несущей на какой-либо подходящей частоте. Поскольку принимаемый сигнал имеет сдвиг по частоте, вызванный эффектом Доплера, то частота восстанавливаемой несущей неизвестна, и поэтому должны быть предусмотрены автоматическая подстройка частоты и автоматический захват сигнала.

Основной приемник должен принять полосу частот входного сигнала и транспонировать ее по частоте в полосу час-

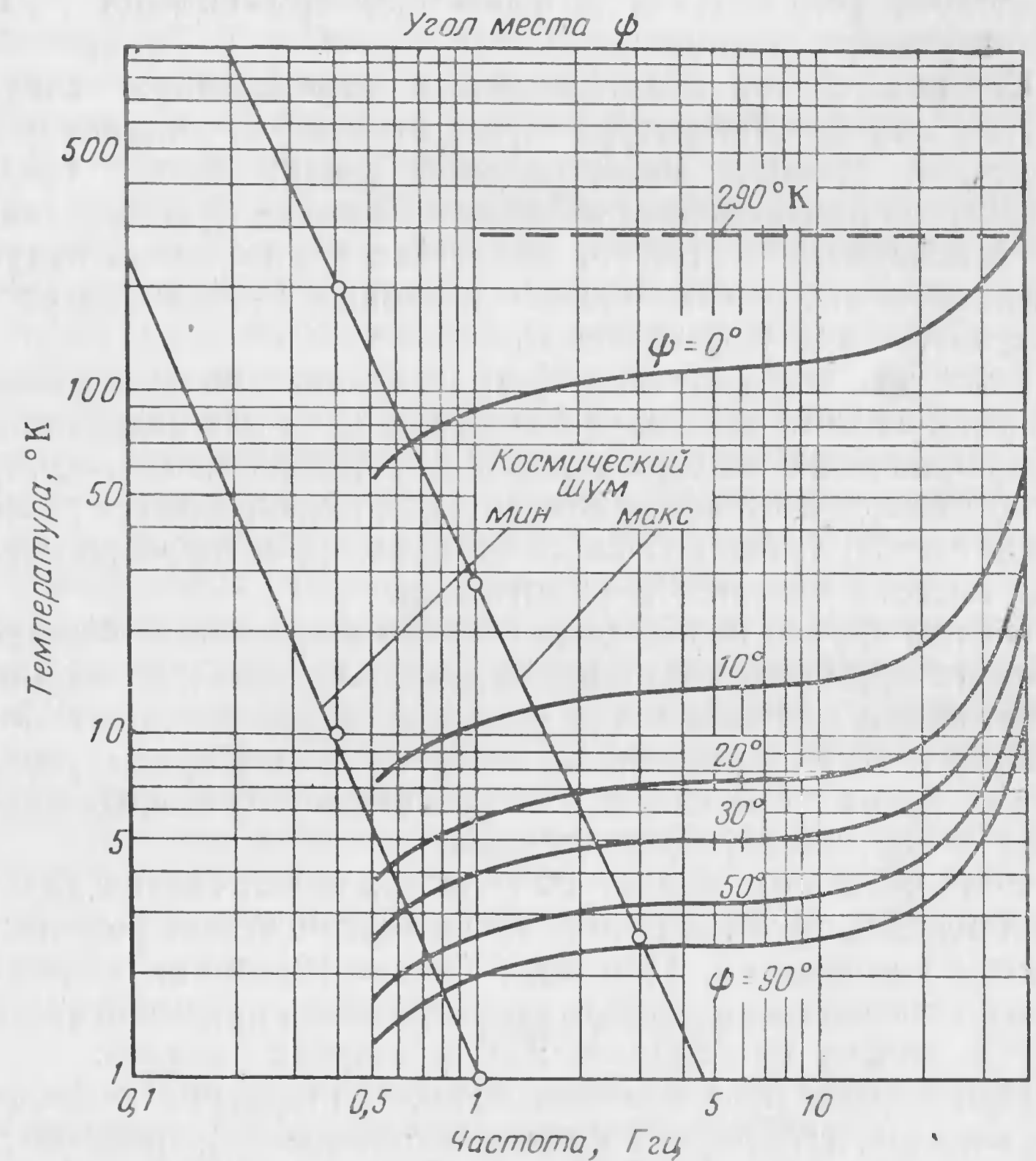
тот, занимаемую первоначальной информацией на выходе аппаратуры уплотнения на передающей станции. Полученная таким образом полоса частот, в которой заключена информация, подается на вход аппаратуры разделения каналов.



Фиг. 3. Измеренная и расчетная температура шумов неба.

Аппаратура частотного разделения каналов и приемный селектор каналов. Задачей этой аппаратуры является выделение сигналов принимаемого канала дальней наземной станции. Этот сигнал поступает на реле, управляемое речью (РУР). Сигнал этого же канала, проходящий через РУР, поступает на аппаратуру уплотнения. Он занимает определенную полосу частот. Другая наземная станция также настроена на эту полосу частот.

Система магистральной связи. В общем случае устройство оконечной станции магистральной линии связи будет отличаться от устройства наземной станции в системе связи, обслуживающей определенную площадь и использующей



Фиг. 4. Зависимость шумовой температуры, вызванной поглощением в атмосфере при идеальной антенне, от угла места ϕ и частоты.

выделение каналов. Для станции магистральной связи структура аппаратуры разделения каналов и демодулирующие частоты будут неизменными. Разделение каналов производится последовательной селекцией супергрупп,

групп и каналов. Выходы аппаратуры разделения (т. е. каждая полоса частот основного канала) подаются на детекторы *D*, выходы которых постоянно подключены (на распределительном устройстве *E* фиг. 1) к соответствующим декодирующим устройствам, и через них при помощи РУР к коммутатору радиолинии.

Система связи, обслуживающая определенную зону. В этом случае аппаратура будет отлична от аппаратуры оконечной станции магистральной связи. Кроме того, аппаратура на различных наземных станциях будет различной в зависимости от того, насколько постоянными будут соединения отдельных дальних наземных станций на распределительном устройстве *E*.

Если все декодирующие устройства постоянно связаны с определенными наземными станциями, то нет надобности в переключении входов телефонных каналов, поскольку число каналов на каждую наземную станцию является лишь малой частью от общего числа каналов, на которое рассчитана система частотного уплотнения.

В этом случае необходимо систему разделения каналов собирать из минимального числа демодуляторов и фильтров, достаточного для выделения каналов, подсоединенных постоянно к РУР. Выделенные каналы, как и в предыдущем случае, будут с выходов детекторов *D* постоянно подсоединены к соответствующим линиям.

Если некоторые или все РУР обслуживают связь с дальними наземными станциями, то возможен целый ряд различных комбинаций. При всех этих комбинациях должна быть обеспечена возможность присоединения приемной части РУР к любому из 1200 или 2000 приемных каналов.

При первом предлагаемом методе аппаратура разделения каналов, детекторы *D* и распределительное устройство *E* заменяются следующим оборудованием: для каждой входной цепи ставится устройство, подобное супергетеродинному приемнику, использующему соответствующие фильтры и смесители из основной аппаратуры уплотнения в сочетании с перестраиваемым полосовым фильтром и генераторами с изменяемой частотой.

Эти супергетеродинные приемные устройства не следует смешивать с основным радиоприемником, описанным выше. Их задачей является выделение полос индивидуальных

каналов путем настройки на часть общей полосы частот, в которой передается информация.

Во время настройки с помощью перестраиваемого контура производится грубое выделение требуемой супергруппы (как будет показано ниже, шириной 3780 кГц). Выделенная супергруппа транспонируется по частоте с помощью перестраиваемого генератора и смесителя в полосу частот, занимаемую основной супергруппой, из которой она выделяется стандартным фильтром.

Наконец, с помощью еще одного перестраиваемого генератора и смесителя сигналы канала транспонируются по частоте в полосу, занимаемую основным каналом, из которой нужный канал выделяется с помощью фильтра. Выход фильтра основного канала подается на детектор.

На практике весь описанный выше процесс может быть очень просто автоматизирован. Перестраиваемые генераторы могут изменять частоту скачками. Их можно заменить генератором стандартных сигналов, содержащим весь диапазон необходимых частот, переключаемых нажатием кнопок. Схема выделения требуемой супергруппы может содержать либо набор фильтров из аппаратуры разделения каналов, либо представлять собой перестраиваемый скачками полосовой фильтр. Перестройка этой схемы может также производиться путем нажатия кнопок.

При этом методе вхождение в связь двух наземных станций производится установкой аппаратуры разделения или супергетеродинных приемников на заранее выбранные полосы.

Модификации

Система магистральной связи. При магистральной связи возможны два различных варианта системы:

а) Стандартная аппаратура уплотнения, использующая группы по 12 каналов, занимающие, допустим, полосу частот в 48 кГц или супергруппы по 60 каналов. Спектр любого числа этих групп или супергрупп поступает на общее устройство импульсного кодирования, в котором он квантуется во времени при соответствующей тактовой частоте и кодируется при заданном числе уровней.

В этой системе требования к отдельным элементам резко возрастают по мере расширения используемой полосы час-

тот и уменьшения длительности импульсов. Однако при не слишком широких полосах частот, когда еще не возникает больших затруднений конструктивного порядка, преимуществом такой системы является возможность использования одного устройства импульсного кодирования вместо нескольких. Результаты экспериментального исследования высокоскоростной ИКМ приведены в работе [20].

Полученная после импульсного кодирования полоса частот начинается от нуля и поэтому необходимо транспонировать ее в область более высоких частот, подавляя одну боковую полосу. Увеличение ширины полосы частот за счет неидеальности характеристики затухания фильтра будет равно увеличению общей полосы частот за счет неидеальности частотных характеристик индивидуальных фильтров при индивидуальном подавлении боковых полос.

Этот способ несколько хуже по сравнению с системой импульсного кодирования каждого канала с равным шагом квантования, поскольку при кодировании суммарного напряжения нескольких каналов приходится увеличивать число уровней квантования. Это означает, что разрядность кода должна быть увеличена, что приводит к необходимости расширения полосы частот. По сравнению с системой импульсного кодирования отдельных телефонных каналов при оптимально изменяющихся шагах квантования система кодирования группы каналов дополнительно проигрывает еще и в ширине полосы используемых частот, поскольку в этом случае невозможно использовать плавное изменение шагов квантования¹⁾.

б) Группа из n телефонных каналов кодируется в следующем порядке. Производится индивидуальное кодирование каждого телефонного канала, причем для каждого канала используются импульсы длительностью в n раз меньше, чем интервал времени, отведенный на один канал. Импульсы каждого канала следуют по времени один за другим, так что импульсы, несущие информацию в виде кодовых групп, чередуются во времени, тем самым образуя снова многоканальную систему с уплотнением во времени.

¹⁾ Система кодирования с изменяющимися шагами квантования предусматривает наличие компандеров: компрессоров динамического диапазона речи на передающем конце и экспандеров (расширителей) — на приемном. — Прим. ред.

Недостатком этой системы является наличие индивидуальной ИКМ каждого канала; преимуществом ее является несколько более узкая полоса, чем в описанной выше системе, даже если не применяется плавное изменение шагов квантования. При использовании кода, обеспечивающего оптимальное использование мощности передатчика, плавное изменение шагов квантования, по всей вероятности, применяться не будет.

Применение описанных выше модификаций при разделении каналов. Обе описанные выше системы могут быть применены при разделении каналов, если все каналы, составляющие единую многоканальную систему с уплотнением во времени, передаются только с одной станции и принимаются только одной станцией; соответствующая полоса частот транспонируется в другую область системой многоканального частотного уплотнения.

Получаемая таким образом система многоканального частотного уплотнения не будет обладать универсальностью, присущей основной (описанной выше) системе, например, системе магистральной связи. Потребуется более тщательное размещение частотных полос, модулирующих частот и т. п. В принципе, однако, серьезных технических затруднений не возникнет.

С точки зрения удобства эксплуатации, по-видимому, необходимо постоянно закрепить за двумя станциями для двухсторонней связи между ними определенные одинаковые каналы.

Поправка на сдвиг частоты из-за эффекта Допплера. Эта поправка пренебрежимо мала в случае системы с ИСЗ на синхронной орбите безразлично, будь то в системе магистральной связи или в системе, обеспечивающей связью определенную площадь.

Величина сдвига частоты из-за эффекта Допплера при прохождении сигнала с Земли на ИСЗ (или наоборот) зависит от длины волны и составляющей скорости ИСЗ относительно наземной станции по направлению линии прямой видимости ИСЗ — наземная станция.

Скорость ИСЗ относительно Земли имеет две составляющих: скорость ИСЗ в инерциальной системе координат и скорость наземной станции в инерциальной системе координат, определяемая вращением Земли,

Наибольшие изменения в составляющей скорости ИСЗ по направлению линии прямой видимости наблюдаются для наземных станций, расположенных на экваторе на границах площади, обеспечиваемой связью, т. е. при наименьших допустимых углах места ИСЗ.

Влияние вращения Земли на составляющую скорости по линии прямой видимости. Скорость вращения Земли на экваторе составляет 464 м/сек и ее влияние на составляющую скорости по направлению линии прямой видимости определяется как $464 \cos \psi$ м/сек, где ψ — угол места ИСЗ над горизонтом.

Если наименьший допустимый угол места ИСЗ составляет 10° , то максимальное приращение составляющей скорости по направлению линии прямой видимости ИСЗ, находящегося на экваториальной орбите, за счет вращения Земли равно

$$464 \times 0,9848 = 457 \text{ м/сек.}$$

Поскольку мы интересуемся максимальными изменениями составляющей скорости ИСЗ, связанной с составляющей скорости Земли, которая добавляется или вычитается из скорости ИСЗ, будем считать, что наземные станции расположены на краю площади, обеспечиваемой связью, где $\psi = 10^\circ$, так что приращение скорости за счет вращения Земли будет всегда одинаковым и равным ± 457 м/сек.

В табл. 1 приведены пределы изменения сдвига частоты за счет эффекта Доплера от обеих указанных причин для различных значений высоты ИСЗ при двух различных длинах волн.

Максимальный относительный сдвиг частот каналов для различных наземных станций. Случай 1. Сдвиг на ИСЗ. Максимальный относительный сдвиг возникает, когда частоты одного канала за счет эффекта Доплера сдвигаются вверх, а другого — по той же причине сдвигаются вниз на ту же величину. Величины относительного сдвига в этом случае вдвое больше величин, приведенных в табл. 1.

Случай 2. Сдвиг на Земле. Максимальный относительный сдвиг частот двух каналов может иметь место в случае приема наземной станцией сигналов такой станции, у которой сдвиги за счет эффекта Доплера складываются из сигналов другой станции, у которой сдвиги частоты компен-

Таблица 1

Предельные значения доплеровского сдвига частоты, для различных длин волн при передаче с Земли на ИСЗ или наоборот

Экваториальная орбита

Минимальный угол места ИСЗ 10°

Направление вращения ИСЗ совпадает с вращением Земли

Высота ИСЗ, км	Орбитальная скорость ИСЗ, км/сек	Составляющая скорости ИСЗ по направлению линии прямой видимости, км/сек	Составляющая сдвига частоты от скорости ИСЗ, кгц	
			$\lambda = 5 \text{ см}$	$\lambda = 15 \text{ см}$
4 800	5,97	3,347	57,7	19,2
9 600	5,0	1,958	30,1	10,0
12 800	4,56	1,487	20,6	6,9
19 200	3,496	0,854	8,0	2,7
28 800	3,364	0,6	1,85	0,62
35 810 (стационарная орбита)	3,077	0 457	0	0

сируются. Результатом, как и в случае 1, будет удвоение величины сдвига частоты, приведенной в табл. 1.

Для устранения влияния доплеровского сдвига частоты должен быть применен разнос полос частот, закрепленных за наземными станциями, по крайней мере на удвоенное значение максимального сдвига частоты из-за эффекта Доплера.

Б. Числовые значения, иллюстрирующие основную систему

Определение

Под «основной» в данном случае понимается система магистральной связи, передающая требуемое количество супергрупп каналов с индивидуальной ИКМ.

Основная система является отправной при описании, например, аппаратуры наземной станции, составляющей

часть системы, обслуживающей заданную площадь. Для этой цели приходится несколько видоизменять систему, как это было описано выше, не используя часть аппаратуры или вводя специальные супергетеродинные приемники вместо аппаратуры частотного уплотнения и распределительного устройства и т. д.

Эффективная передаваемая полоса частот канала. Описываемая система имеет эффективную полосу передаваемых частот 300—3400 гц. Такая полоса является стандартной при передаче речи по коаксиальному кабелю при помощи аппаратуры многоканального частотного уплотнения. При этом на конечных станциях требуется минимальная обработка сигналов. Система способна также передавать полосу частот 200—3050 гц, используемую для телефонной связи по трансатлантическому кабелю между Ньюфаундлендом и Обаном.

Импульсно-кодовая модуляция

Импульсное кодирование отдельных телефонных каналов. Примем, что в любом телефонном канале нет составляющих напряжения с частотой выше 4 кгц. Если такие составляющие имеются, они должны быть отфильтрованы.

Напряжение звуковой частоты сперва усиливается усилителем, выравнивающим изменения амплитуды напряжения, связанные с различной громкостью речи и различием характеристик аппаратуры. Сигнал, полученный на выходе этого усилителя, затем кодируется. При этом используется кодирующее устройство с плавно изменяющимся шагом квантования; закон изменения шага квантования выбирается оптимальным с точки зрения уменьшения шумов квантования. Как правило, величина шага увеличивается пропорционально напряжению звуковой частоты. Нам неизвестны работы по определению оптимального закона изменения величины шага квантования. Плавное изменение величины шага может осуществляться соответствующим нелинейным устройством: либо с помощью нелинейного преобразователя, после которого включено линейное квантующее устройство, либо с помощью нелинейного квантующего устройства. При использовании кода, обеспечивающего оптимальное использование мощности передатчика, плав-

ное изменение шага может и не применяться (об этом подробнее будет сказано ниже).

Импульсный код. Импульсный код характеризуется целым рядом различных параметров, среди которых можно назвать следующие:

1) Метод преобразования напряжения в квантованные уровни, включая число уровней квантования.

2) Разрядность кода.

3) Метод, с помощью которого кодовые комбинации связываются с уровнями квантования.

Метод квантования. Обычно напряжением выше некоторого уровня, характеризуемого весьма малой вероятностью появления, пренебрегают; предположим, что для этого использован ограничитель. Оптимальной регулировкой ограничителя обычно считают такую, при которой ограничиваются уровни напряжения, вероятность превышения которых менее 1%. Ограничитель ограничивает как положительные, так и отрицательные значения напряжения, превышающие этот уровень.

Рассмотрим процесс квантования положительных уровней напряжения, имея в виду, что квантование отрицательных уровней производится аналогично.

Весь диапазон положительных значений напряжения может быть разделен либо на равные шаги, либо на шаги с равновероятными уровнями квантования. В последнем случае применяется плавное изменение шага, увеличивающегося по мере роста напряжения. Может быть использован и другой закон изменения шага квантования.

Опыт показывает, что даже если закон изменения величины шагов квантования не оптимизирован, все же приемлемая разборчивость и качество речи могут быть обеспечены либо 7-разрядным кодом с равными шагами квантования, либо 6-разрядным кодом с плавным законом изменения шага квантования.

Двоичный код. Предлагается использование кода, характеризуемого либо отсутствием, либо наличием импульса с определенной амплитудой. Все импульсы имеют одну и ту же амплитуду. Такой код называется двоичным.

Разрядность кода. Существуют коды трех видов: 7-разрядный код с равными шагами квантования; 6-разрядный код с плавным изменением равновероятных шагов кванто-

вания; условный двоичный цифровой код с равными шагами квантования, описанный в Приложении II.

В каждом случае считается, что в код введен дополнительный интервал времени, обеспечивающий протекание необходимых при кодировании и декодировании процессов. Это делается для удобства расчета отношения сигнал/шум.

Связь уровней квантования с кодовыми комбинациями. В случае описанной выше системы ИКМ, использующей 6-разрядный равновероятный двоичный код, имеется ограниченное число кодовых комбинаций; все они используются для отображения уровней напряжения. Ограничение числа кодовых комбинаций происходит вследствие равной вероятности каждого уровня напряжения. При заданном числе двоичных единиц в коде средняя частота следования импульсов и, таким образом, вероятность появления импульса в любой момент времени не зависят от способа, определяющего связь между уровнями квантования и представляющими их кодовыми комбинациями.

7-разрядный двоичный код, обеспечивающий оптимальное использование мощности передатчика. Если в описанной выше системе ИКМ установить такой закон изменения шагов квантования, при котором число импульсов будет настолько возможно пропорционально значению уровня, то средняя частота последовательности импульсов будет сведена к минимуму и, таким образом, уменьшится вероятность появления импульса в любой момент времени.

Пример. В табл. 2 приведен пример 7-разрядного двоичного кода, в котором в основном удовлетворяются эти условия. Квантованные уровни положительных напряжений в табл. 2 отличаются от уровней отрицательного напряжения той же величины различием кодов. Каждый уровень представлен числом, показывающим квантованный уровень напряжения от нуля до максимума (положительного или отрицательного), и знаком, указывающим полярность напряжения. Исключение составляет уровень, среднее значение которого равно нулю, отмеченный крайними его пределами: $+1/2$ и $-1/2$.

Такой код требует минимальной мощности передатчика на ИСЗ. Однако кодирование и декодирование в данном случае не может производиться простыми и обычными методами, например, с помощью цифровых вольтметров и обыч-

Таблица 2

Код, обеспечивающий минимальную мощность передатчика

Уровень (определен по верхнему значению)	Число импульсов в кодовой комбинации	Число уровней, соответствующее кодовой комбинации при данном числе импульсов
$\pm 0,5$	0	1
+1,5 до +4,5 и -1,5 до -3,5	1	7
+5,5 до +14,5 и -4,5 до -14,5	2	21
+15,1 до +32,5 и -15,5 до -31,5	3	35
+33,5 до +49,5 и -32,5 до -49,5	4	35
+50,5 до +60,5 и -50,5 до -59,5	5	21
+61,5 до +63,5 и -60,5 до -63,5	6	7
Общее число уровней и кодовых комбинаций		127

ных преобразователей дискретных данных в непрерывные. Применение такого кода дает возможность уменьшения мощности передатчика спутника в 5 раз по сравнению со случаем применения обычной ИКМ (см. Приложение II).

Способ кодирования и декодирования при таком коде описан в работе [16].

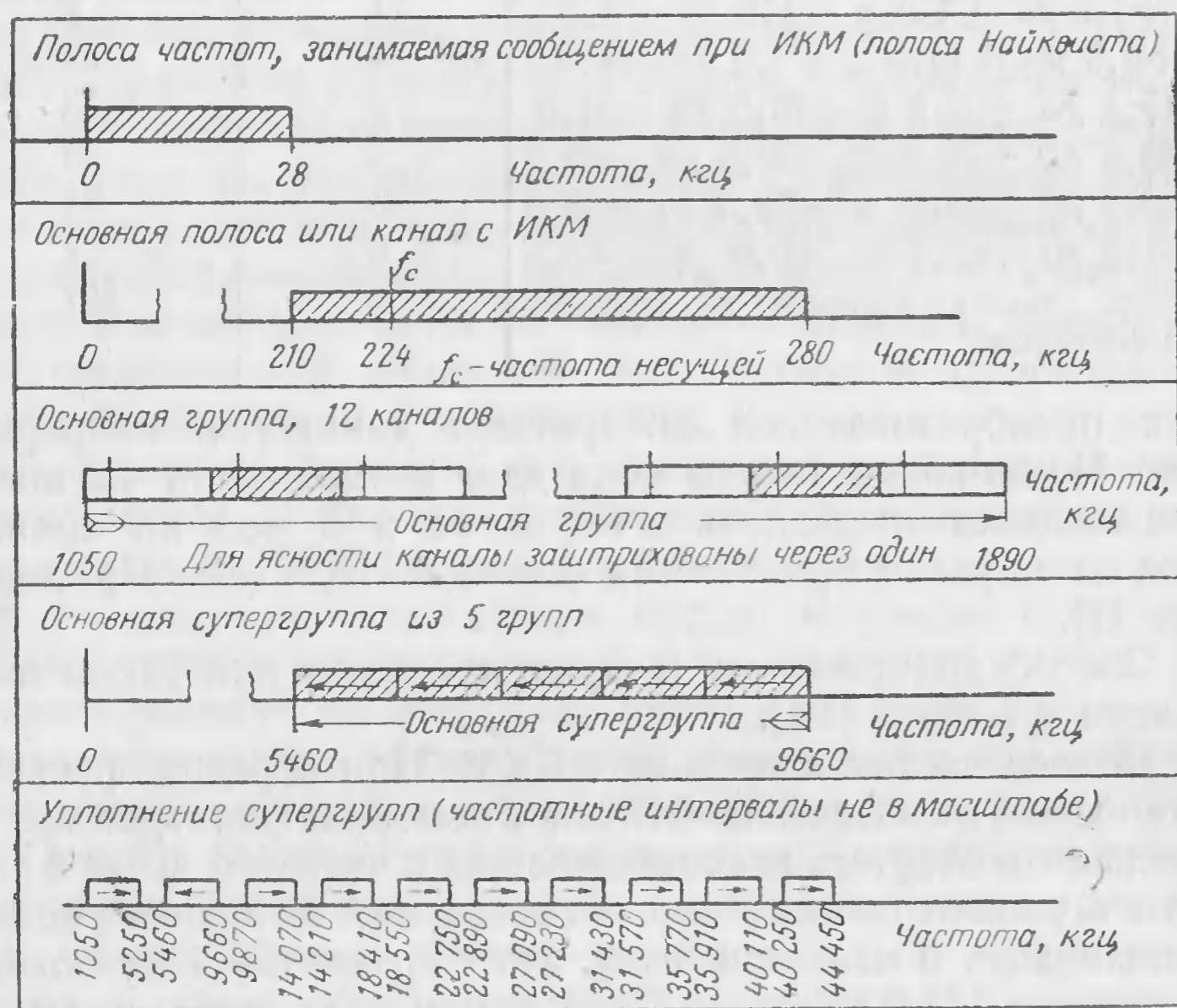
Полоса частот канала при ИКМ. При передаче речевых сообщений в полосе 300—3400 гц с помощью фильтров можно обеспечить отсутствие составляющих с частотой выше 4 кгц. Поэтому квантование речевых сообщений во времени можно производить с частотой 8 кгц, что соответствует тактовому интервалу $1/8$ 000 сек. В 7-разрядном коде (табл. 2) может понадобиться введение еще одного дополнительного временного интервала для переключений, так что код по существу становится 8-разрядным. Для простоты рассуждений, однако, будем рассматривать 7-разрядный код. Для сигнала с максимальной частотой 4 кгц необходима частота квантования 8 кгц, что дает частоту следования импульсов закодированного сигнала 56 000 гц. Для передачи такой последовательности необходима полоса от 0 до 28 кгц.

Импульсное кодирование группы уплотненных по частоте каналов. В этом случае более оправдано применение

сравнительно более сложной аппаратуры, необходимой для кодирования типа, приведенного в табл. 2, поскольку число кодирующих и декодирующих устройств при этом уменьшается.

Уплотнение каналов по частоте (фиг. 5)

Здесь мы не предполагаем подробно описывать модулирующие устройства, используемые для транспонирования



Фиг. 5. Многоканальное частотное уплотнение.

Пример, иллюстрирующий следующие условия: код 7-разрядный, тактовая частота 8000 гц, частота следования импульсов 56 000 гц, полоса Найквиста 28 кГц, основная полоса ИКМ 70 кГц.

спектра частот основного канала с ИКМ в отведенное для него место в группе каналов, для транспонирования спектра основной группы каналов в отведенное для нее место в супергруппе и т. д. Исключение будет сделано для первой ступени модуляции. Реализуемость предлагаемой системы не определяется приводимыми здесь числовыми значениями, хотя без них, очевидно, предлагаемая система покажется

несколько неясной. Однако приведенные здесь значения, по-видимому, близки к тем, которые могут использоваться в практических системах.

Числовые значения, указанные на фиг. 5, получены путем умножения частотных полос, принятых для стандартных и основных групп, супергрупп и основных супергрупп, на отношение полосы, занимаемой каналом с ИКМ (вычисление приведено ниже) к 4 кГц. Ширина полосы 4 кГц используется в стандартной аппаратуре уплотнения. При этом к фильтрам и модуляторам не предъявляется каких-либо невыполнимых требований [8—10].

Формирование основного канала с ИКМ в полосе частот 210—280 кГц. Этот канал соответствует основному каналу шириной 4 кГц. Соответствующий процесс происходит при образовании каналов подгруппы в экономичной системе частотного уплотнения, использующей полосу звуковых частот от 200 до 3050 гц [3]; при этом подавление одной боковой полосы частот не производится.

Поскольку сообщение на выходе каждого импульсного кодирующего устройства занимает полосу частот от 0 до 28 кГц, необходимо образовать так называемый основной канал с ИКМ. Этот канал образуется путем модуляции некоторой несущей частоты (предлагается частота 224 кГц) указанным спектром частот. Затем выделяется верхняя боковая полоса частот, несущая частота и частично подавленная нижняя боковая полоса. Выделение производится с помощью фильтров и корректирующих цепей, рассчитанных таким образом, чтобы после детектирования получилась плоская частотная характеристика.

Опыт показывает, что если не делать очень сложных фильтров, то верхняя боковая полоса с учетом полосы затухания фильтра должна иметь ширину 56 кГц (т. е. крутизна фронтов фильтра не слишком большая), а нижняя боковая полоса полностью подавлена в области частот, отстоящих на 14 кГц от несущей. Поэтому для уплотнения используется полоса частот от $224 - 14 = 210$ кГц до $224 + 56 = 280$ кГц, шириной 70 кГц. Таким образом, коэффициент расширения полосы [7] составляет $70/4 = 17,5$.

Эффективная ширина верхней боковой полосы частот может быть уменьшена при применении более сложных фильтров.

Таким образом, выход каждого из импульсно-кодовых модуляторов, включенных в каждый телефонный канал основной системы, используется для модуляции несущей частоты 224 кГц и образования описанным выше способом полосы частот от 210 до 280 кГц, которая здесь называется основным каналом с ИКМ.

Система магистральной связи. Формирование основной многоканальной группы, уплотненной по частоте 12 каналами с ИКМ в полосе 1050—1890 кГц (шириной 840 кГц). Путем модуляции каждым из 12 основных каналов с ИКМ соответственно 12 частот и выделения нижних боковых полос указанные 12 каналов размещаются в полосе частот 1050—1890 кГц; таким образом образуется основная группа.

Формирование основной супергруппы из 60 телефонных каналов с ИКМ в полосе 5460—9660 кГц (шириной 4200 кГц). Путем модуляции каждой из 5 основных канальных групп с ИКМ соответствующих 5 частот и выделения нижних боковых полос указанные 5 групп размещаются в полосе частот 5460—9660 кГц; таким образом образуется супергруппа.

Уплотнение супергрупп. Модулируя каждой из основных супергрупп подходящую частоту и выделяя в каждом случае нижнюю боковую полосу, можно уплотнить супергруппы по частоте с тем, чтобы они занимали полосы частот в соответствии с таблицей 3, в которой приведены полосы для первых десяти супергрупп. Между первыми тремя супергруппами частотный интервал принимается равным 210 кГц, между остальными супергруппами — по 140 кГц.

Таким образом, 10 супергрупп, содержащих 600 телефонных каналов, занимают полосу частот 44 МГц. Попутно

Таблица 3

Частотные спектры первых 10 супергрупп

Номера супергрупп	Полоса частот, кГц	Номера супергрупп	Полоса частот, кГц
1	1 050—5 250	6	22 890—27 090
2	5 460—9 660	7	27 230—31 430
3	9 870—14 070	8	31 570—35 770
4	14 210—18 410	9	35 910—40 110
5	18 550—22 750	10	40 250—44 450

следует отметить, что даже для парамагнитного усилителя полоса частот в 44 МГц является очень широкой, так как по имеющимся данным ширина полосы усиления парамагнитного усилителя (мазера) составляет 25 МГц [4]. Хотя это может вызвать значительные затруднения при построении системы магистральной связи, когда на одной наземной станции должны приниматься и передаваться сообщения по всем 600 телефонным каналам, при построении систем связи, обслуживающих заданную площадь, таких затруднений не возникает, поскольку число каналов для одной станции вряд ли превзойдет 300, а в этом случае требуется полоса частот шириной немного более 22 МГц.

Лаборатории фирмы «Бэлл телефон» ведут разработки парамагнитных усилителей, которые должны обеспечить нужные для связи с помощью ИСЗ полосы частот [25].

Частотное уплотнение для связных систем, обслуживающих заданные площади.

Отличия этой системы от системы магистральной связи достаточно подробно освещены выше.

В. Излучаемая полоса частот, служащая для передачи сообщений

Система магистральной связи или основная система. Полоса частот, в которой передаются сообщения, после уплотнения занимает спектр 1,05—44,45 МГц. Эту полосу частот шириной 43,4 МГц необходимо транспонировать в область частот 1000—10 000 МГц. В настоящей статье будут рассмотрены два диапазона: 2000 и 6000 МГц. Предполагается, что полоса частот 1,05—43,4 МГц с помощью модуляции соответствующего вида (возможно, с помощью двойной модуляции) транспонируется в один из следующих диапазонов: 5956,6—6000 МГц или 1956,6—2000 МГц.

Сигналы, занимающие эти спектры частот, затем усиливаются и излучаются. Не исключается возможность модуляции в последнем каскаде усиления.

Система связи, обслуживающая заданную площадь. Вполне понятно, что каждая наземная станция системы связи, обслуживающей определенную площадь, использует необходимую часть аппаратуры уплотнения и излучает на отведенных для нее участках диапазона частот.

Г. Регулировка мощности СВЧ, излучаемой наземными передатчиками и ИСЗ

Необходимо предусмотреть равенство излучаемой ИСЗ импульсной мощности в любом канале вне зависимости от положения наземной станции, передавшей импульс на ИСЗ. Это требование должно выполняться как в системах магистральной связи, так и в системах, обслуживающих связью определенные площади. Заданная величина импульсной мощности должна, конечно, быть одинаковой для всех наземных станций и должна обеспечивать расчетное статистическое значение нагрузки передатчика всеми каналами.

Д. Выбор рабочей частоты [18]

Пассивный ИСЗ. Можно показать, что в случае использования ИСЗ в качестве пассивного ретранслятора при мощности наземного передатчика 100 квт на частоте 6 Гц и при диаметре наземных антенн 30 м мощность переизлученная ИСЗ для 600 дуплексных каналов составит 1 вт при диаметре сферического ИСЗ 42 м и расстоянии 8000 км (т. е. предельном расстоянии для высоты орбиты ИСЗ 4800 км). Это значительно меньше, чем мощность, которую должен излучать бортовой передатчик на активном ИСЗ при всенаправленной антенне. Последняя мощность составляет 6 вт или 12 вт при коэффициенте усиления антенны 0,5.

На более низкой частоте усиление наземных антенн будет много меньше и в соответствии с этим уменьшится мощность, переизлучаемая пассивным ИСЗ.

Таким образом, выбор частоты 6 Гц для системы связи с помощью пассивного ИСЗ можно считать вполне обоснованным.

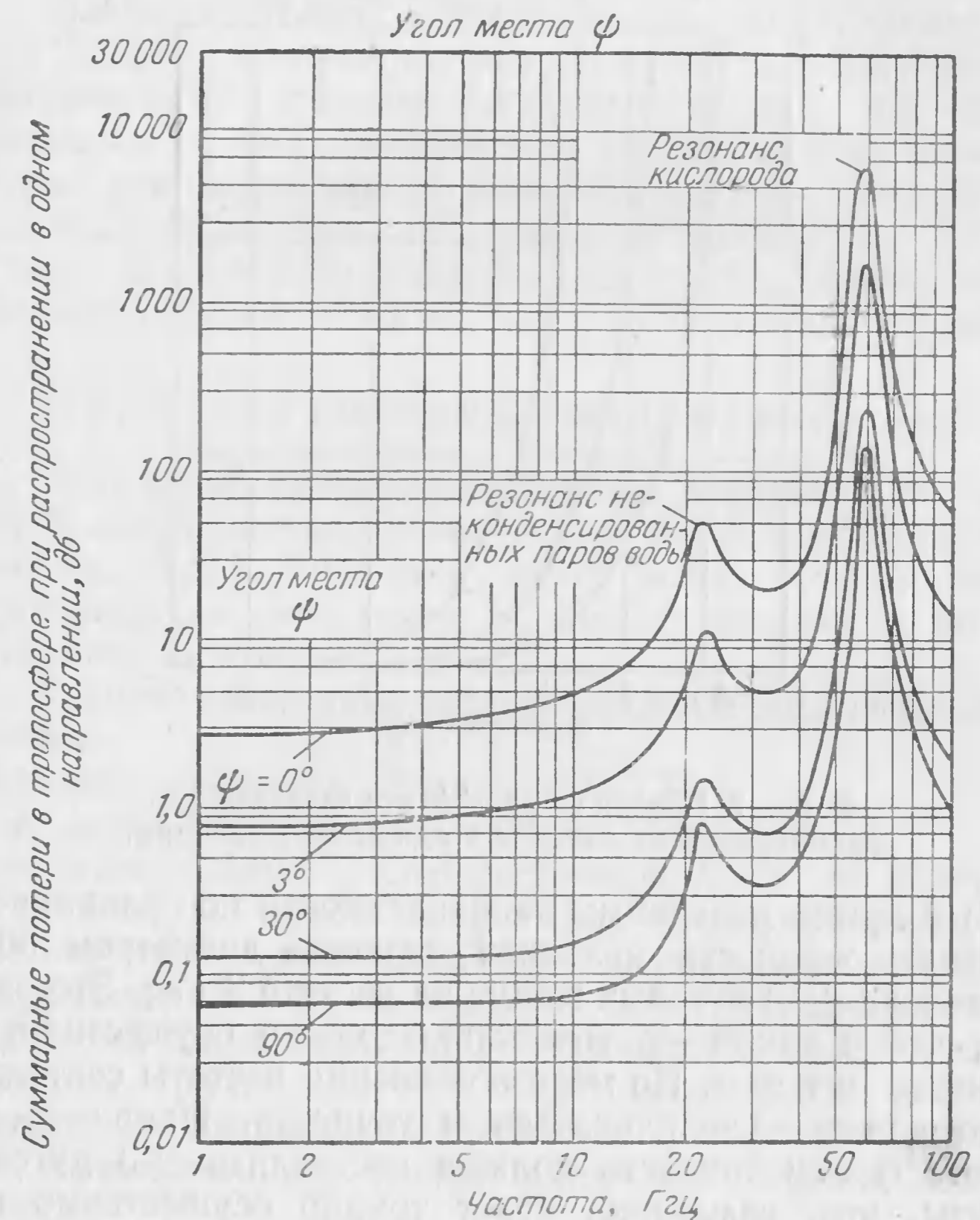
Активный ИСЗ. Для систем связи с помощью ИСЗ предлагается диапазон частот 1—10 Гц. Обоснованием этому служат фиг. 3 и 6.

Автор считает наиболее подходящими частоты в диапазоне 2 Гц по следующим причинам:

1) На частоте 2 Гц космические или галактические шумы меньше атмосферных для наиболее вероятных минимальных углов места (5 и 10°) диаграммы направленности антенны

приемной станции, в то время как на более высоких частотах атмосферные шумы возрастают.

2) Шумы, вызываемые осадками, растут с повышением частоты.

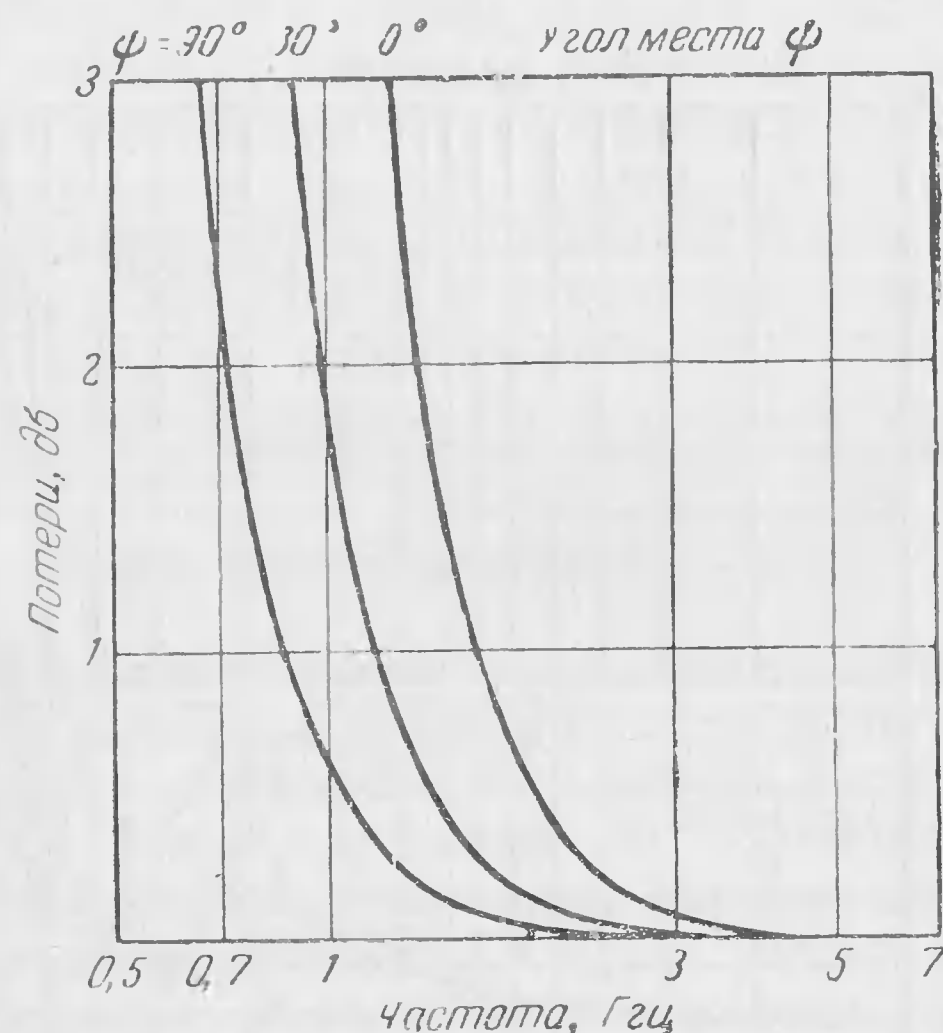


Фиг. 6. Суммарное поглощение энергии в тропосфере при распространении волны в одном направлении.

3) Эффективная температура Земли, наблюдаемая с ИСЗ, понижается с понижением частоты.

4) На частотах 2 Гц потери энергии в тропосфере (см. фиг. 6), которые малы, и потери в осадках, которые могут быть весьма велики, растут с увеличением частоты.

5) Передатчики наземных станций, работающие в диапазоне 2—4 Гц, по всей вероятности, легче всего обеспечить мощными электронными лампами.



Фиг. 7. Потери из-за эффекта Фарадея при распространении волны в одном направлении.

6) Ширина диаграммы направленности по половинному значению мощности наземной антенны диаметром 30 м составляет ± 18 дуговых минут на частоте 2 Гц. Это означает, что с такой же точностью должно осуществляться движение антенны. По мере повышения частоты соответственно должна увеличиваться и точность. Например, на частоте 6 Гц точность должна составлять ± 3 дуговых минуты, что, возможно, будет трудно осуществимо при связи с ИСЗ, находящимися на несинхронных орбитах.

Влияние ионосферы. Согласно работе [12] потери в ионосфере составляют 0,3 дБ на частоте 100 Мц и уменьшаются с ростом частоты.

По данным того же источника, максимальное угловое отклонение луча, проходящего через ионосферу, на частотах вблизи критической составляет несколько миллирадиан и уменьшается обратно пропорционально квадрату частоты.

На фиг. 7 показаны значения потерь за счет эффекта Фарадея для волн с линейной поляризацией. Таким образом, потери в ионосфере на частотах выше 2 Гц, по-видимому, ничтожно малы и ими можно пренебречь.

Размеры антенны на ИСЗ. Необходимое усиление антенны ИСЗ, при котором ширина диаграммы направленности по половинному значению мощности такова, что антенна освещает ту часть поверхности Земли, во всех точках которой угол места антенн наземных станций, направленных на ИСЗ, будет более 10° , составляет $28,8^\circ$ при к. п. д. антенны, равном 50%. Из этого следует, что диаметр антенны должен составлять 70 см, что, по-видимому, приемлемо.

Наличие свободных диапазонов частот

Как видно из приводимой ниже выдержки из работы [11], весь диапазон частот от 1 до 6 Гц в настоящее время уже занят. Диапазон частот выше 8,4 Гц не рассматривается, поскольку, по нашему мнению, он не представляет интереса.

В приводимой ниже таблице приняты следующие обозначения:

- 1-я зона — Африка, Европа и СССР;
- 2-я зона — Южная и Северная Америка;
- 3-я зона — Азия, Юго-Восточная Азия и Австралия.

Выход из такого положения, когда подходящие для систем связи с помощью ИСЗ диапазоны уже заняты другими службами, состоит, по-видимому, в совместном использовании этих диапазонов. Ввиду чрезвычайно малой мощности сигнала, принимаемого с ИСЗ, такой выход, возможно, окажется неудовлетворительным. Необходимо провести экспериментальные исследования для решения этого вопроса.

Влияние осадков

Типичные значения потерь, вносимых дождем, приведены в таблице 5. Данные таблицы получены из фиг. 7 работы [2] в предположении допустимости экстраполяции с 10 до 15 см и при введении поправки на температуру (0°C), при которой потери на более низких частотах максимальны.

Таблица 4

Рекомендуемые частоты в диапазоне 1—10 Гц
(Частоты в Мц)

1-я зона	2-я зона	3-я зона
960—1215	Самолетная радионавигация	—
1215—1300	Радиолокация Радиолюбительская связь	— —
1300—1350	Самолетная радионавигация Радиолокация	— —
1350—1400 Стационарная связь Подвижная связь Радиолокация	1350—1400 — — —	Радиолокация — — —
1400—1427	Радиоастрономия	—
1427—1429	Космическая связь Стационарная связь Связь с подвижными объектами (кроме связи с самолетами) Связь Земля — космос	— — —
1429—1535 Стационарная связь Подвижная связь (кроме связи с самолетами)	1429—1435 Стационарная и подвижная связь	1429—1535 Стационарная и подвижная связь
— —	1435—1535 Стационарная и подвижная связь	— —

Продолжение табл. 4

1-я зона	2-я зона	3-я зона
1535—1660	Самолетная радионавигация	—
1660—1700 —	Метеорологическая служба. Стационарная связь Подвижная связь (кроме связи с самолетами)	— —
1700—1710 Стационарная связь Космическая связь Подвижная связь Связь Земля — космос	1700—1710 — — — —	— Стационарная связь Подвижная связь Космическая связь Связь Земля — космос
1710—2290 Стационарная связь Подвижная связь	1710—2290 — —	— Стационарная связь Подвижная связь
2290—2300 Стационарная связь Космическая связь Подвижная связь Связь Земля — космос	2290—2300 — — — —	— Стационарная связь Подвижная связь Космическая связь Связь Земля — космос
2300—2450 Стационарная связь Радиолюбительская связь Подвижная связь Радиолокация	2300—2450 — — — —	— Радиолокация Радиолюбительская связь Стационарная связь Подвижная связь
2450—2550 Стационарная связь Подвижная связь Радиолокация	2450—2550 — — —	— Стационарная связь Подвижная связь Радиолокация

Продолжение табл. 4

1-я зона	2-я зона	3-я зона
2550—2700	Стационарная связь Подвижная связь	— —
2700—2900	Самолетная радиона- вигация Радиолокация	— —
2900—3100	Радионавигация Радиолокация	— —
3100—3300	Радиолокация	—
3300—3400 Радиолокация	— 3300—3500	Радиолокация Радиолюбительская связь
3400—3600 Стационарная связь Подвижная связь Радиолокация	3500—3700 Стационарная связь Подвижная связь Радиолокация	3500—3700 Радиолокация Стационарная связь Подвижная связь
3600—4200 Стационарная связь Подвижная связь	3700—4200 — —	— Стационарная связь Подвижная связь
4200—4400	Самолетная радиона- вигация	—
4400—5000	Стационарная связь Подвижная связь	— —
5000—5250	Самолетная радиона- вигация	—
5250—5255	Радиолокация Космическая связь Связь Земля — космос	— — —

Продолжение табл. 4

1-я зона	2-я зона	3-я зона
5255—5350	Радиолокация	—
5350—5460	Самолетная радиона- вигация Радиолокация	— —
5460—5470 —	Радионавигация Радиолокация	— —
5470—5650 —	Морская радионави- гация Радиолокация	— —
5650—5850 —	Радиолокация Радиолюбительская связь	— —
5850—5925 Стационарная связь Подвижная связь	5850—5925 Радиолокация Радиолюбительская связь	5850—5925 Стационарная связь Подвижная связь Радиолокация

Таблица 5

Потери в осадках, отнесенные к расстоянию 16 км (дб)
для различных частот

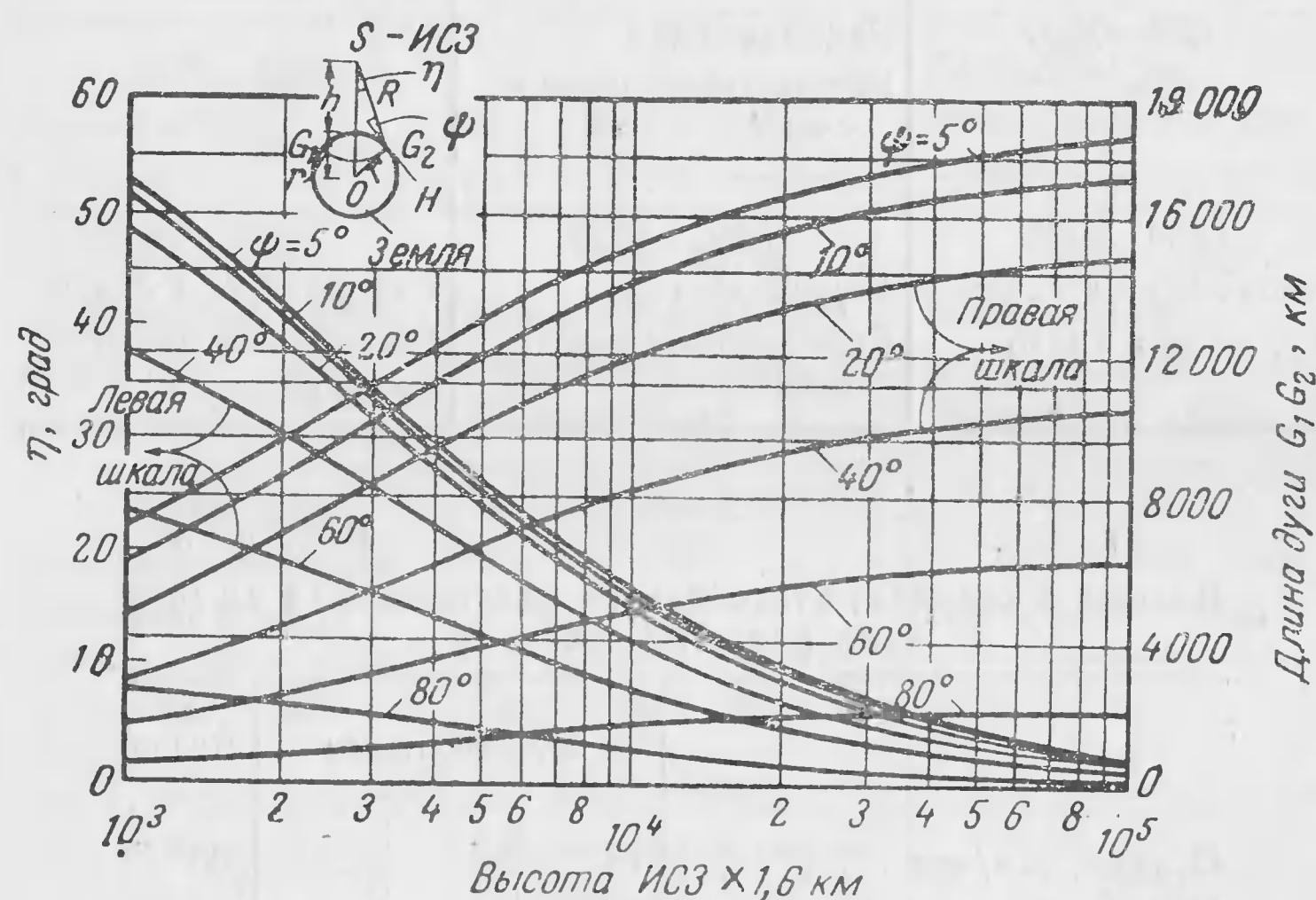
	Великобритания			Индия
Осадки, мм/час	13	26	52	300
Число раз в год, когда осадки длятся больше 3 мин	12	4	1	1
6 Гц	1,0	2,0	4,0	23,1
3 »	0,12	0,24	0,48	2,9
2 »	0,006	0,012	0,024	0,13

Данные таблицы не очень резко подчеркивают преимущество частоты 2 Гц по сравнению с 6 Гц, например для Великобритании. Сведения, касающиеся остальной части земного шара, недостаточны. Тем не менее мы считаем необходимым выбрать возможно более низкие частоты, ограничиваемые только размерами антенны ИСЗ, при условии, что частота не будет меньше 2 Гц.

3. Импульсная мощность передатчика ИСЗ

А. Геометрия ИСЗ — Земля

На диаграммах, помещенных в углах фиг. 8—10, показаны ИСЗ в точке S , находящейся над Землей с радиусом r на высоте h , и две наземные станции G_1 и G_2 , расположен-

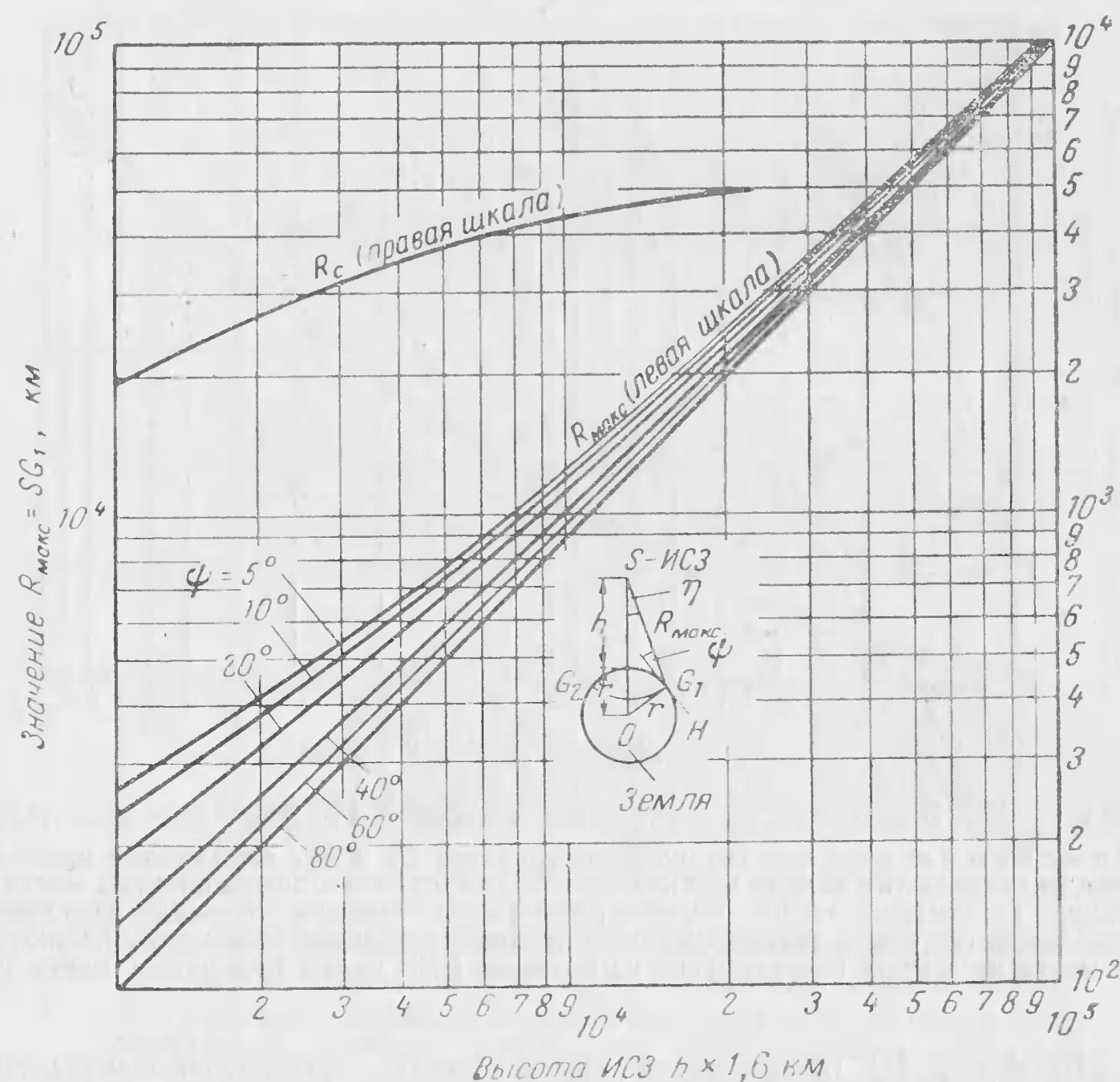


Фиг. 8. Геометрические соотношения в системе ИСЗ—Земля.

Пояснение: окружность, проходящая через G_1 и G_2 , определяет предел площади перекрытия, исходя из минимально допустимого значения угла места ψ .

ные на предельном расстоянии, обеспечиваемом связью с помощью ИСЗ. Это расстояние определяется минимально допустимым углом места ИСЗ над горизонтом ψ . Линия

G_1H проведена горизонтально через наземную станцию G_1 . При этом $\eta = OSG_1$ — угол между продолжением радиуса Земли через ИСЗ и линией прямой видимости ИСЗ — наземная станция G_1 ; ψ — минимально допустимый угол места ИСЗ



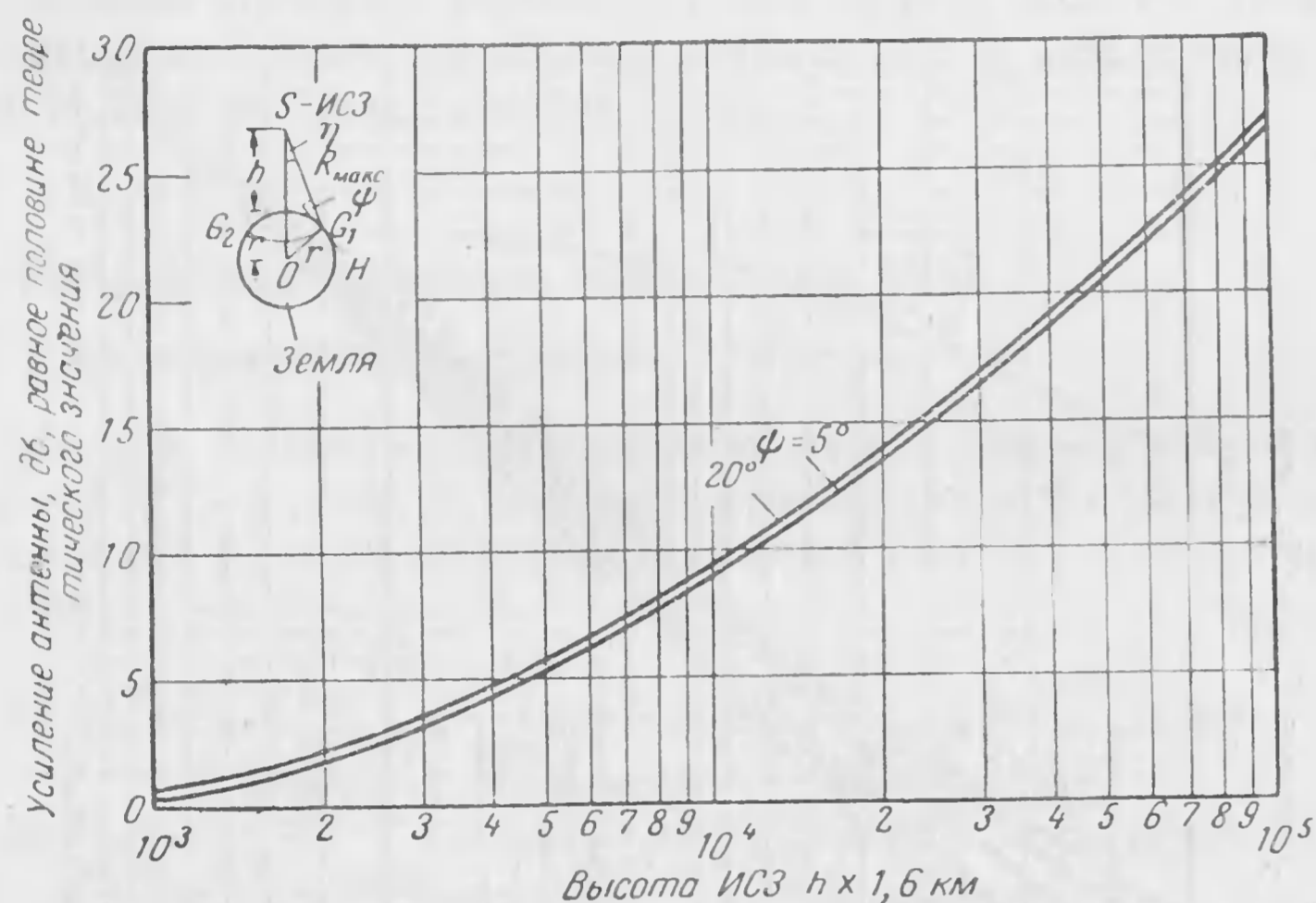
Фиг. 9. Геометрические соотношения в системе ИСЗ—Земля.

Пояснение: окружность, проходящая через G_1 и G_2 , определяет предел площади перекрытия исходя из минимально допустимого значения угла места ψ . R_{\max} — максимальное расстояние от ИСЗ до любой наземной станции, R_c — радиус площади перекрытия, измеренный по поверхности Земли при $\psi = 10^\circ$.

над горизонтом наземной станции, обеспечивающий удовлетворительную связь; $SG_1 = R_{\max}$ — максимальное расстояние от ИСЗ до наземной станции, при котором обеспечивается удовлетворительная связь.

На фиг. 8 показана зависимость η и длины дуги большого круга G_1G_2 от высоты орбиты ИСЗ.

На фиг. 9 показана зависимость максимального расстояния от ИСЗ до наземной станции и диаметра области, обслуживаемой связью с помощью ИСЗ, от высоты орбиты при $\psi = 10^\circ$.



Фиг. 10. Зависимость усиления антенны ИСЗ от его высоты.

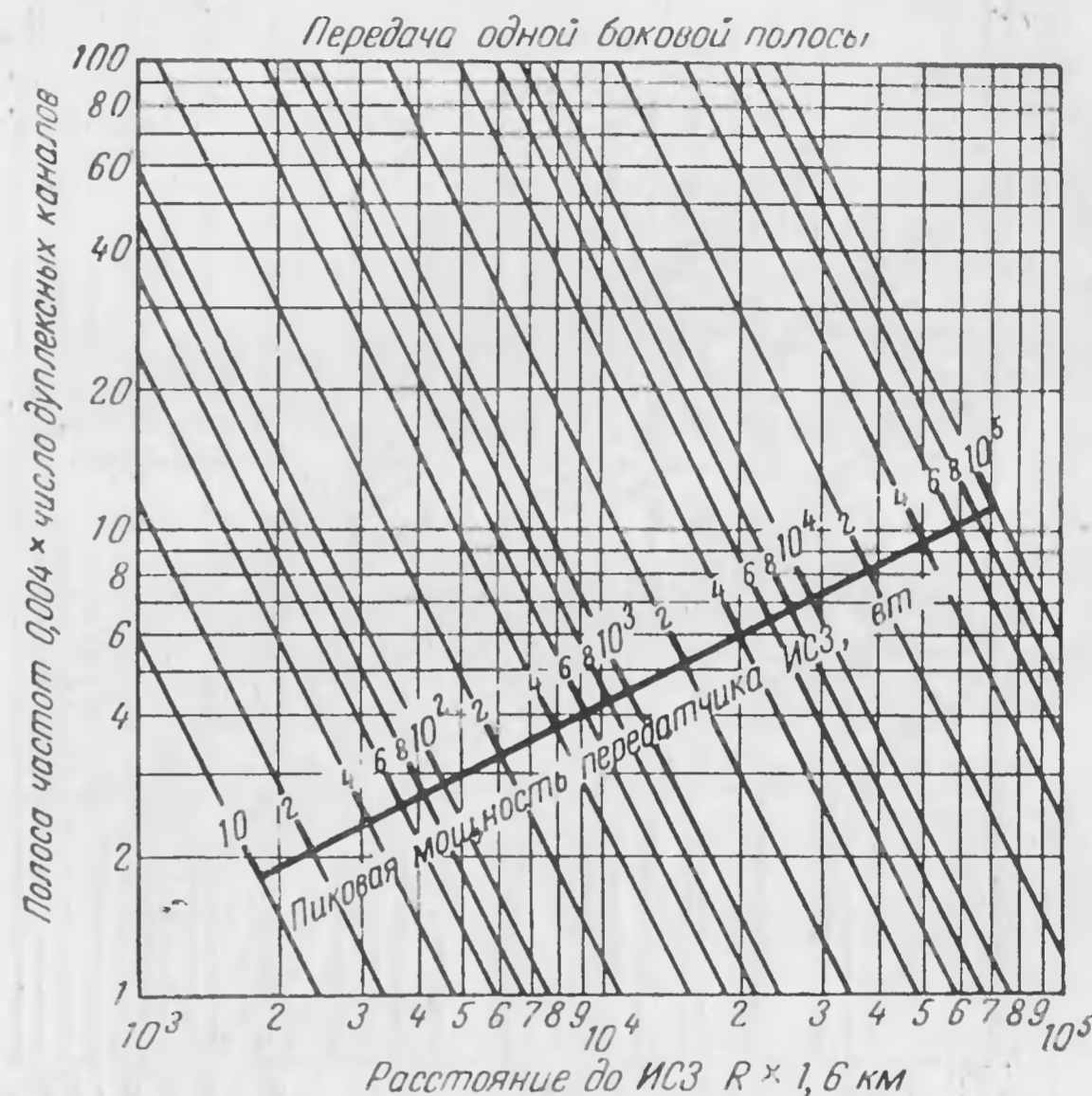
Пояснение: окружность, проходящая через G_1 и G_2 , определяет предел площади перекрытия исходя из минимально допустимого значения угла места ψ . Антенна рассчитана таким образом, что точки главного лепестка диаграммы направленности, соответствующие половинному значению мощности, падают на те места на земной поверхности, из которых ИСЗ виден под углом места ψ .

На фиг. 10 приведена зависимость усиления антенны ИСЗ от высоты орбиты ИСЗ. Принята антенна в форме зеркала с равными фазами в плоскости раскрыва. Размеры зеркала выбраны такими, что прямые, проходящие через точки половинной мощности на главном лепестке полярной диаграммы, проходят через G_1 и G_2 . К. п. д. антенны принят равным половине теоретического.

Б. Мощность передатчика на ИСЗ

Расчет мощности передатчика на ИСЗ для четырех различных случаев был проведен Андерсоном; результаты расчета приведены на фиг. 11—14.

На фиг. 11 приведены результаты расчета для случая однополосной передачи с частотным уплотнением многоканальных телефонных сообщений (полоса частот канала



Фиг. 11. Пиковая мощность передатчика ИСЗ, необходимая при передаче одной боковой полосы.

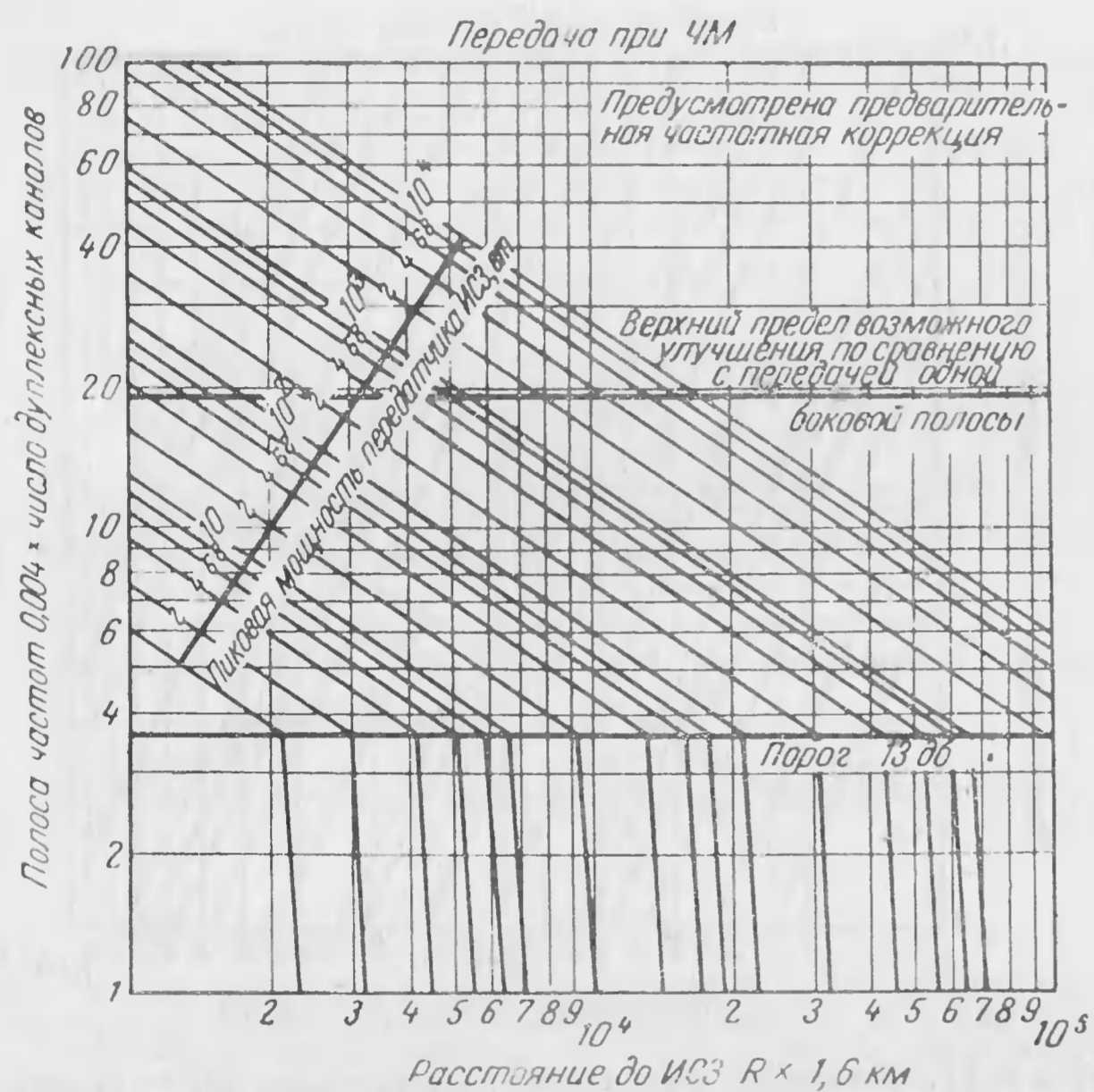
Условия: среднее отношение сигнал/шум 37 дБ для $\psi = 5^\circ$, эффективная шумовая температура парамагнитного усилителя 39° К , диаметр наземной приемной антенны 30 м, усиление антенны ИСЗ 0,5, полоса частот телефонного канала 300—3400 гц.

300—3400 гц); расстояние между соседними каналами взято равным 4 кГц.

Результаты расчета передачи тех же сообщений с помощью частотной модуляции показаны на фиг. 12.

На фиг. 13 приведены результаты расчета для случая описанной выше ИКМ, использующей равновероятные шаги квантования. В этом случае, при определенных предположениях, мощность передатчика на ИСЗ, необходимая для передачи заданного объема информации в единицу времени, не зависит от вида используемого кода.

Результаты расчета, приведенные на фиг. 14, относятся к случаю описанной выше ИКМ, использующей приближение к равным шагам квантования (несколько видоизменен-



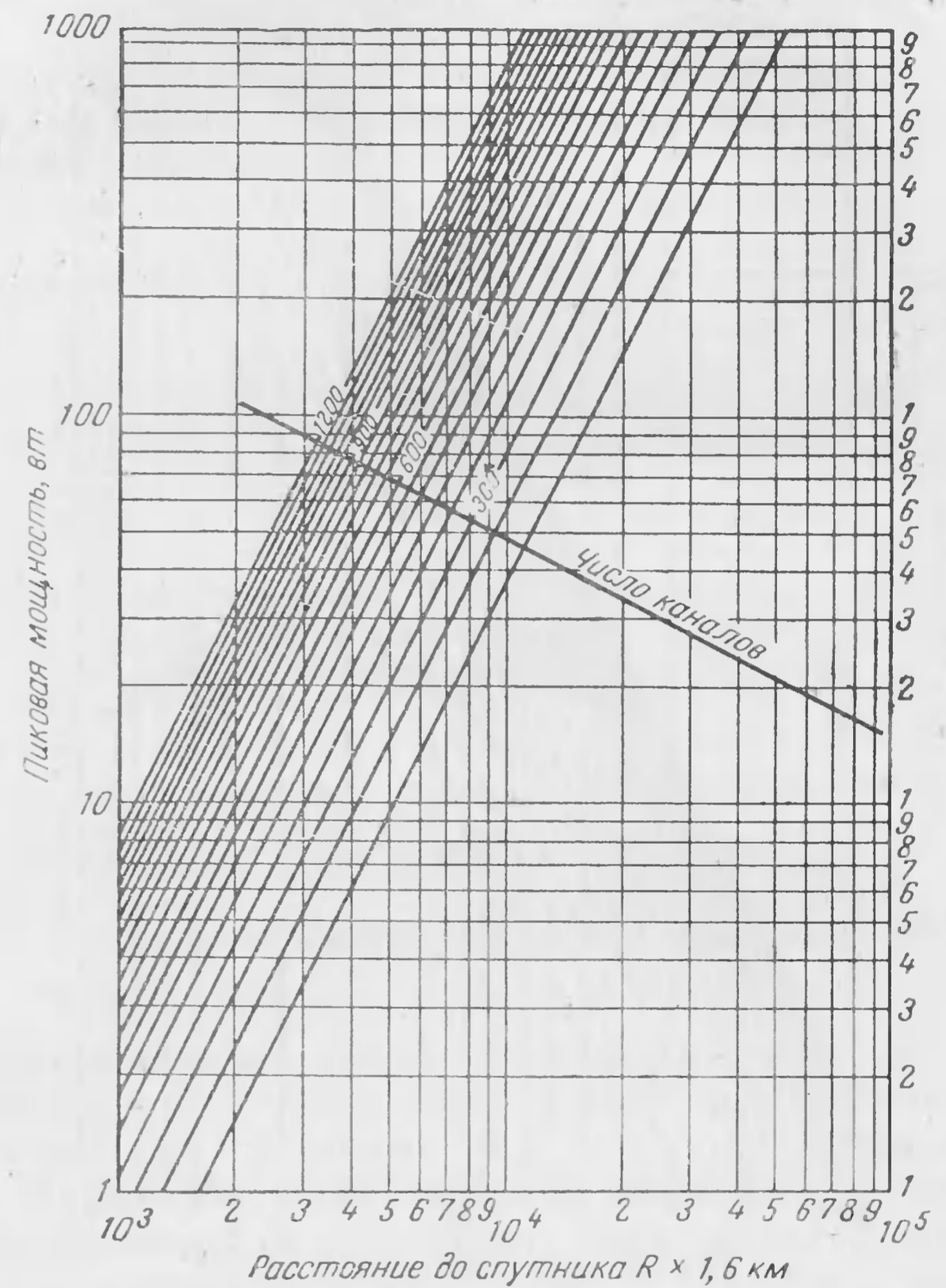
Фиг. 12. Мощность передатчика на ИСЗ, необходимая при использовании ЧМ.

Условия: среднее отношение сигнал/шум 37 дБ для $\psi=5^\circ$, максимальная девиация частоты 20 МГц, эффективная шумовая температура парамагнитного усилителя 39°К , диаметр наземной приемной антенны 30 м, усиление антенны ИСЗ 0,5, полоса частот телефонного канала 300–3 400 гц.

ное для упрощения расчетов) и 7-разрядный код, при котором имеет место оптимальное использование мощности передатчика на ИСЗ.

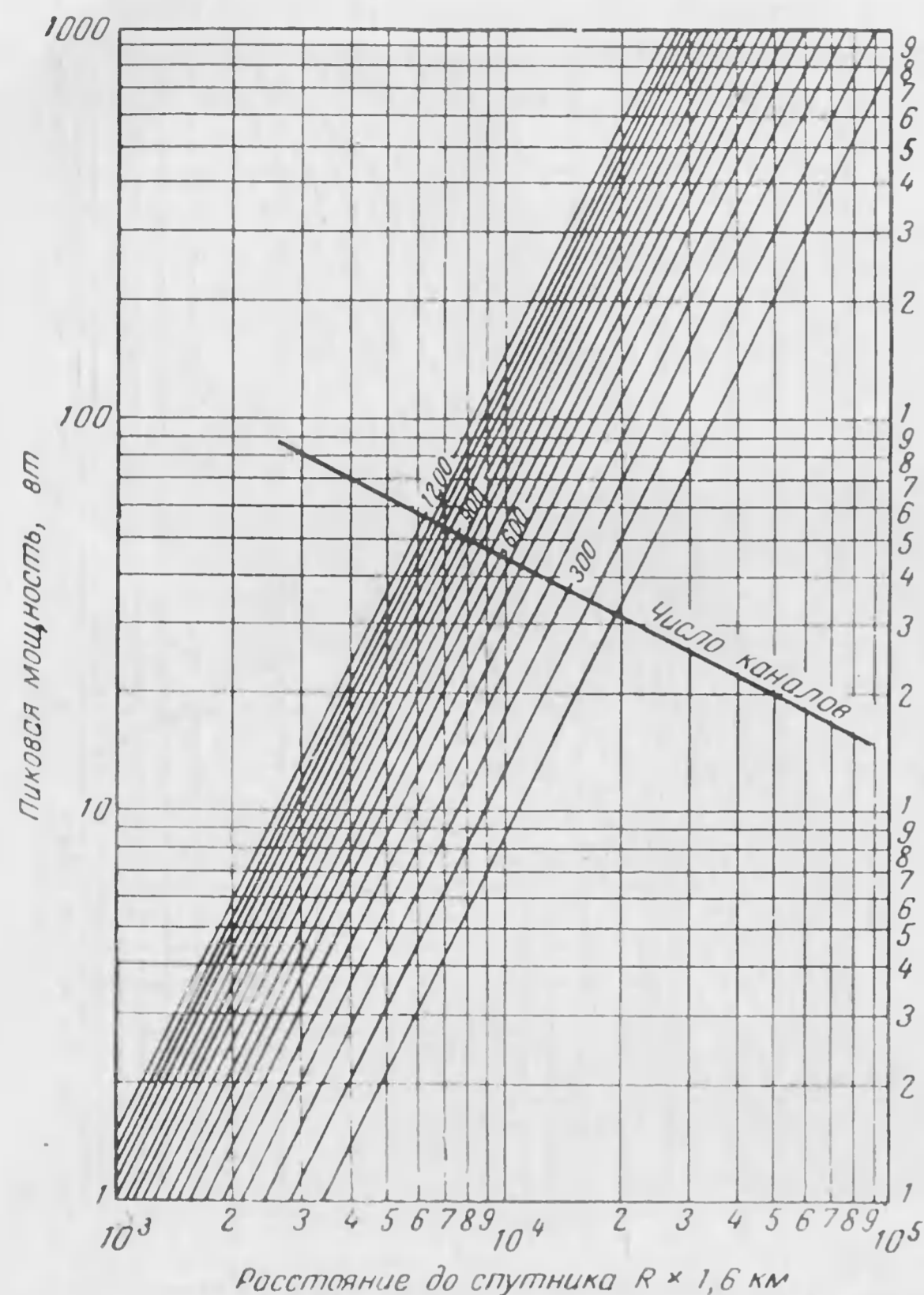
Условия, принятые при расчете

Результаты расчетов, приведенные на фиг. 11–14, получены при следующих условиях:



Фиг. 13. Пиковая мощность передатчика на ИСЗ при ИКМ и 6-разрядном коде с равновероятными шагами квантования.

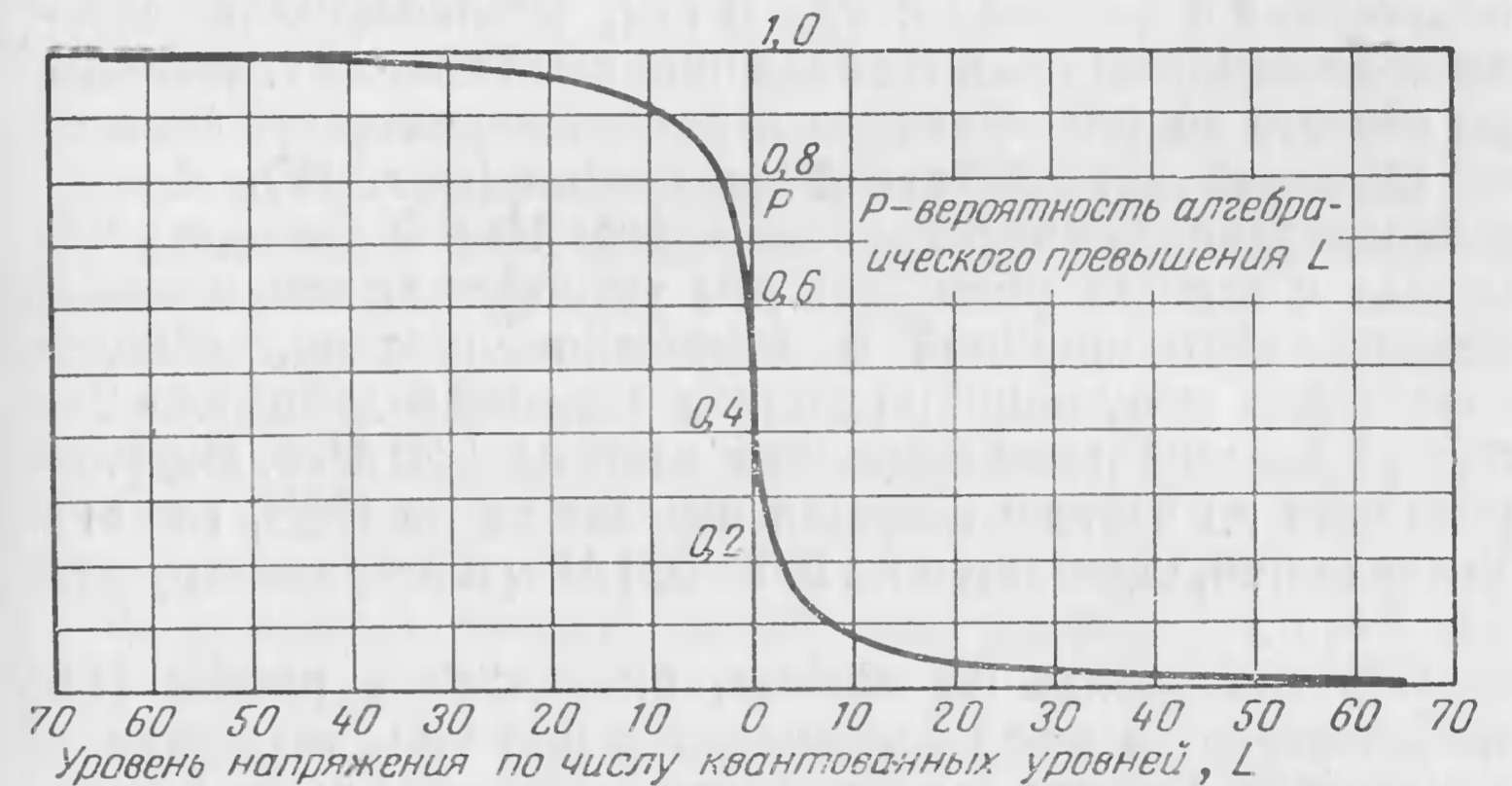
Условия: полоса ИКМ 28 кГц, отношение сигнал/шум в канале 20 дБ, что соответствует вероятности ошибки кодовой комбинации 10^{-6} , вероятность перегрузки передатчика в любой интервал времени 10^{-6} , эффективная шумовая температура парамагнитного усилителя 39°К , диаметр наземной антенны 30 м, усиление антенны ИСЗ 0,5, вероятность появления импульса в любом канале в любой интервал времени 0,125.



Фиг. 14. Пиковая мощность передатчика на ИСЗ при ИКМ и 7-разрядном коде, обеспечивающем минимальную мощность передатчика.

Условия: полоса частот 28 кГц, отношение сигнал/шум в канале 20 дБ, что соответствует вероятности ошибки кодовой комбинации 10^{-6} , вероятность перегрузки передатчика в любой интервал времени 10^{-6} , вероятность появления импульса в любом канале в любой интервал времени 0,04, эффективная шумовая температура парамагнитного усилителя 39°К , диаметр наземной антенны 30 м, усиление антенны ИСЗ 0,5.

Использование перерывов во время разговоров, как это сделано в системе TASI¹⁾, не производилось [6]. Шумы, сопровождающие звуковой сигнал на входе линии связи через ИСЗ (т. е. на выходе двухпроводных линий на фиг. 1), в расчет не принимались.



Фиг. 15. Типовое распределение напряжений звуковых частот речи.

Усиление антенны, расположенной на ИСЗ, было принято равным 0,5. Диаметр зеркала приемной наземной антенны предполагался равным 18 м, а к. п. д. наземных антенн — равным 50% теоретического. Эффективная температура парамагнитного усилителя была принята равной 39°К , что соответствует углу места 5° [5]. Передаваемый диапазон звуковых частот телефонного канала 300—3400 гц. Распределение уровней звуковых сигналов и отношений пиковой мощности к средней для различного числа каналов взято из работы [1], по материалам которой построена кривая 15.

Передача при однополосной и частотной модуляции (фиг. 11 и 12). Отношение средней звуковой мощности к средней мощности шумов принято равным 37 дБ на краях

¹⁾ TASI (Time Assignment Speech Interpolation) — временное уплотнение речевых сигналов с интерполяцией.—Прим. ред.

обслуживаемой площади, т. е. там, где угол места спутника над горизонтом равен 5° .

Передача при однополосной модуляции (фиг. 11). Полоса частот на выходе стандартного устройства частотного уплотнения, в котором каналы расположены на расстоянии 4 кГц друг от друга, занимает 2—3 МГц; эта полоса частот транспонируется в диапазон 2 или 6 ГГц, усиливается и передается с Земли на ИСЗ. На ИСЗ принятый сигнал сдвигается по частоте на 100—300 МГц и ретранслируется на Землю.

Передача при частотной модуляции (фиг. 12). Максимальная девиация частоты равна ± 20 МГц. В системе с ЧМ сигнал с выхода уплотняющего устройства, занимающий полосу частот шириной в несколько мегагерц, используется для модуляции по частоте несущей в диапазоне 2—6 ГГц с максимальной девиацией частоты ± 20 МГц. Модулированная по частоте несущая передается на ИСЗ, где она усиливается, сдвигается на 100—300 МГц и ретранслируется на Землю.

Обратная связь по частоте, описанная в работе [7], не применяется из-за возникающих при этом технических трудностей. Отсюда вытекает, что требование иметь на входе ограничителя наземного приемника частотно-модулированных сигналов отношение сигнал/шум не менее 13 дБ может ограничить минимум необходимой мощности передатчика на ИСЗ. Этот пороговый уровень отмечен на фиг. 12 горизонтальной линией, обозначенной «пороговый уровень 13 дБ».

Для определения необходимой мощности передатчика на ИСЗ из фиг. 11 и 12 по оси абсцисс откладывают расстояние до ИСЗ, а по оси ординат — ширину передаваемой полосы частот. Искомая мощность отсчитывается по наклонным линиям постоянной мощности. В многоканальной ЧМ телефонной системе с частотным уплотнением, для которой справедливы графики фиг. 12, принятый в каждом канале шум пропорционален квадрату средней частоты канала. Следовательно, мощность шумов в канале с наивысшей средней частотой приблизительно в 3 раза (или на 5 дБ) больше усредненной по всем каналам мощности шумов. Отношение сигнал/шум для графиков фиг. 12 соответствует шуму, усредненному по всем каналам. Отсюда следует, что в наихудшем случае отношение сигнал/шум составляет всего 32 дБ.

Можно, однако, применить предварительную коррекцию, с помощью которой отношение сигнал/шум может быть поднято до 37 дБ во всех каналах.

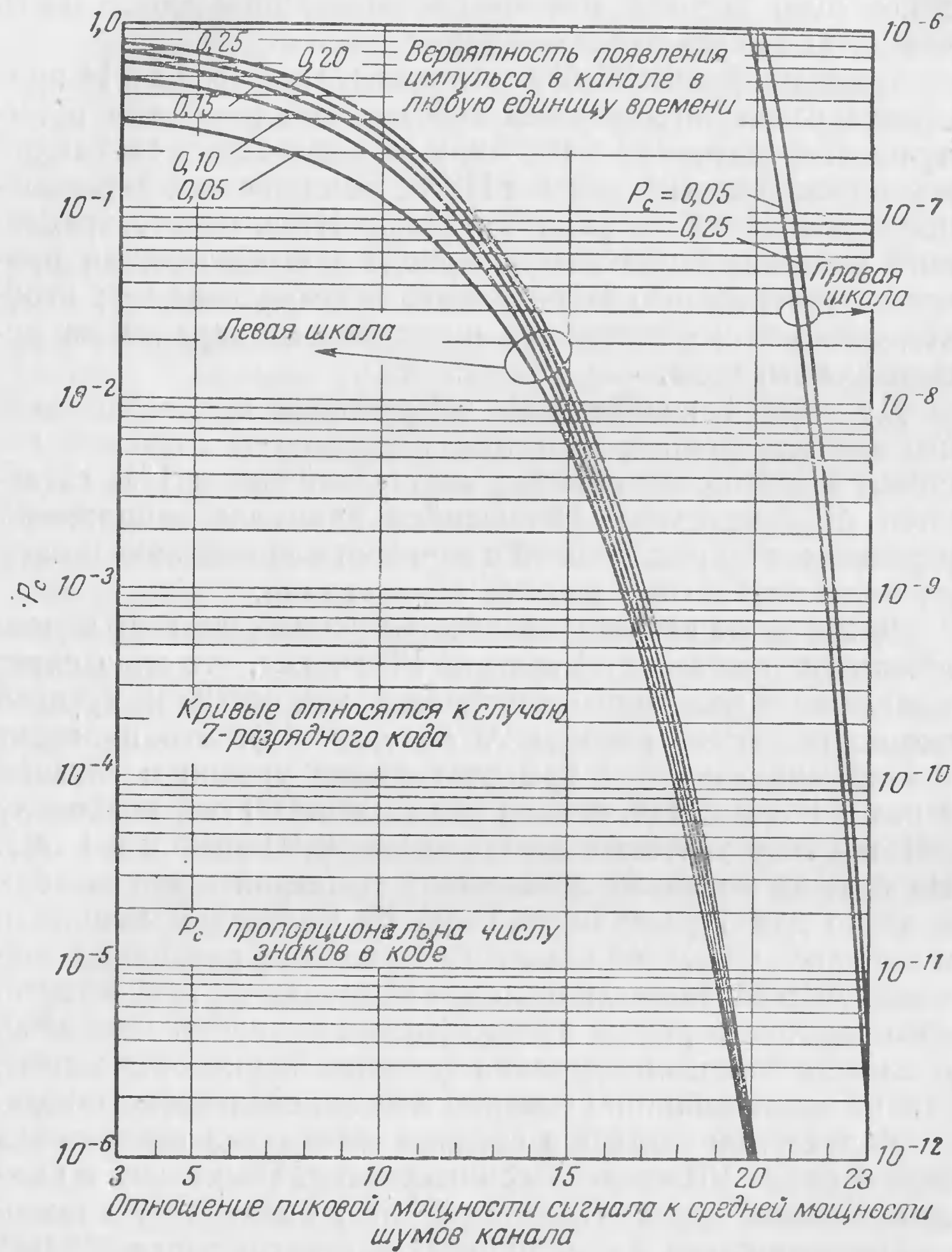
Передача при ИКМ (фиг. 13 и 14). На фиг. 13 и 14 приведены результаты расчета необходимой мощности в импульсе передатчика на ИСЗ при использовании описанной в настоящей статье системы ИКМ. Единственное видоизменение последней состоит в добавлении еще одного временного интервала в тактовом периоде для обеспечения процессов импульсного кодирования и декодирования; необходимость этого интервала определяется характером используемого кода.

Для целей квантования по уровням предполагается, что все мгновенные значения напряжения звуковой частоты, вероятность которых составляет менее 1%, срезаются ограничителем. Оставшийся диапазон напряжений разбивается на ряд уровней с равными или изменяющимися по плавному закону шагами квантования.

Допустимое среднее количество ошибок за счет шумов приемника составляет 1 знак на 10^6 знаков, что определяет требуемое отношение импульсной мощности к средней мощности шумов равным 20 дБ (фиг. 16). Это приводит к появлению ошибки при считывании уровня в среднем 1 раз в 125 мксек (т. е. один раз за $10^6/8000$ сек, поскольку имеется 8000 тактовых периодов или 8000 знаков в 1 сек). На фиг. 16 показана зависимость p_c (вероятность ошибки в знаке для 7-разрядного кода) от отношения мощности в импульсе к средней мощности шумов для различных значений p (вероятности появления импульса во время тактового периода в любом из телефонных каналов). Очевидно, p зависит от распределения уровней звуковой частоты, закона квантования по уровням и вида используемого кода.

Допустимой считается средняя перегрузка передатчика ИСЗ 1 раз за 10^6 временных интервалов. Поскольку в каждом тактовом периоде имеется 6 или 7 импульсов, а тактовая частота равна 8 кГц, то средняя перегрузка составляет 1 импульс за 20,8 или 17,8 сек.

Расчеты мощности, результаты которых приведены на графиках фиг. 13 и 14, выполнены в предположении, что вероятность превышения импульсной мощности передатчика ИСЗ составляет 10^{-6} .



Фиг. 16. Вероятность ошибки p_c при приеме кодовой комбинации.

Предполагается синхронное детектирование принятых основных частотных полос с ИКМ, содержащих сообщения.

Передача при ИКМ (фиг. 13). Этот случай ИКМ отличается от модуляции, обеспечивающей оптимальное использование мощности передатчика на ИСЗ (сведения о которой приведены в табл. 2 и фиг. 14) тем, что используется метод кодирования, при котором весь возможный диапазон напряжений звуковой частоты разбивается на отдельные уровни квантования так, что появление в звуковом сигнале каждого уровня равновероятно.

При таком методе квантования уровней нагрузка передатчика на ИСЗ не зависит от вида используемого кода, и поэтому возможно применение такого кода, при котором достигается наибольшая простота аппаратуры. Вероятность появления импульса в единицу времени в течение тактового периода составляет 0,125.

Ширина основной полосы частот (равная ширине одной боковой полосы плюс остаток второй) принимается в 2,5 раза шире полосы Найквиста.

Передача при ИКМ (фиг. 14). Код в этом случае почти соответствует 7-разрядному коду, обеспечивающему оптимальное использование мощности передатчика на ИСЗ, показанному в табл. 2. Ширина полосы частот та же, что и на фиг. 13.

Для простоты расчета код, приведенный в табл. 2, видоизменен путем деления каждого уровня напряжения на уровни квантования, число которых равно числу импульсов на разряд (т. е. уровень от 1,5 до 4,5 или уровень от -1,5 до -4,5: все уровни в этом диапазоне напряжений используют 1 импульс на разряд), таким образом, чтобы появление этих новых уровней квантования было бы равновероятным. Это означает, что каждая кодовая группа с одинаковым числом импульсов соответствует одной группе уровней квантования табл. 2, но внутри каждой группы проведено деление шага квантования на дополнительные уровни.

Полученный таким образом код характеризуется вероятностью появления импульса в единицу времени, равной 0,04. Приведенные на фиг. 14 значения мощности при использовании такого кода, очевидно, несколько завышены.

Преимущества, получаемые при использовании кода, обеспечивающего оптимальное использование мощности передатчика

Значения импульсной мощности, приведенные на фиг. 14, вычислены для кода, указанного в табл. 2, при добавлении одного импульса (т. е. всего 8 импульсов за период квантования) для кодирования и декодирования, причем уровни квантования видоизменены, как указано выше.

Как уже упоминалось, результаты расчета мощности в импульсе, приведенные на фиг. 13, получены для случая шагов квантования с равной вероятностью появления. Если во всех случаях используется одинаковый набор кодовых знаков, то этот метод квантования обеспечивает независимость потребляемой на ИСЗ мощности от распределения кодовых комбинаций по шагам квантования.

Сравнение необходимых мощностей в импульсе, приведенных на фиг. 13 и 14 для одинакового числа каналов и равных высот ИСЗ, показывает, что использование кода, обеспечивающего минимальную мощность передатчика на ИСЗ и передающего 2 единицы информации (фиг. 14), дает выигрыш в 5 раз по сравнению с кодом, передающим 6 единиц информации (бит) и имеющим равновероятные шаги квантования.

Таким образом, при равном количестве передаваемых единиц информации применение кода, обеспечивающего оптимальное использование мощности передатчика на ИСЗ, приводит к потреблению в 6 раз меньшей мощности, чем использование кода с равновероятными шагами квантования. В Приложении II показано, что мощность, потребляемая при использовании обычного импульсного кодирования, основанного на принципе цифрового вольтметра, примерно в 5 раз больше, чем в случае использования кода, обеспечивающего оптимальное использование мощности передатчика на ИСЗ.

Типовые значения мощности при импульсном коде, обеспечивающем оптимальное использование мощности передатчика ИСЗ.

Данные, приведенные в табл. 6, взяты из фиг. 14 для различных высот ИСЗ, причем допущены небольшие ошибки

за счет интерполяции. Приведенные значения даны для случая усиления антенны 0,5 и усиления, показанных на фиг. 10, соответствующих выбранным высотам ИСЗ.

В. Телевидение

Предварительные соображения

Для передачи телефонных сообщений с помощью описанной выше системы ИКМ, обеспечивающей оптимальное использование мощности передатчика ИСЗ, необходимы приведенные в табл. 6 значения мощности передатчика в импульсе. Такие значения мощности обеспечивают в любом принятом канале отношение мощности в импульсе к средней мощности шумов, равное 20 дБ (до декодирования); это соответствует вероятности потери 1 импульса из $7 \cdot 10^6$ и вероятности пропуска одной кодовой комбинации из 10^6 . Каждый канал с ИКМ занимает полосу частот шириной 70 кГц.

Таблица 6

Необходимые мощности в импульсе передатчика на ИСЗ

Импульсно-кодовая модуляция с частотным уплотнением и передачей одной боковой полосы.

7-разрядный код, обеспечивающий оптимальное использование мощности передатчика

Высота ИСЗ, км	4800	9600	12 800	35 700	
Расстояние от ИСЗ до границы области связи, км	9123	13 563	16 991	40 446	
Мощность передатчика при усилении антенны по мощности 0,5, вт	600 каналов 900 » 1200 »	12,1 22,6 36,3	33,7 61,8 101,0	53,1 99,0 159,2	300 560 900
Мощность передатчика при усилении антенны, соответствующем фиг. 10, вт	600 каналов 900 » 1200 »	2,8 5,3 8,53	3,87 7,1 11,6	4,2 7,9 12,6	5,2 9,7 15,8
Усиление антенны, соответствующее фиг. 10, при $\psi = 10^\circ$, дБ	3,2	6,4	8,0	14,6	
Усиление антенны, соответствующее фиг. 10, как отношение мощностей	2,13	4,4	6,3	28,8	

Вероятность появления импульса в любом телефонном канале при использовании кода, обеспечивающего оптимальное использование мощности передатчика, равна 0,04; число импульсов, передаваемых с ИСЗ в единицу времени, по всем каналам, очевидно, зависит от числа каналов. Примеры такой зависимости даны в табл.7.

В общей ширине полосы частот не учтен разнос между супергруппами телефонных каналов.

Таблица 7

Зависимость числа импульсов, передаваемых с ИСЗ в единицу времени, от числа телефонных каналов

Число телефонных каналов	Общая ширина полосы частот, Мгц	Число импульсов при вероятности превышения 10^{-6}
600	42	46,8
1000	70	69,4

Метод передачи телевизионных сигналов и звукового сопровождения

Телевизионный сигнал и канал звукового сопровождения можно кодировать с помощью ИКМ и уплотнить их по частоте. Для канала звукового сопровождения компрессии полосы частот не требуется. Поскольку процессы ИКМ и уплотнения звукового канала уже были рассмотрены выше, то здесь они затрагиваться не будут.

Случай передачи спектра телевизионного сигнала без компрессии полосы частот будет рассмотрен ниже более подробно.

Передача телевизионных сигналов без компрессии полосы частот

Для этой цели предлагается использовать ИКМ. Телевизионный видеосигнал квантуется во времени с частотой S , равной удвоенной нижней частоте, соответствующей нулевому значению амплитуд, или в 2,5 раза больше наивысшей

частоты спектра передаваемого сигнала; выбирается наибольшее из этих двух значений. Некоторое ухудшение качества передачи наблюдается при использовании 5-разрядного кода с равными шагами квантования; при использовании 6-разрядного кода с равными шагами этого ухудшения качества не наблюдается. Весьма вероятно, что применение оптимального закона изменения шагов квантования даст возможность осуществить передачу приемлемого качества с помощью 5-разрядного кода; по этой причине здесь будет рассмотрен именно случай 5-разрядного кода.

Полоса частот, занимаемая сообщением после ИКМ, имеет ширину $1/2 \times 5 \times S$. Предполагая, что передача ведется с частичным подавлением одной боковой полосы, излучаемый телевизионный сигнал должен занимать полосу в 2,5 раза шире этой полосы Найквиста; при этом предполагается, что используются сравнительно легко реализуемые фильтры. Таким образом, занимаемая полоса частот составит $6,25S$. Эту полосу можно уменьшить до $5S$ при использовании более сложных фильтров.

Некоторые данные для четырех систем телевидения приведены в табл. 8, взятой из работы [17].

Таблица 8

Ширина полосы частот при передаче телевизионного сигнала методом ИКМ для различных стандартов

Стандарт (число строк)	405	525	625	625 (международный)
Наивысшая частота видеоспектра, Мгц	3	4,2	5	6
Наинизшая частота видеоспектра, соответствующая нулевой амплитуде, Мгц	3,5	4,5	5,5	6,5
Частота квантования S , Мгц	7,5	10,5	12,5	15
6,5 S -полоса частот телевизионного сигнала при простых фильтрах, Мгц	48,75	68,25	81,25	97,5
Полоса частот телевизионного сигнала $5S$ при специальных фильтрах, Мгц	37,5	52,5	62,5	75

Требования к полосе частот. Сравнивая ширину полосы, необходимую при передаче телевизионного сигнала с полосой, занимаемой телефонным каналом, можно видеть, что при применении специальных фильтров для сужения полосы частот для передачи телевидения с количеством строк разложения 405 необходима такая же полоса частот, как и для передачи 600 телефонных каналов. Телевизионный сигнал с международным стандартом 625 строк может быть передан в полосе, занимаемой 1000 телефонными каналами, если учесть частотные интервалы между супергруппами.

Требования к мощности передатчика на ИСЗ. Мощность, необходимая для передачи многоканальных телефонных сообщений, более чем достаточна для передачи телевизионных сигналов при условии, что необходимая для передачи телевизионных сигналов полоса частот не превосходит полосы частот при передаче многоканальных телефонных сигналов. Это может быть проверено вычислением отношения пиковой мощности к средней мощности шумов для случая передачи телевизионных каналов с помощью ИКМ.

Пример вычисления отношения пиковой мощности телевизионного сигнала к средней мощности шумов (для принятых импульсов с ИКМ). Значения мощности, приведенные в табл. 6, рассчитаны в предположении, что число импульсов от всех каналов никогда не превышает числа импульсов, приведенного в табл. 7. При этом предполагалось также, что мощность передатчика ИСЗ пропорциональна числу импульсов, так что потребляемая мощность пропорциональна квадрату числа импульсов. Следовательно, пиковая мощность принятого телевизионного импульса (отнесенная к одному телефонному каналу) должна быть по крайней мере не меньше, чем мощность, соответствующая числу импульсов, приведенных в табл. 7, минус один, другими словами, в $45,8^2 \cong 2098$ и $68,4^2 \cong 4679$ раз больше мощности одного импульса любого телефонного канала с ИКМ.

Мощность шума, принятого вместе с импульсом телевизионного канала до декодирования, очевидно, в $5S/0,07 = 71,4S$ раз больше мощности шумов в телефонном канале с ИКМ, занимающем полосу частот 70 кгц (как было сказано

выше, мы рассматриваем случай применения специальных фильтров, поэтому и взято $5S$).

Если для передачи телевизионного сигнала с числом строк разложения 405 используется система связи, предназначенная для передачи сигналов 600 телефонных каналов, то отношение пиковой мощности сигнала к средней мощности шумов будет выше, чем в случае передачи телефонных сообщений (20 дб) в $2098/71,4S = 2098/71,4 \times 7,5 = 3,9$ раза, т. е. почти на 6 дб .

Выигрыш в отношении сигнал/шум при передаче телевидения с международным стандартом 625 строк по линии, предназначенной для передачи 1000 телефонных каналов, составляет $4679/71,4 \cdot S = 4679/71,4 \times 15 = 4,3$ раза, или несколько больше 6 дб .

В каждом из этих случаев отношение импульсной мощности сигнала к средней мощности шума составляет 26 дб . Согласно фиг. 15, такое отношение соответствует вероятности потери одного импульса из 10^{12} при использовании 7-разрядного кода. Вероятность еще ниже при 5-разрядном коде. Это означает, что даже при частоте квантования во времени 15 Мгц среднее число ошибок в элементах телевизионного изображения не превышает 15 за миллион секунд.

Эффективность кода, обеспечивающего оптимальное использование мощности передатчика при передаче телевидения. Приведенные выше вычисления справедливы для одного телевизионного канала вне зависимости от того, применяется ли код, обеспечивающий оптимальное использование мощности передатчика, или нет. Применение такого кода только уменьшает число передаваемых импульсов, не изменяя их амплитуды. Таким образом, при неизменной пиковой мощности снижается средняя мощность, излучаемая передатчиком ИСЗ.

Метод кодирования при ИКМ. Экспериментальная система передачи телевидения с помощью ИКМ описана в работе [24]. Квантование во времени телевизионного сигнала с номинальной шириной полосы частот $4,5 \text{ Мгц}$ производилось с частотой 10 Мгц . Кодирование производилось с помощью электронно-лучевой трубки, луч которой отклонялся напряжением телевизионного сигнала. Ширина луча достаточна для перекрытия 6 положений на экране,

на котором нанесен с помощью отверстий 6-разрядный код, представляющий величину отклонения луча. Кодированный сигнал, снимаемый 6 коллекторными пластинами, расположенными за отверстиями экрана, передается параллельно по 6 каналам. По-видимому, нетрудно перевести такой код в последовательную группу с частотой знаков $6 \cdot 10^7$ в 1 сек.

Передача телевидения с использованием компрессии полосы частот

Частично осуществлена и продемонстрирована [13] опытная система, в которой произведено существенное сжатие передаваемой полосы частот при вполне приемлемом качестве телевизионной передачи. Основной принцип работы этой системы заключается в разделении видеополосы на две части: первая часть содержит компоненты с частотами от нуля до какой-то определенной величины, например 350 кГц, и передает информацию об освещенности сравнительно больших площадей кадра; во второй части передаются частоты от 350 кГц до наивысшей частоты видеосигнала (см. табл. 8), содержащие информацию о краях изображения или переходах яркости.

В том же источнике указывается, что для получения качественного изображения в телевизионной системе с шириной полосы 4 МГц необходим импульсный код, определяющий 128 уровней напряжения при частоте квантования во времени ~ 12 МГц. Учитывая передачу частично подавленной боковой полосы, это составит ~ 15 МГц для общей ширины полосы.

При передаче краев кадра каждая строка запоминается и анализируется для определения положения и величины перепада освещенности. Для каждого промежутка равной яркости вырабатываются кодовые группы, характеризующие длину промежутка, его яркость, а также величину и знак перехода яркости на конце каждого промежутка. Получаемая таким образом информация передается при постоянной частоте знаков; после декодирования на приемном конце телевизионное изображение восстанавливается из отдельных кусков.

Выводы

Влияние времени распространения при использовании ИСЗ на синхронной орбите

Влияние времени распространения сигнала в этом случае проявляется в большом запаздывании сигнала и взаимной блокировке. Эти явления устраняются с помощью переключения цепей, показанных на фиг. 1 и 2. Кроме того, при наличии двух наземных станций, расположенных на краях обеспечиваемой связью площади, время ответа каждого из абонентов увеличивается на 0,56 сек. Это дополнительное время совершенно не ощущается при обычных телефонных переговорах; автору удавалось обнаружить это дополнительное время только при помощи непосредственного сравнения с линией без задержки на экспериментальном макете, воспроизводившем речевые сигналы.

Построение аппаратуры переключения и подавления эха, позволяющей одному из абонентов прерывать другого, вполне возможно.

Разделение каналов

На ранней стадии развития систем связи с помощью ИСЗ разделение каналов является совершенно необходимым параметром системы, позволяющим использовать максимальный рост трафика и тем самым сводящим к минимуму первоначальные затраты. Когда система связи с помощью ИСЗ, перекрывающая определенную площадь, окажется полностью загруженной, часть нагрузки может быть переведена на одну или несколько систем магистральной связи. Для выделения каналов необходимо использование системы многоканального частотного уплотнения.

Использование импульсно-кодовой модуляции

ИКМ имеет некоторые преимущества по сравнению с другими видами модуляции, позволяя достигнуть оптимального соотношения между требованиями минимальной мощности наземного и бортового передатчиков и минимальной ширины полосы частот. Для выделения отдельных каналов необходимо применять ИКМ в каждом канале. Если

для связи между двумя наземными пунктами выделяется определенная группа каналов, то ИКМ можно применять для всей группы каналов. Некоторое уменьшение ширины занимаемой полосы частот и экономия мощности могут быть достигнуты при индивидуальном импульсном кодировании каждого отдельного канала группы и при временном разделении. Последние два положения справедливы также для системы магистральной связи.

Код, обеспечивающий оптимальное использование мощности передатчика

Описан специальный метод импульсного кодирования, при котором требуемая импульсная мощность как наземного, так и бортового передатчиков минимальна.

После написания данной статьи в печати появилось сообщение [21] о возможности осуществления подобного кода.

Импульсная мощность передатчика ИСЗ

Необходимая импульсная мощность передатчика, установленного на ИСЗ, приведена на фиг. 11 для случая передачи одной боковой полосы; на фиг. 12 — для случая передачи с ЧМ; на фиг. 13 и 14 — для случая передачи с ИКМ. В табл. 6 сведены требования к мощности бортового передатчика для некоторых частных случаев передачи при ИКМ. Во всех случаях имеется в виду передача одинакового типа как с наземной станции на ИСЗ, так и обратно. При передаче одной боковой полосы применяется частотное многоканальное уплотнение телефонных каналов. Сигналы с частотным уплотнением передаются также методом частотной модуляции. При передаче с ИКМ уплотненные полосы передаются методом однополосной амплитудной модуляции. Использование частотной модуляции не позволяет производить разделение каналов.

Произведенный расчет импульсной мощности для случая применения ИКМ дал несколько завышенные значения, поскольку при расчете считалось, что импульсное напряжение n импульсов (от 48 или 69 импульсов, см. табл. 7) в n раз больше напряжения одного импульса. Учитывая статистику, можно принять пиковое значение меньшим, допуская некоторую вероятность превышения этого значе-

ния. Однако это положение нуждается в подробном исследовании и можно ожидать, что эти исследования позволят существенно снизить требуемую мощность передатчика [20], [22] и [23].

Средняя мощность передатчика ИСЗ

Средняя мощность передатчика при использовании ЧМ равна пиковому значению мощности передатчика, приведенному на фиг. 12.

При передаче с ИКМ с 7-значным кодом, как следует из табл. 7, число импульсов, на которое должен быть рассчитан передатчик ИСЗ для передачи 600 телефонных каналов, равно 47. Отсюда максимальная мощность передатчика должна быть в 47^2 раз больше мощности одного импульса. Из фиг. 14 можно заключить, что средняя вероятность появления импульса в каком-либо канале равна 0,04. Поэтому средняя мощность в $600 \times 0,04 = 24$ раза больше мощности одного импульса.

Следовательно, средняя мощность равна пиковой, поделенной на $47^2/24 = 92$. Аналогично, в случае 1000 телефонных каналов для нахождения средней мощности пиковую мощность необходимо разделить на $69^2/40 = 119$.

Таким образом, для определения средней мощности определенное по фиг. 14 значение мощности необходимо разделить на 92 для случая 600 телефонных каналов и на 119 для случая 1000 каналов.

Например, к мощности и ширине полосы частот при передаче сигналов 600 телефонных каналов, занимающих каждый полосу 4 кГц, а все вместе — 2,5 МГц на выходе аппаратуры частотного уплотнения, при высоте ИСЗ 12 800 км и усилении антенны ИСЗ 0,5 предъявляются требования, приведенные в табл. 9.

Таблица 9
Мощность и ширина полосы частот при передаче сигналов 600 телефонных каналов

Вид модуляции	Требуемая мощность, <i>вт</i>	Средняя мощность, <i>вт</i>	Занимаемая полоса частот, <i>Мгц</i>
ЧМ	25 (фиг. 11)	25	105
ИКМ	30 (фиг. 14)	0,326	44,45

Если уменьшить полосу частот при частотной модуляции до значения ширины полосы при ИКМ, то средняя мощность, требуемая при частотной модуляции, будет в 478 раз больше, чем при ИКМ.

Средняя мощность передатчика ИСЗ, находящегося на синхронной орбите, для случая предлагаемой системы на 600 телефонных каналов с ИКМ составит ~ 60 мвт при коэффициенте усиления антенны (по мощности) 28,8.

Занимаемая полоса частот

Ширина основной полосы частот канала при ИКМ составляет 70 кГц; основная группа из 12 каналов занимает 840 кГц; основная супергруппа из 60 каналов занимает 4200 кГц.

Интервал между двумя самыми низкочастотными супергруппами составляет 12 МГц, между всеми остальными 8 МГц.

Таким образом, ширина полосы частот, занимаемая N каналами, равна $70 N$ кГц плюс интервалы между супергруппами.

Например, 600 симплексных телефонных каналов занимают полосу частот $(600 \times 70 + 2 \times 210 + 7 \times 140)$ кГц, равную 43,4 МГц. Для передачи 600 дуплексных каналов потребуется 4 такие полосы: 2 непрерывные полосы для передачи с ИСЗ на Землю (86,8 МГц), 2 смежные полосы для передачи с Земли на ИСЗ (86,8 МГц) и интервалы между этими полосами, которые в диапазоне 2 ГГц должны занимать ~ 100 МГц. Общая занимаемая полоса частот, таким образом, равна 273,6 МГц.

Для диапазона 2 ГГц разнос частотных полос в 100 МГц можно считать достаточным; в более высокочастотных диапазонах необходимо увеличивать также и интервал между частотами передачи и приема, что является дополнительным аргументом в пользу применения диапазона 2 ГГц.

Полоса частот, занимаемая частотно-модулированным сигналом при девиации частоты ± 50 МГц, составляет 100 МГц (на каждый ствол) или более 500 МГц для дуплексной связи с ИСЗ. Полоса частот, занимаемая системой однополосной передачи, значительно меньше, однако в этом случае к мощности передатчика ИСЗ предъявляются совершенно невыполнимые требования.

Недостатки систем с разделением каналов

Требование разделения каналов ограничивает импульсное кодирование стандартными полосами телефонных каналов с многоканальным уплотнением по частоте. Если для связи двух наземных станций требуется число каналов, достаточное для того, чтобы образовать группу, супергруппу или несколько супергрупп, то соответствующие стандартные полосы с частотным многоканальным уплотнением могут быть закодированы целиком. В случае, когда число каналов, отведенное для постоянной связи, меньше 12, т. е. меньше, чем число каналов, составляющих группу, может оказаться удобнее применять индивидуальное кодирование и декодирование каждого канала. Индивидуальное кодирование и декодирование каждого канала окажется необходимым, если появится требование индивидуального переключения телефонного канала с одной станции на другую.

Отсюда видно, что разделение каналов влечет за собой значительное усложнение системы при наличии большого числа каналов, кодируемых индивидуально. Однако в этом случае приходится идти на такое усложнение, поскольку другой метод разделения каналов, дающий такую же экономию мощности наземного и бортового передатчиков при простой бортовой аппаратуре и при использовании сравнимой полосы частот, неизвестен.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Определения

Канал связи. Средство передачи одного сообщения независимо от его вида (речь, телеграфная передача, телевидение или фототелеграфная передача).

Канал может быть симплексным, и в этом случае передача сообщения происходит только в одном направлении, например из пункта А в пункт В. Дуплексный канал, кроме того, может передавать сообщения из пункта В в пункт А.

Двухпроводная линия. Канал, дуплексный или симплексный, состоящий из одной пары проводов.

Четырехпроводная линия. Дуплексный канал, состоящий из двух пар проводов; одна пара используется для передачи сообщений в одном направлении, а вторая пара — для передачи в обратном направлении.

Система магистральной связи. Система связи, в которой все каналы начинаются на одной оконечной станции и кончаются на другой.

Система связи, обслуживающая площадь. Система связи, в которой любая наземная станция, находящаяся в пределах определенной площади, может иметь связь с любой другой наземной станцией, находящейся либо в пределах этой же площади, либо в пределах другой, вполне определенной площади.

Многоканальность. Любой способ, с помощью которого какое-либо средство связи (приемник, передатчик, коаксиальный кабель, линия связи и т. д.) обслуживает несколько каналов.

Многоканальное частотное уплотнение. Многоканальная система, в которой некоторое число полос частот, несущих сообщения, располагается рядом друг с другом по оси частот с интервалами между ними, обычно определяемыми крутизной характеристики затухания фильтров.

Многоканальное временное уплотнение. Многоканальная система, в которой какое-либо средство связи служит для передачи по нему сигналов нескольких каналов путем последовательной передачи во времени сообщения каждого канала. В данной статье импульсы, которые при передаче одного канала имели бы длительность, равную одному тактовому периоду (см. ниже), делятся на интервалы, число которых равно числу каналов и за время одного такого интервала передается импульс малой длительности последовательно или группа импульсов каждого канала. Этот процесс повторяется в каждом тактовом периоде.

Амплитудная и частотная модуляция. Системы модуляции, при которых амплитуда или соответственно частота несущего колебания изменяются пропорционально мгновенному значению напряжения сообщения одного или нескольких каналов.

Передача одной боковой полосы. Система передачи, в которой из спектра амплитудно-модулированного колебания выделяется одна боковая полоса, которая и передается.

Передача с частичным подавлением боковой полосы частот. В случае когда полоса модулирующих частот начинается от нуля (как, например, в случае ИКМ телефонного канала), даже использование двойных балансных модуляторов не позволяет осуществить передачу одной «чистой» боковой полосы, поскольку в сигнале всегда имеются следы второй боковой полосы. В таких случаях производится передача одной боковой полосы и частично подавленной второй боковой при введении соответствующей частотной коррекции, с тем чтобы после детектирования получить плоскую частотную характеристику. В описанной здесь системе многоканального частотного уплотнения результирующая полоса частот, полученная из одной боковой полосы и частично подавленной второй боковой полосы, уплотняется в наборе одинаковых частотных полос с минимально допустимым интервалом между ними, определяемым соответствующей системой многократной модуляции.

Импульсно-кодовая модуляция (ИКМ). В этой системе независимо друг от друга производится квантование во времени и по уровню напряжения, несущего информацию. Квантование по уровню производится за время одного тактового периода; в следующем тактовом периоде передается кодированная группа импульсов, определяющая этот уровень напряжения. Группа импульсов декодируется на приемном конце линии.

Группа. В системе многоканального частотного уплотнения группой называется некоторое число телефонных каналов, объединенных и расположенных в спектре частот таким образом, чтобы обеспечить возможность уплотнения групп путем транспонирования частот в другой диапазон. В статье предлагается использование групп из 12 каналов.

Супергруппа. Супергруппа содержит 5 групп, уплотненных по частоте, расположенных в удобном для уплотнения супергрупп участка частотного диапазона.

Частота квантования во времени (тактовая частота). Частота, с которой производится квантование во времени уровня напряжения, отображающего сообщение.

Тактовый период. Величина, обратная частоте квантования во времени, равная времени, затрачиваемому на процесс квантования и на передачу кодовой комбинации, состоящей из серии интервалов, заполненных или незаполненных импульсами.

Шаг квантования. Разность между соседними уровнями квантования (при квантовании по уровню).

Интервал времени. Время передачи одного знака кода, определяющего уровень напряжения. Длительность временного интервала в n раз короче длительности тактового периода, где n — число интервалов в каждой кодовой комбинации.

Кодовая комбинация. Сумма интервалов времени, заполненных импульсами или не заполненных ими, используемая для отображения или определения уровня напряжения.

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Сравнение мощностей передатчика ИСЗ, требуемых при использовании различных кодов

Сравнение кода с равновероятными шагами квантования и двоичного цифрового кода, обычно используемого при ИКМ. Под двоичным цифровым кодом в данном случае понимается код, вырабатываемый цифровым вольтметром при измерении напряжения. Предполагается, что цифровой вольтметр при наибольшем отрицательном напряжении имеет нулевое показание, на следующем уровне — показание 10, на следующем за ним — 11 и т. д. Наибольший положительный уровень в таком случае будет представлен двоичным числом с 1 в каждом разряде; для 7-разрядного кода наибольший положительный уровень будет представлен числом 1111111.

В этом случае при 7-разрядном коде, обозначающем 128 уровней, при записи по порядку первых 128 двоичных

чисел видно, что в первом знаке имеются единицы и нули, в то время как во всех числах, отображающих отрицательные уровни, в последнем знаке единиц нет; в то же время во всех числах, определяющих положительные уровни, в последнем знаке имеются единицы.

Отсюда становится очевидным, что при передаче непрерывной речи вероятность появления 1 или 0 в последнем знаке равна 0,5. Практически даже при непрерывном разговоре одного абонента эта вероятность равна только 0,25, что связано с наличием пауз, в то время как при разговоре двух абонентов она падает до 0,125. Такая же вероятность характеризует любой разряд числа (и в каждую единицу времени) при использовании кода с равновероятными шагами квантования. Также можно утверждать, что вероятность появления единицы в низшем разряде равна 0,125. Это объясняется тем, что единицы и нули меняются местами в разрядах, в то время как разница в вероятности появления каждого линейно квантованного уровня невелика.

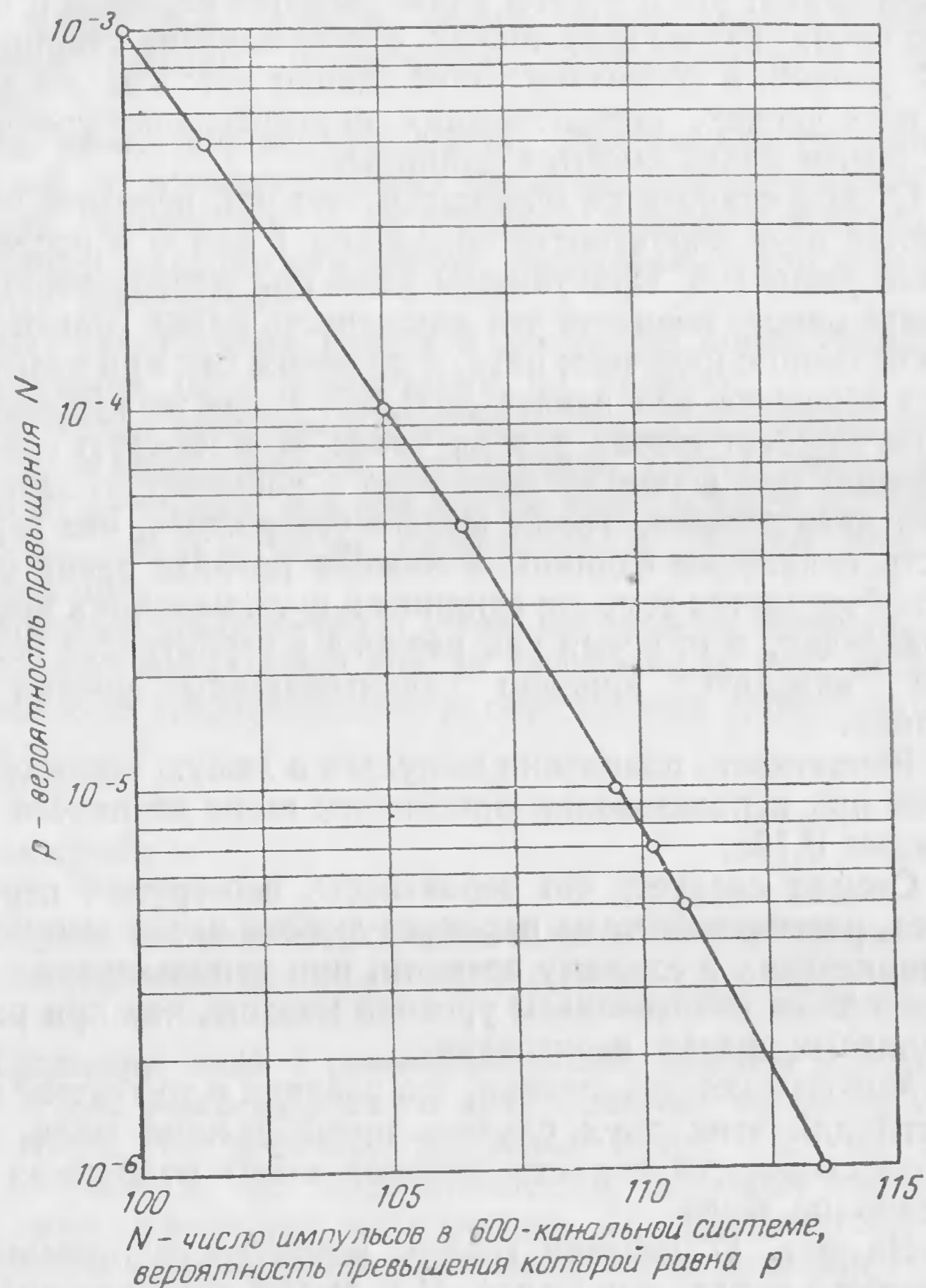
Вероятность появления импульса в любую единицу времени при использовании описанного выше двоичного кода меньше 0,125.

Отсюда следует, что вероятность перегрузки передатчика, рассчитанного на передачу любого числа импульсов, возникающих в единицу времени, при использовании кода с линейным квантованием уровней меньше, чем при равновероятных шагах квантования.

Можно показать, однако, что разница в требуемой мощности для этих двух случаев пренебрежимо мала, хотя ввиду сложности полного анализа этого положения проведено не было.

На фиг. 17 показан график вероятности превышения p любого числа импульсов N в любой интервал времени при передаче 600 телефонных каналов, импульсы каждого из которых поступают в одну и ту же единицу времени. Предполагается, что вероятность появления импульса в любом канале равна 0,125.

Так как вероятность $p = 0,125$ относится к любому интервалу времени при коде с равновероятными шагами квантования и к двум интервалам времени при двоичном коде, то данные, приведенные на фиг. 17, можно использо-



Фиг. 17. Зависимость вероятности превышения числа импульсов в 600-канальной системе от числа импульсов.

Общее число каналов 600, вероятность появления импульса в одном канале в единицу времени 0,125.

вать для обоих случаев, если ограничиться двумя единицами времени.

Предположим теперь, что передатчик сконструирован таким образом, что он может выдерживать перегрузки, вероятность которых в любую единицу времени равна 10^{-6} при использовании кода с равновероятными шагами квантования. Из фиг. 17 видно, что передатчик должен передать 114 импульсов (число 113,5 не имеет смысла, так как можно рассматривать только целые числа импульсов).

Заметим, что каждая из 7 единиц времени при коде с равновероятными шагами вносит свою долю в вероятность перегрузки, поэтому общая вероятность перегрузки будет равна $7 \cdot 10^{-6}$.

Теперь полезно задаться вопросом о том, какова наименьшая пропускная способность (по импульсам) передатчика ИСЗ, при которой вероятность перегрузки только от первого и последнего интервала времени каждой двоичной кодовой комбинации составит $7 \cdot 10^{-6}$. Ответом, очевидно, является такое число импульсов N , которое соответствует перегрузке 3,5 раз за 10^6 единиц времени, т. е. $3,5 \cdot 10^{-6}$ (на самом деле частота перегрузок передатчика в этом случае будет несколько выше благодаря той доле, которую внесут остальные 5 единиц времени, которыми мы пренебрегли).

Из фиг. 17 видно, что вероятности $3,5 \cdot 10^{-6}$ соответствует 111,5 импульсов. Поскольку половина импульса не имеет смысла, примем это число импульсов за 111.

Если предполагать линейное суммирование напряжений, то мощность в случае двоичного кода должна быть более $(111/114)^2 = 0,95$ мощности при коде с равновероятными шагами квантования при одинаковой перегрузке. Очевидно, что значение 0,95 несколько занижено по следующим причинам: при вычислении мы пренебрегли всеми знаками двоичного кода, кроме двух; числа импульсов округлялись в пользу двоичного кода; и, наконец, результаты расчета, приведенные на фиг. 14, получены при использовании для облегчения расчета невыгодной в этом смысле разновидности кода, обеспечивающего экономичное использование мощности передатчика.

Сравнение кода, обеспечивающего оптимальное использование мощности передатчика и двоичного цифрового кода. Здесь мы приходим к выводу, что при использовании кода, обеспечивающего оптимальное использование мощности передатчика, необходима в 6 раз меньшая мощность, чем при коде с равновероятными шагами квантования, и несколько меньше, чем $1/5$ мощности, необходимой при двоичном цифровом коде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Holdrook B. D., Dixon J. T., Load rating theory for multichannel amplifiers, *Bell System Tech. J.*, p. 624 (October 1939).
2. Ryde J. W., Attenuation and radar echoes produced at centimetre wavelengths by various meteorological phenomena. Rep. of a Conf. on 8 April 1946, of the Phys. Soc. and Roy. Meteorological Soc.
3. Law H. B., Reynolds J., Simpson W. G., Channel equipment design for economy of bandwidth, *P. O. Elect. J.*, p. 112 (July 1960).
4. Brotherton M., Amplifying with atoms, *Bell Labs. Record*, p. 163 (May 1960).
5. Pierce J. R., Satellite systems for commercial communications, IAS Paper № 60—40 presented at the IAS 28th Meeting, N. Y., 25 January 1960.
6. *Bell Labs Record*, p. 433 (November 1960).
7. Chaffee J. G., The application of negative feedback to frequency modulated systems, *Bell System Tech. J.*, p. 404 (1939).
8. Bray W. J., The standardization of international microwave radio-relay systems, *Proc. I. E. E.*, p. 180 (March 1961).
9. C. C. I. R. Documents of the IX-h Plenary Assembly, Los Angeles. vol. I, December 1959.
10. C. C. I. F. green Book on Line Transmission Maintenance, XVIII-th Plenary Assembly, Geneva, December 1956.
11. I. T. U. Radio Regulations, Geneva, 1959.
12. Pratt H. J., Propagation, noise and general systems considerations in earth-space communications, *Trans. I. R. E.*, CS-8, № 4, December 1960.

13. Schreiber W. F., Knapp C. F., TV bandwidth reduction by digital coding, *IRE, National Conv. Record*, part 4. p. 88, 1958.
14. Combes W. C., National Bureau of Standards Techn. Note, № 25, Communications theory aspects of television bandwidth conservation.
15. Graham R. E., Subjective experiments in visual communication, *IRE, National Convention Record*, part 4, p. 100, 1958.
16. Bradley J. A., PCM coding and decoding system. Symposium on Communications Satellites, 12 May 1961.
17. C. C. I. R. Documents of the IX-th Plenary Assembly, Los Angeles, vol. III, 1959.
18. *Aviation Week*, p. 79, 6 February, 1961.
19. Slack M., Probability distribution of sinusoidal waves combined in random phase, *J. I. E. E.*, 93, part 3, 76 (1946).
20. Carbrey R. L., Video transmission over telephone cable pairs by a pulse code modulation, *Proc. Am. Inst. Elec. Engrs.*, 1546 (September 1960).
21. Fano R. M., The transmission of information, Techn. Rep., № 65 of Massachusetts Inst. of Techn. Res. Lab. of Electronics.
22. Hamilton B. P., Peak voltages in carrier telegraphy, *Bell Labs. Record*. Vol. XIX, № 12, August 1941.
23. Anderson D. R., Minimization of maximum amplitude in Frequency multiplexing, *Proc. IRE*, 49, 1, 357 (January 1961).
24. Carbrey R. L., Video transmission over telephone cable pairs by pulse code modulation, *Proc. IRE*, 48, 9.
25. An inquiry into the allocations of frequency bands for space communications, Depositions of American Telephone and Telegraph Company before the Federal Communications Commission, Washington 25 D. C.
26. Depositions of the Radio Corporation of America, as Ref. 25.
27. E. M. I. cathode ray tube decoding devices for digital communications systems, S. C. Ghose. URSI Symposium on Space Communications, Paris, 1961.

8. Система кодирования и декодирования при импульсно-кодовой модуляции¹

Брэдли Дж.

1. Введение

В статье Сандемана [1], посвященной системам связи с помощью ИСЗ, для более полного использования полосы частот и для уменьшения мощности передатчика предлагается передачу речевых сигналов производить с помощью двоичных чисел, кодированных специальным способом. Модулирующее напряжение должно квантоваться во времени с периодом 125 мксек и кодироваться с помощью 6- или 7-разрядного кода. Система кодирования выбирается так, чтобы кодовая комбинация содержала тем больше нулей, чем меньше уровень модулирующего сигнала. Таким образом, средняя мощность передатчика оказывается минимальной.

В данной статье предлагается метод кодирования и декодирования, при котором может быть использован код любого вида. Для предлагаемого вида кода этот метод обеспечивает простое, надежное и экономичное решение, хотя при этом и не обеспечивается скорость, необходимая при передаче видеосигналов. Существующие методы импульсно-

кодовой модуляции (ИКМ) видеосигналов основаны на использовании электронно-лучевых кодирующих трубок [2] и ограничены кодом Грея. Последующие разработки, возможно, позволят отказаться от этого ограничения.

Описываемый ниже метод еще не проверен экспериментально, однако многие используемые элементы аппаратуры являются стандартными для вычислительной техники. В качестве элементов памяти при кодировании и декодировании применяются стандартные ферритовые сердечники; возможно, что ферритовые сердечники с большим числом отверстий, описанные в работах [3] и [4], обладают в данном случае некоторыми преимуществами.

2. Возможные методы

Основная задача состоит в определении мгновенной амплитуды сигнала и сравнении ее с некоторым числом установленных уровней напряжения (в данном случае это число принимается равным 64); в результате этого сравнения должен сработать электронный переключатель, подающий на передатчик соответствующую кодовую комбинацию. Поскольку мгновенное значение сигнала непрерывно меняется, то оно должно запоминаться на время измерений. Это может быть достигнуто путем заряда конденсатора до этого уровня.

Напряжение с этого конденсатора должно быть подано на 64 компаратора, выходы которых используются для запуска соответствующих переключателей, подающих на передатчик кодовые комбинации от генератора кодовых последовательностей. Генератор кодовых последовательностей должен вырабатывать 64 комбинации; он является общим для всех каналов. Сигналы переключения необходимо запоминать на триггерах, чтобы обеспечить их неизменность за время считывания выбранной кодовой комбинации. В подобной системе, таким образом, необходимо иметь 64 компаратора со связанными с ними логическими устройствами, 64 запоминающих триггера и 64 переключателя.

Другой вариант состоит в использовании одного компаратора и 6 триггеров, управляющих переключаемыми сопротивлениями, как это сделано в обычном цифровом вольтметре. Таким образом, уровень сигнала будет закодирован

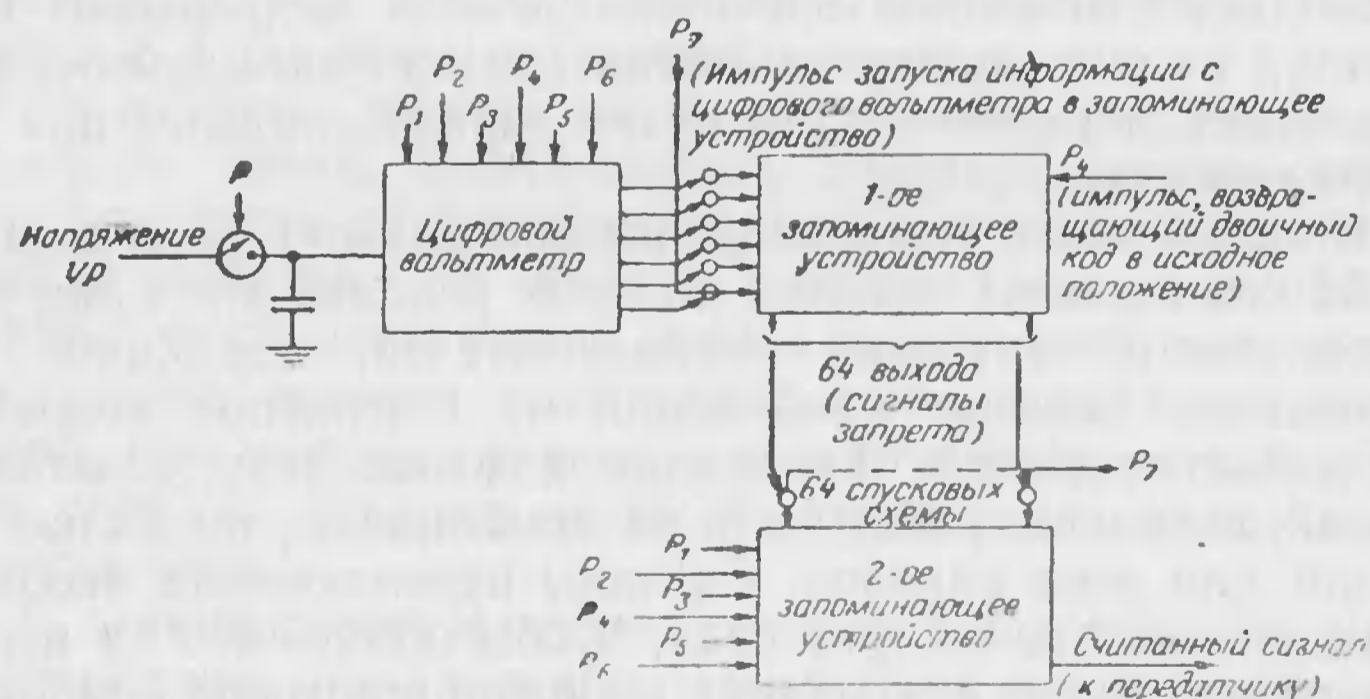
¹ Bradley J., Communication Satellites, Academic Press, Lnd.—N. Y., 1962, p. 75—83.

обычным двоичным кодом. Для запоминания сообщения на время нового измерения потребуются еще 6 триггеров в случае, если измерение занимает более 18 мксек. Сигналы с выхода триггеров поступают в диодную матрицу, разделяющую 64 возможных состояния и заставляющую срабатывать соответствующий переключатель, тем самым пропуская нужную кодовую комбинацию к передатчику. В матрице используются 384 диода, поэтому этот метод может быть менее экономичным, чем указанный выше.

Усовершенствование метода может заключаться в замене диодной матрицы и 6 триггеров матрицей из ферритовых сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса. Память на ферритовых сердечниках может быть использована для запоминания выходных сигналов цифрового вольтметра и для формирования необходимой кодовой комбинации. Именно этот метод будет рассмотрен в настоящей статье.

3. Описание метода

Блок-схема устройства показана на фиг. 1. Мгновенное значение входного сигнала запоминается на конденсаторе



Фиг. 1. Блок-схема кодирующего устройства.

на время измерения при разомкнутом ключе. Напряжение на конденсаторе измеряется 6-разрядным цифровым вольтметром обычного типа. Выходной сигнал вольтметра в виде двоичного кода поступает в запоминающее устройство на магнитных сердечниках, которое содержит все двоичные

числа от 0 до 63. При поступлении в эту матрицу сигнала от вольтметра изменятся все эти числа, кроме одного, которое соответствует напряжению на выходе вольтметра. 64 выхода запоминающего устройства определяют изменения в запоминаемом сообщении. Лишь на одном выходе не будет обнаружено никаких изменений и, таким образом, этот выход будет однозначно определен.

Этот выход используется для возбуждения второго магнитного запоминающего устройства, которое формирует соответствующую кодовую комбинацию, которая затем считывается и подается на вход передатчика.

Первое магнитное запоминающее устройство может быть выполнено на 12 сердечниках, второе — на 6 сердечниках. К сожалению, невозможно избежать 64-х цепей между устройствами памяти, потому что нет какой-либо простой зависимости между обычным и специальным двоичным кодами. В каждой из этих цепей необходимо ставить усилитель. Экономичность данного метода во многом будет определяться простотой этого блока. Декодирование принятого сигнала производится аналогичным образом.

Рассмотрим более подробно необходимую для выполнения описанных выше операций аппаратуру и принципы ее работы.

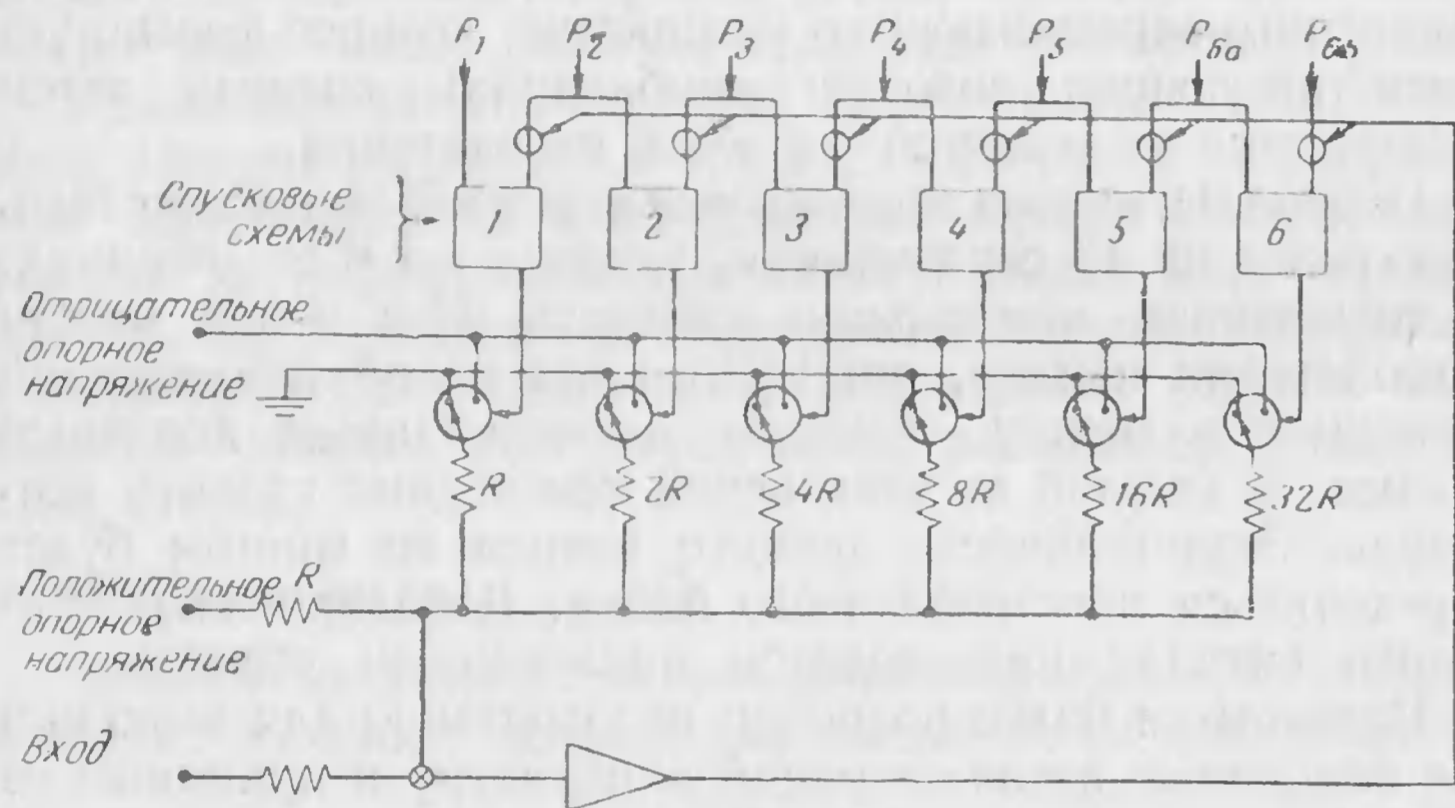
4. Генератор последовательности импульсов

Этот генератор вырабатывает последовательность из семи импульсов P_1, P_2, \dots, P_7 за каждый период квантования, равный 125 мксек. Импульсы подаются на все кодирующие устройства, у которых одна из клемм заземлена.

5. Цифровой вольтметр

Блок-схема этого узла приведена на фиг. 2. Она состоит из 6 триггеров, каждый из которых управляет двухпозиционным переключателем. Через контакты переключателей имеющиеся сопротивления подключаются к корпусу или к опорному отрицательному напряжению в зависимости от состояния триггера. Соседние сопротивления отличаются друг от друга по величине в два раза в соответствии со значениями, приписываемыми триггерам. Вторые кон-

цы сопротивлений через сопротивление смещения подключены к положительному опорному напряжению и через входное сопротивление — ко входу узла. Напряжение общей точки всех сопротивлений приводится к нулю с помощью напряжения, управляющего состоянием триггеров. Триггеры запускаются поочередно сигналами от импульсного генератора. Если подключение сопротивления изменяет



Фиг. 2. Принципиальная схема цифрового вольтметра.

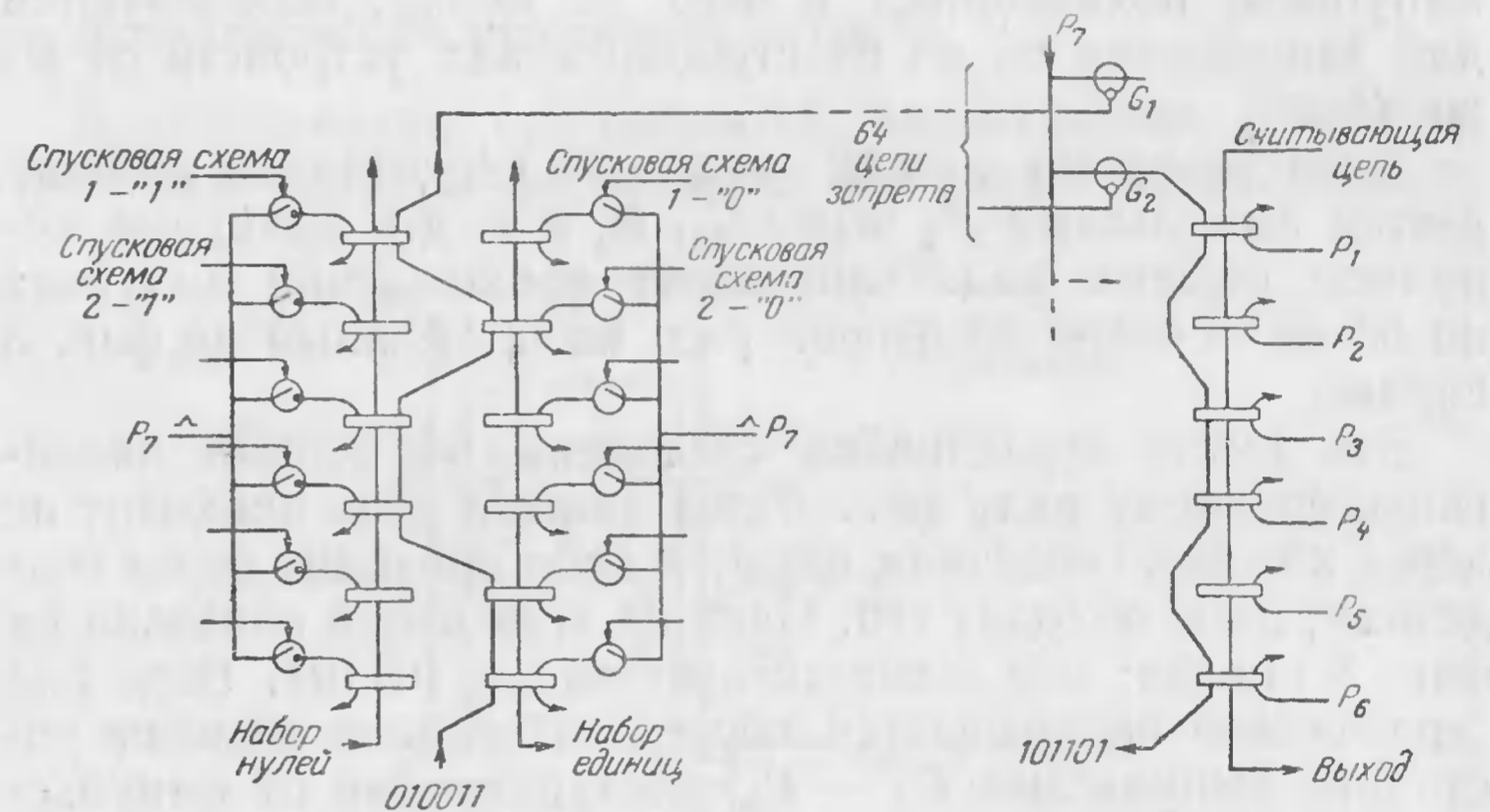
полярность напряжения, управляющего положением триггеров, то данный триггер возвращается в исходное положение следующим импульсом. Окончательное состояние триггеров определяет 6-разрядный двоичный код.

Устройства такого рода могут работать на гораздо более высоких скоростях, чем это требуется в рассматриваемом случае. В данной системе требования сводятся к тому, чтобы время срабатывания и время подключения входного конденсатора к напряжению сигнала в сумме не превышали 300 мксек.

6. Запоминающее устройство на магнитных сердечниках

Рассмотрим показанную на фиг. 3 систему из 12 магнитных сердечников, расположенных в 2 ряда по 6 сердечников. Каждый ряд связан «рядной» цепью. Импульс тока,

прошедший по левому ряду, приведет сердечники в состояние, которое мы обозначим через «0». Импульс тока, прошедший по правому ряду, приведет сердечники этого ряда в состояние, обозначаемое «1». Направление токов показано стрелками; обозначения состояний приняты только для облегчения объяснения принципа работы устройства.



Фиг. 3. Часть схемы запоминающего устройства на магнитных сердечниках.

Обмотки сердечников левого ряда подключены с помощью индивидуальных переключателей к выходу P импульсного генератора. Аналогично подключены обмотки правого ряда сердечников. Шесть пар переключателей управляются шестью триггерами цифрового вольтметра так, что если триггер находится в состоянии «0», то левый переключатель разомкнут, а правый — замкнут.

Сердечники связаны 64 цепями, причем каждая цепь проходит через один сердечник пары в строго определенном порядке. Таким образом, через каждый сердечник проходят 32 такие цепи. Одна из этих цепей показана на фиг. 3. Она определяет двоичное число 010011 и поэтому проходит через первый (т. е. верхний) левый (0) сердечник, второй правый (1) сердечник и т. д.

Предположим, что триггеры цифрового вольтметра зарегистрировали такую же цифру. Тогда переключатели

1,3 и 4 справа и 2, 5 и 6 слева будут замкнуты. Поэтому импульс P_7 переведет эти сердечники в противоположное состояние. При этом изменение магнитного потока сердечников приведет к наведению тока во всех остальных 63 цепях, кроме одной, так как эта единственная цепь, не проходящая через переключаемые сердечники. Выходные импульсы, появившиеся в этих 63 цепях, используются для запрещения 63 из 64 стробирующих устройств от G_1 до G_{64} .

В то же время второй ряд из 6 сердечников возбуждается импульсами P_7 через G_1 , G_2 и т. д.; выходные импульсы первого ряда запрещают прохождение импульса по 63 из 64 цепей во второй ряд, изображенный на фиг. 3 справа.

Эти шесть сердечников соединены 64 цепями аналогично среднему ряду фиг. 3, но каждая цепь проходит не через каждый сердечник пары, а либо проходит через сердечник, либо обходит его. Одна из этих цепей показана на фиг. 3 справа; она соответствует числу 101101. Весь ряд сердечников возвращается последовательно в нулевое состояние импульсами $P_1 - P_6$, поступающими от импульсного генератора. Во время такого сброса в общую выходную цепь считывания выдается 6-разрядный код.

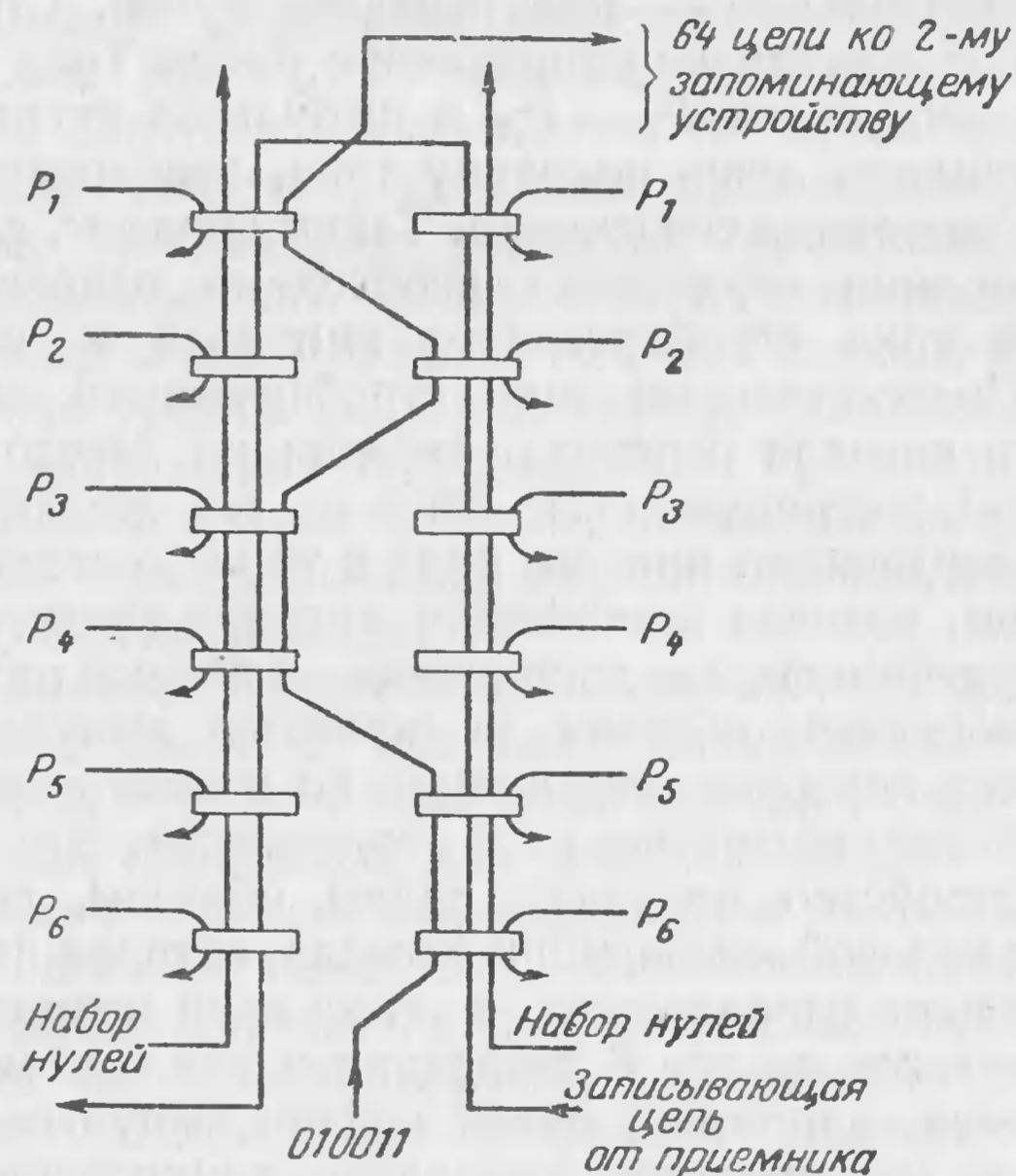
Предположим, что все сердечники первоначально находятся в состоянии «0». Когда по одной цепи, показанной на фиг. 3 справа, проходит импульс P_7 (по остальным 63 цепям прохождение импульса запрещено выходными сигналами первого набора сердечников), первый, третий и четвертый сердечники переводятся в положение «1». Поэтому при последовательном возврате сердечников в нулевое положение этими тремя сердечниками в выходной цепи к передатчику будут выданы импульсы. Полученная кодовая комбинация импульсов после формирования и усиления представляет собой 6-разрядный сигнал. На место 7-го разряда вводится синхроимпульс, уничтожающий паразитные импульсы, которые могут возникнуть от импульса P_7 . Этим заканчивается цикл формирования кодовой комбинации.

Необходимый переход от обычного двоичного к специальному двоичному коду осуществляется соответствующим расположением 64 соединительных цепей между дву-

мя запоминающими устройствами. Случайные импульсы, которые могут возникнуть при сбросе на «0» первого устройства (что может производиться в любой период времени, кроме P_7), не проходят на второе устройство, так как P_7 действует как строб-сигнал.

7. Декодирование принятого сигнала

Декодирование производится аналогичным способом. Принятая кодовая комбинация (за исключением синхро-



Фиг. 4. Схема магнитной памяти декодирующего устройства.

импульса) записывается с помощью обычных схем совпадения на 6 парх сердечников так, что «0» в принятом сигнале соответствует «0» и «1» в паре сердечников данного разряда. Аналогично «1» в принятом сигнале соответствует «1» и «0» в паре сердечников этого разряда.

Соответствующая схема показана на фиг. 4. Здесь 12 сердечников соединены 64 цепями так же, как на схеме фиг. 3. На фиг. 4 показана одна из цепей, отображающая кодовое число 010011. Сердечники возбуждаются попарно импульсами $P_1—P_6$ так же, как в схеме фиг. 3 справа. Сердечники соединены двумя «рядными» цепями, которые приводят их в нулевое состояние. Кроме того, оба ряда сердечников связаны «записывающей» цепью от приемника так, как это показано на фиг. 4. По этой цепи будут передаваться положительные импульсы тока при передаче единиц и отрицательные — при передаче нулей. Стрелками показано положительное направление токов. Токи от стробирующих импульсов $P_1—P_6$ и импульсов сигналов порознь составляют лишь половину тока, необходимого для изменения состояния сердечника. Таким образом, для изменения состояния сердечника необходимо одновременное протекание тока стробирующего импульса и импульса сигнала. Положительные токи стробирующего импульса и импульса сигнала переводят сердечники левого ряда в состояние «1»; отрицательные токи от тех же импульсов переводят сердечники правого ряда в то же состояние. Таким образом, кодовая комбинация сигнала вводится в левый ряд сердечников, а ее дополнение — в правый ряд. После этого аналогичным образом (с помощью импульсов P_7) производится переброс информации во второе запоминающее устройство, состоящее из 6 сердечников. Это запоминающее устройство получает, таким образом, двоичный эквивалент кодовой комбинации сигнала, которая передается (желательно параллельно, т. е. за один период следования импульсов во все 6 сердечников аналога матрицы, фиг. 3 справа, например, путем подачи импульса P_1) на 6 триггеров. Эти триггеры управляют двухпозиционными переключателями, которые суммируют значения шести сопротивлений таким образом, что на общей выходной точке восстанавливается напряжение, соответствующее данной двоичной кодовой комбинации.

Можно устранить необходимость генерирования положительных и отрицательных импульсов в зависимости от принимаемого сигнала. Вместо этого можно использовать только положительные импульсы и удвоить значения токов от стробирующих импульсов правого ряда сердечни-

ков. Однако в этом случае могут возникнуть затруднения с синхронизацией.

8. Синхронизация

Если мгновенное значение сигнала передается каждые 125 мксек в виде 7-разрядной кодовой комбинации, то синхронизация на стороне передачи осуществляется следующим образом.

Седьмой разряд кода является синхроимпульсом P_7 . За время, отведенное для разряда, информация из первого запоминающего устройства переводится во второе. Второе запоминающее устройство последовательно сбрасывается импульсами $P_1—P_6$, к которым добавляется синхроимпульс P_7 . Этот цикл повторяется. Во время прохождения импульса P_7 вольтметр не должен производить измерений, поскольку этот импульс управляет сбрасывающими переключателями первого запоминающего устройства. Поэтому конденсатор на это время подключается ко входу и заряжается до нового уровня. На вольтметре устанавливается новый уровень напряжения за период $P_1—P_6$. За это же время восстанавливается состояние сердечников первой матрицы. Импульсы синхронизации вырабатываются генератором, общим для всех каналов.

При приеме кодовая комбинация сигнала должна быть синхронизирована с местными синхроимпульсами. Это может быть осуществлено путем формирования импульсов местной синхронизации для каждого канала отдельно с устройством, управляемым переданным синхроимпульсом. Другим способом может быть запоминание принятого сигнала в феррит-транзисторном регистре сдвига. Из него информация по синхроимпульсу переводится параллельно в первое запоминающее устройство аналогично сбросу вольтметра во время передачи. «Записывающая» и «стробирующая» цепи (см. фиг. 4) при этом меняются ролями; на выходе регистра сдвига потребуется 6 усилителей.

Для оценки экономичности этих методов необходимо подробно рассмотреть всю многоканальную систему. Многое зависит от способа формирования импульсов тока большой силы (порядка многих ампер) и малой длительности и от того, как распределяется нагрузка генератора между различными каналами.

9. Дополнительные соображения

Сказанное в конце предыдущего параграфа относится и ко всей системе. В начале статьи было описано несколько различных методов. При подробном рассмотрении все они оказываются довольно сложными. Ценность описанной выше системы зависит от того, насколько экономичны будут импульсные генераторы и 64 усилителя, необходимые при передаче информации между двумя запоминающими устройствами.

Некоторые вопросы, возникающие при построении этой системы, могут быть решены только экспериментальным путем. К таким вопросам относится возможное возникновение ложных импульсов из-за взаимных наводок между 64 цепями в первом запоминающем устройстве на передающей стороне. При необходимости этот недостаток можно устранить, применив последовательное накопление, так как вольтметр по своей природе — последовательное устройство. Усилители на входе второго запоминающего устройства должны были бы в этом случае запоминать все сигналы запрета, выработанные до прихода импульса P_7 . Такие вопросы нуждаются в экспериментальном исследовании.

Далее, некоторая экономия может быть достигнута за счет использования большей части передающей аппаратуры для целей приема. Это, однако, еще более осложнило бы проблему выбора одного из двух абонентов, желающих одновременно вести переговоры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sandeman E. K., Satellite communication system providing channel dropping, British Interplanetary Sec. Symp. on Communication Satellites, 12 May, 1961.
2. Carbreu R. L., Video transmission over telephone cable pairs by pulse code modulation, *Proc. I. R. E.*, 48, № 9 (September 1960).
3. Rajchman J. A., Lo A. W., The transfluxor, *Proc. I. R. E.*, 44, 321—332.
4. Rajchman J. A., Crane H. D., Current steering in magnetic circuits, *Trans. I. R. E.* (March 1957).

9. Искусственный спутник Земли „Курьер“¹

Зиглин П., Сенн Дж.

1. Введение

Применение искусственных спутников Земли (ИСЗ) в качестве ретрансляционных станций, которые принимают с Земли, запасают и передают сообщения по команде с Земли, представляет собой эффективный способ уменьшения существующей перегрузки международных линий связи. Достаточно рассмотреть интенсивность международного обмена информацией и предполагаемый рост его в действующих ныне системах, чтобы в полной мере оценить коренной сдвиг, который могут произвести связные ИСЗ в вопросах планирования линий связи на будущее, а также перспективы, которые открываются в области глобальной связи при использовании ИСЗ.

Проект «Курьер» представлял собой исследовательскую работу, предпринятую с целью демонстрации технических и экономических возможностей систем связи с высокой пропускной способностью. В выполнении программы участвовали следующие основные подрядчики: бортовое оборудование ИСЗ — фирма «Филко», антенны наземных стан-

¹ Siglin P. W., Senn G., *Communication Satellites*, Academic Press, Lnd — N. Y., 1962, p. 185—197.

ций — фирма «Рэдиэйшн» и наземное оборудование — лаборатории компании ИТТ. Исследовательская лаборатория связи армии США обеспечивала планирование, координацию и техническое руководство.

ИСЗ «Курьер» может производить прием и запись сообщений от наземной станции с последующей передачей этих сообщений — после приема соответствующей команды — на другую наземную станцию. Отсюда и название ИСЗ «Курьер». ИСЗ способен работать также в режиме прямой ретрансляции телефонных, фототелеграфных или телеграфных сообщений в реальном масштабе времени (без задержки) от одной наземной станции к другой при наличии прямой видимости ИСЗ с обеих станций.

Основными исходными параметрами для проектирования системы являются: пункты установки наземных станций, зоны, обеспечиваемые связью, количество сеансов связи и их длительность. В систему входят комплексы наземных станций, которые, находясь в контакте с ИСЗ, осуществляют одновременно сопровождение ИСЗ, обмен данными и прием телеметрической информации.

Хранение сообщений, поступающих от наземных станций, на борту ИСЗ производится путем записи на магнитную ленту. По команде с Земли ИСЗ передает эти сообщения на другую наземную станцию, как только последняя обнаружит его и будет готова к приему сообщений.

На ИСЗ «Курьер» установлен стандартный радиомаяк метрового диапазона волн, который позволяет следить за ИСЗ с помощью существующей мировой сети следящих станций. Это слежение ведется с целью получения эфемеридных данных, используемых наземными станциями системы «Курьер». Эфемеридные данные, передаваемые на все наземные станции, позволяют получить последовательность значений азимута и угла места антенны для дискретных интервалов времени при каждом прохождении ИСЗ над наземной станцией. Для того чтобы облегчить обнаружение ИСЗ, наземная станция передает начальную команду «включить» по радиолинии метрового диапазона. После обнаружения ИСЗ дальнейший обмен сообщений и передача команд ведется по дециметровой радиолинии. Телеметрическая информация передается с ИСЗ на наземные станции по радиолинии метрового диапазона.

Проектирование системы «Курьер» основано на использовании почти круговой орбиты с высотой ~ 1170 км. Важнейшие параметры системы представлены в табл. 1 и 2. Проведенный, исходя из этих параметров, расчет величины отношения сигнал/шум показывает, что по линии ИСЗ — Земля при наклонных дальностях порядка 5000 км обеспечивается высокий уровень сигнала как в метровом, так и в дециметровом диапазонах волн.

Таблица 1

Параметры линии дециметрового диапазона

	ИСЗ	Наземная станция
Выходная мощность передатчика, <i>вт</i>	4	1000
Коэффициент шума приемника, <i>дб</i>	14	—
Эффективная шумовая температура приемника, $^{\circ}\text{К}$	—	640
Полоса пропускания по промежуточной частоте, <i>кГц</i>	550	100, 200 или 500
Усиление антенны, <i>дб</i>	4	41
Поляризация антенны	Линейная	Круговая на передачу Разнесенный прием
Отношение сигнал/шум при наклонной дальности 4800 км, <i>дб</i>		
линия ИСЗ — Земля	22	—
линия Земля — ИСЗ	21	—
Емкость каждого из четырех цифровых накопителей, <i>дв. ед.</i>	13 200 000	—
Скорость передачи, <i>дв. ед./сек</i>	55 000	—

Таблица 2

Параметры линии метрового диапазона волн

	ИСЗ	Наземная станция
Начальная (резервная) выходная мощность передатчика, <i>вт</i>	50	—
Рабочая выходная мощность передатчика, <i>вт</i>	1,5	100
Коэффициент шума приемника, <i>дб</i>	8	4
Полоса пропускания по промежуточной частоте, <i>кГц</i>	30	6
Усиление антенны	4	19
Поляризация антенны	Круговая	Линейная при передаче Разнесенный прием
Отношение сигнал/шум при наклонной дальности 5000 км, <i>дб</i>		
линия ИСЗ — Земля (начальный режим)	18	—
линия ИСЗ — Земля (рабочий режим)	25	—
линия Земля — ИСЗ	32	—

2. Рабочий режим и слежение

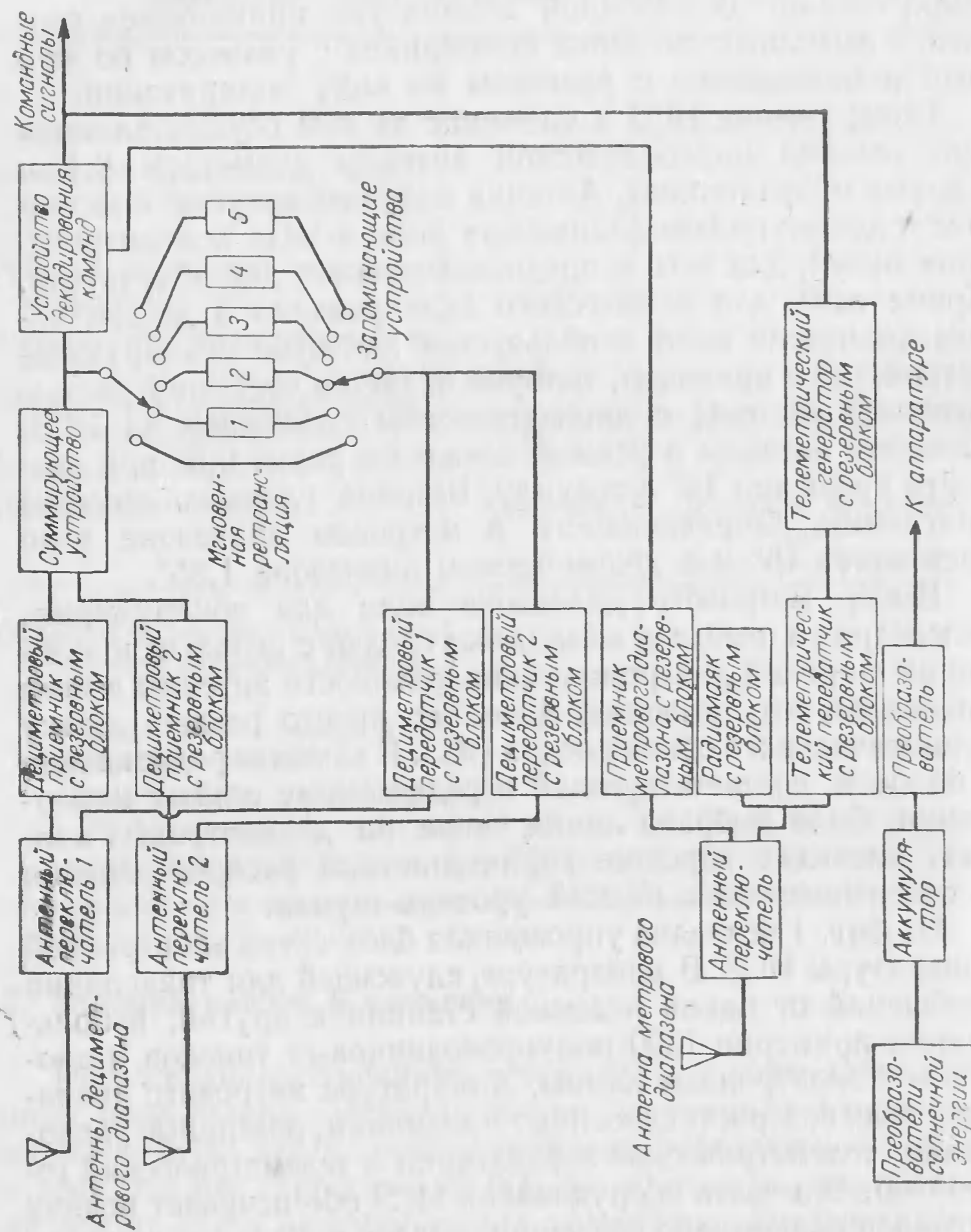
При обмене сообщениями между ИСЗ и наземной станцией информация, предварительно записанная на Земле на магнитную ленту, последовательно передается на ИСЗ с эффективной скоростью 55 000 *дв. ед/сек* и записывается на нем на ленту запоминающего устройства, предназначенного для работы с другими наземными станциями. Емкость каждого накопителя составляет 13 200 000 *дв. ед.* Считывание данных на ИСЗ осуществляется (по команде) одновременно с передачей сообщений на него. С целью уменьшения вредных воздействий на передачу информации с ИСЗ, обусловленных вращением и кувырканием последнего,

передача производится с разносом по частоте, причем прием на наземной станции ведется с разносом по частоте и по поляризации. В наземной аппаратуре применяется сложение выходных сигналов приемников с разносом по частоте и приемников с разносом по виду поляризации.

Обнаружение ИСЗ и слежение за ним осуществляются при помощи параболической антенны диаметром 8,4 м с двумя облучателями. Антенна излучает энергию в метровом и дециметровом диапазонах волн в виде концентрических лучей, для чего и предназначены эти два облучателя. Кроме того, для конического сканирования в дециметровом диапазоне волн используется линзовое сканирующее устройство с приводом, которое является составной частью антенной системы с автоматическим слежением за ИСЗ. Точность антенны в режиме слежения равна $0,5^\circ$ при скорости вращения 15° в секунду. Ширина главного лепестка диаграммы направленности в метровом диапазоне волн составляет 18° и в дециметровом диапазоне $1,35^\circ$.

Выбор метрового диапазона волн для обнаружения, телеметрии и передачи команд был сделан с целью использования широкой диаграммы направленности антенны в этом диапазоне, что позволяет довольно просто решить задачу первоначального обнаружения ИСЗ. В качестве радиоканала с полосой, соответствующей передаваемому объему информации, была выбрана линия связи на дециметровых волнах, имеющих хорошие характеристики распространения и обеспечивающих низкий уровень шумов.

На фиг. 1 показана упрощенная блок-схема электронной аппаратуры ИСЗ. В аппаратуре, служащей для трансляции сообщений от одной наземной станции к другой, используются примерно 1300 полупроводниковых триодов и диодов и 2 электронные лампы. Аппаратура метрового диапазона волн содержит сдвоенные приемники, резервные радиомаяки, телеметрические передатчики и телеметрический генератор. Эта часть оборудования ИСЗ обеспечивает подачу сигналов радиомаяка слежения, подачу начальной команды «включить», телеметрическую передачу 35 параметров аппаратуры ИСЗ и получение подтверждения о приеме команд. Четыре штыревых антенны, питаемые электрически в квадратуре, создают диаграмму направленности с круговой поляризацией сигнала вдоль оси, нормальной к плоскости



Фиг. 1. Блок-схема аппаратуры ИСЗ.

штырей. Каждый приемник метрового диапазона представляет собой собранный полностью на полупроводниковых приборах супергетеродин с однократным преобразованием частоты и коэффициентом шума 8 дБ. Сигналы радиомаяка и телеметрические сигналы передаются отдельными передатчиками. Предусмотрены резервные блоки, которые включаются по соответствующей команде с наземной станции. Передатчики собраны полностью на полупроводниковых приборах. Радиомаяк излучает незатухающие колебания, а телеметрический передатчик модулируется по частоте поднесущими частотами, обеспечивающими передачу 35 параметров аппаратуры ИСЗ.

Радиолиния связи между ИСЗ и наземными станциями работает в дециметровом диапазоне. Две линейно поляризованные антенны обеспечивают излучение в пределах телесного угла, превышающего полусферу. С каждой антенной соединен отдельный приемник, к которому постоянно подключены резервные блоки. Два дециметровых передатчика с рабочими частотами, разнесенными примерно на 20 МГц, обеспечивают частотно разнесенную передачу на наземную станцию. Сигналы с выходов четырех приемников складываются в суммирующем устройстве. Каждый из приемников представляет собой собранный полностью на полупроводниковых приборах супергетеродин с однократным преобразованием частоты и коэффициентом шума, равным 14 дБ. На ИСЗ имеется 4 передатчика дециметрового диапазона (2 основных и 2 резервных). Два действующих передатчика модулированы по частоте одним и тем же сигналом. Пара резервных передатчиков включается по команде наземной станции.

Сообщения, записанные на магнитной ленте, хранятся в одном из пяти запоминающих устройств. Последние выполнены таким образом, что запись и воспроизведение осуществляются при противоположных направлениях движения ленты. Поэтому сообщение считывается в обратном порядке (от конца к началу), что вызывает необходимость введения устройства, реверсирующего сообщение. Старые записи автоматически стираются постоянным магнитом в период воспроизведения. Каждое запоминающее устройство весит 2,2 кг и потребляет мощность 10 Вт. Устройства герметически запаены в сварном алюминиевом кожухе,

что необходимо для обеспечения надежной работы механизмов в условиях космического пространства.

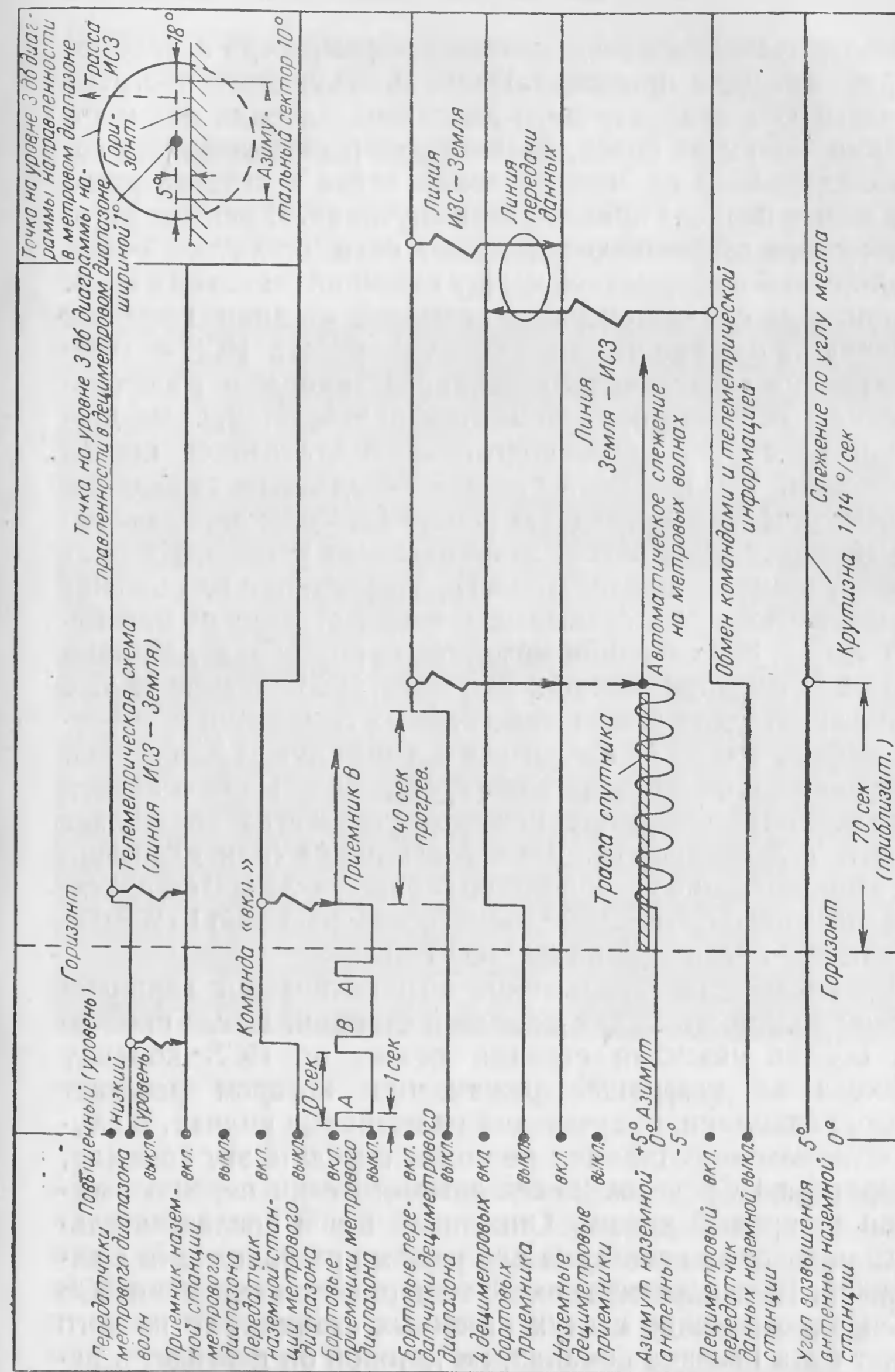
Аппаратура ИСЗ питается от никель-кадмиевых аккумуляторов, заряжаемых от солнечных батарей. Резервная мощность аппаратуры спутника в периоды между сеансами связи составляет 13 *вт*; максимальная мощность, потребляемая в дуплексном режиме обмена сообщениями, равна 225 *вт*. Солнечная батарея, состоящая из 19 152 элементов размером 1 × 2 см, отдает мощность 60 *вт* для зарядки аккумуляторов.

Оператор наземной станции имеет возможность передать на ИСЗ по обеим радиолиниям всего 21 команду. Команды, управляющие работой запоминающих устройств и дециметровых передатчиков, кодируются для обеспечения скрытности работы.

Для повышения надежности оборудования значительное внимание было уделено резервным цепям и элементам. Такие устройства, как радиомаячные и телеметрические передатчики, запоминающие устройства и дециметровые передатчики, включаются по командам. Другая аппаратура, например приемники дециметрового диапазона, аккумуляторы и солнечные батареи, включены постоянно, с тем чтобы обеспечивалась непрерывная работа остающихся блоков в случае, если некоторые из них будут повреждены.

В процессе работы телеметрируются следующие параметры бортовой аппаратуры: температура, напряжение аккумуляторов, зарядный ток, мощность передатчиков, напряжение АРУ приемников и положение ленты всех запоминающих устройств.

На время прохождения ИСЗ над наземной станцией антенна последней направляется в точку пространства, где ИСЗ должен быть впервые обнаружен. Последовательность операций, выполняемых в процессе обнаружения ИСЗ, показана на фиг. 2. Когда на наземной станции «Курьер» будут приняты сигналы метрового маяка, оператор посылает команду «включить» по радиолинии Земля—ИСЗ. По этой команде на ИСЗ включаются связные передатчики и приемники дециметрового диапазона, выключается радиомаяк, включается мощный телеметрический передатчик, работающий на той же частоте метрового диапазона, что и радиомаяк, и приемники этого диапазона переводятся из



Фиг. 2. Диаграмма последовательности работы аппаратуры системы.

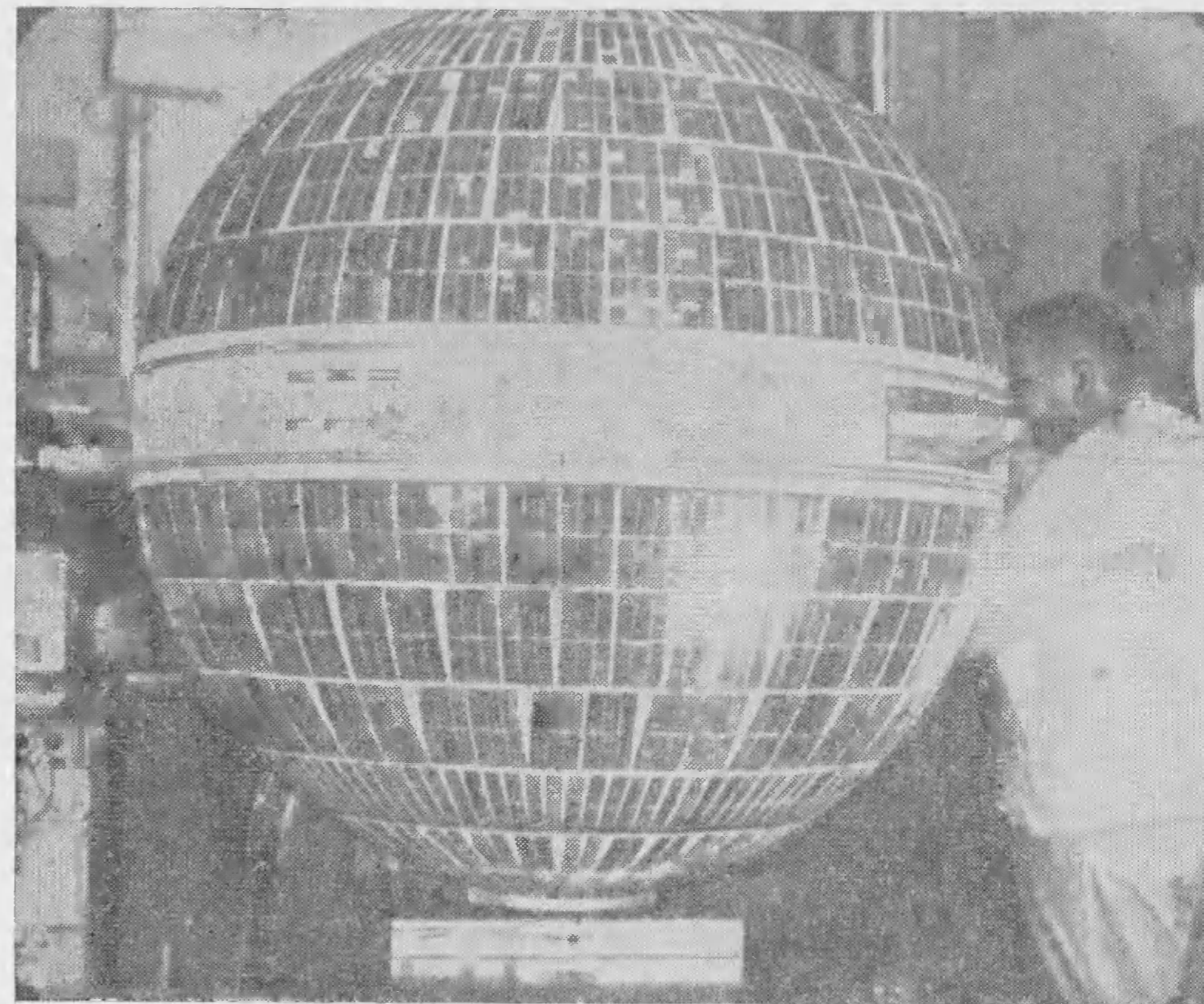
режима с временным разделением в режим, когда непрерывно работает один приемник. После 40-секундного прогрева передатчиков дециметрового диапазона антенна наземной станции начинает поиск, захватывает и автоматически сопровождает ИСЗ на частоте линии связи в течение всего остального периода прохождения спутника. В режиме автоматического сопровождения может осуществляться обмен накопленной информацией между наземной станцией и ИСЗ. В типичном случае оператор наземной станции посылает команду на одно из запоминающих устройств ИСЗ — «воспроизвести» записанные сообщения. В процессе воспроизведения сообщения оно автоматически стирается, с тем чтобы магнитная лента была подготовлена для записи нового сообщения. На наземной станции переданные сообщения записываются на магнитную ленту. Одновременно оператор передает на другое запоминающее устройство ИСЗ команду «запись», после чего на ИСЗ передаются сообщения, предварительно записанные на наземной станции на магнитную ленту. Эта операция может быть повторена для каждого из пяти запоминающих устройств ИСЗ. Четыре из них используются для записи телеграфных сообщений в цифровой форме, пятый — аналогового типа служит для записи телефонных и фототелеграфных сообщений. Период записи или воспроизведения для каждого устройства составляет 4 мин. Телеграфные данные передаются на (или с) цифровые записывающие устройства со скоростью 35 000 дв. ед/сек. За 4 мин может быть записано или воспроизведено 13 200 000 дв. ед., что эквивалентно 300 000 слов.

Время обмена сообщениями ограничивается периодом прямой видимости ИСЗ с наземной станцией. После окончания обмена наземная станция подает на ИСЗ команду перехода на резервный режим, при котором работает только радиомаяк, излучающий на метровых волнах. В случае если наземная станция не может передать эту команду, аппаратура ИСЗ через 20 сек автоматически переключается на резервный режим. Описанная выше последовательность операций характерна для режима ретрансляции с задержкой. Если в течение какого-то промежутка времени ИСЗ виден одновременно с двух наземных станций, то на него может быть послана команда, по которой он перейдет в режим мгновенной ретрансляции (в реальном масштабе вре-

мени). В этом режиме сообщения ретранслируются электронной аппаратурой ИСЗ без задержки.

3. Конструкция спутника

ИСЗ «Курьер» представляет собой сферу диаметром 130 см и весит 200 кг (фиг. 3). Около 80% поверхности

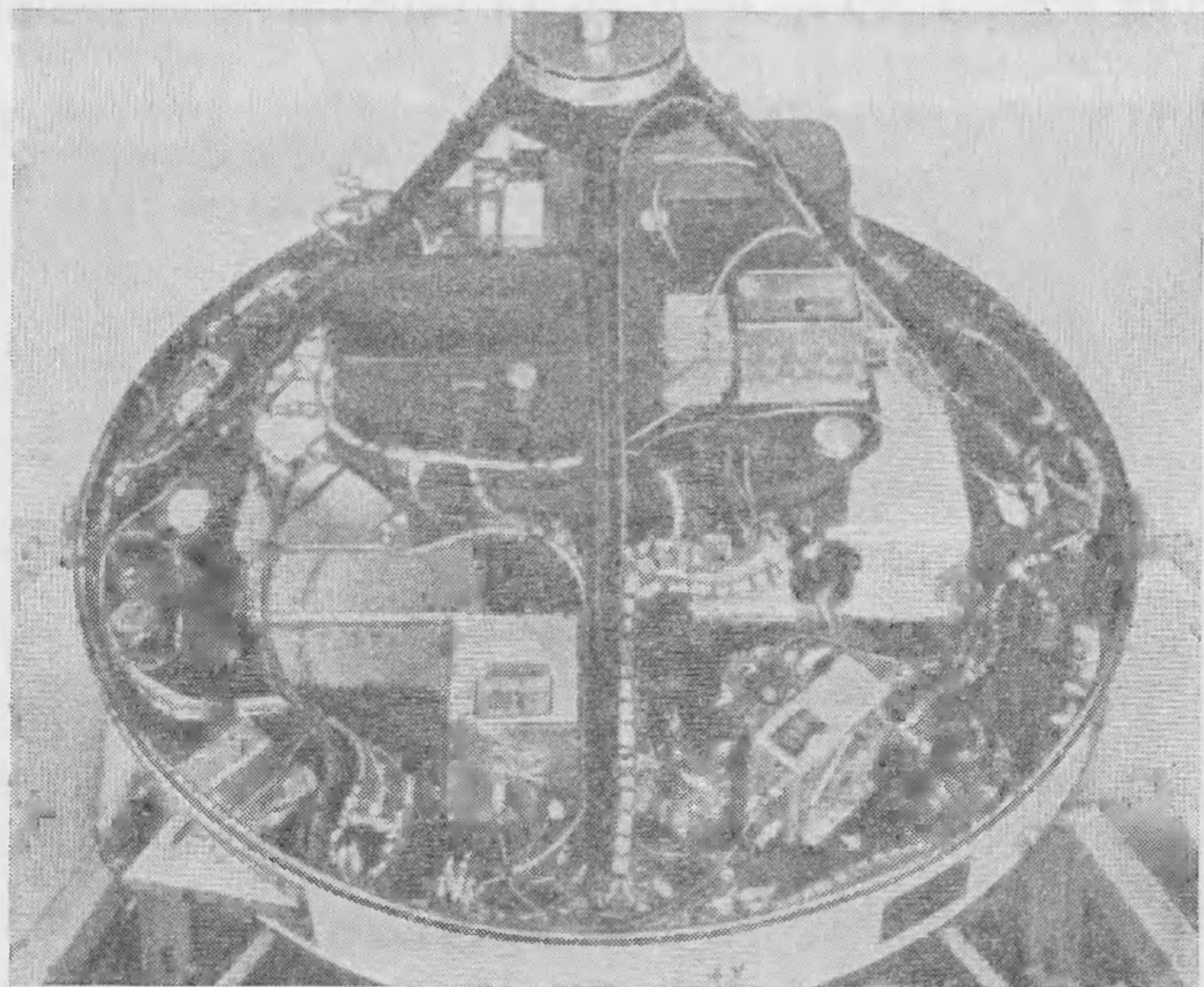


Фиг. 3. Внешний вид ИСЗ «Курьер».

сферы покрыто элементами солнечных батарей (общее число их составляет 19 152), которые смонтированы в модули. Каждый элемент покрыт оптическим стеклянным фильтром, закрепленным адгезивным составом. Эти фильтры не пропускают инфракрасную часть спектра солнечного излучения, что повышает эффективность работы солнечных батарей. Четыре штыревые антенны метрового диапазона раз-

несены на равные расстояния относительно центрального магниевого обруча, а две СВЧ щелевые антенны расположены в противоположных точках того же обруча.

Внутренний каркас ИСЗ несет на себе электронную аппаратуру, закрепленную на средней, верхней и нижней плат-

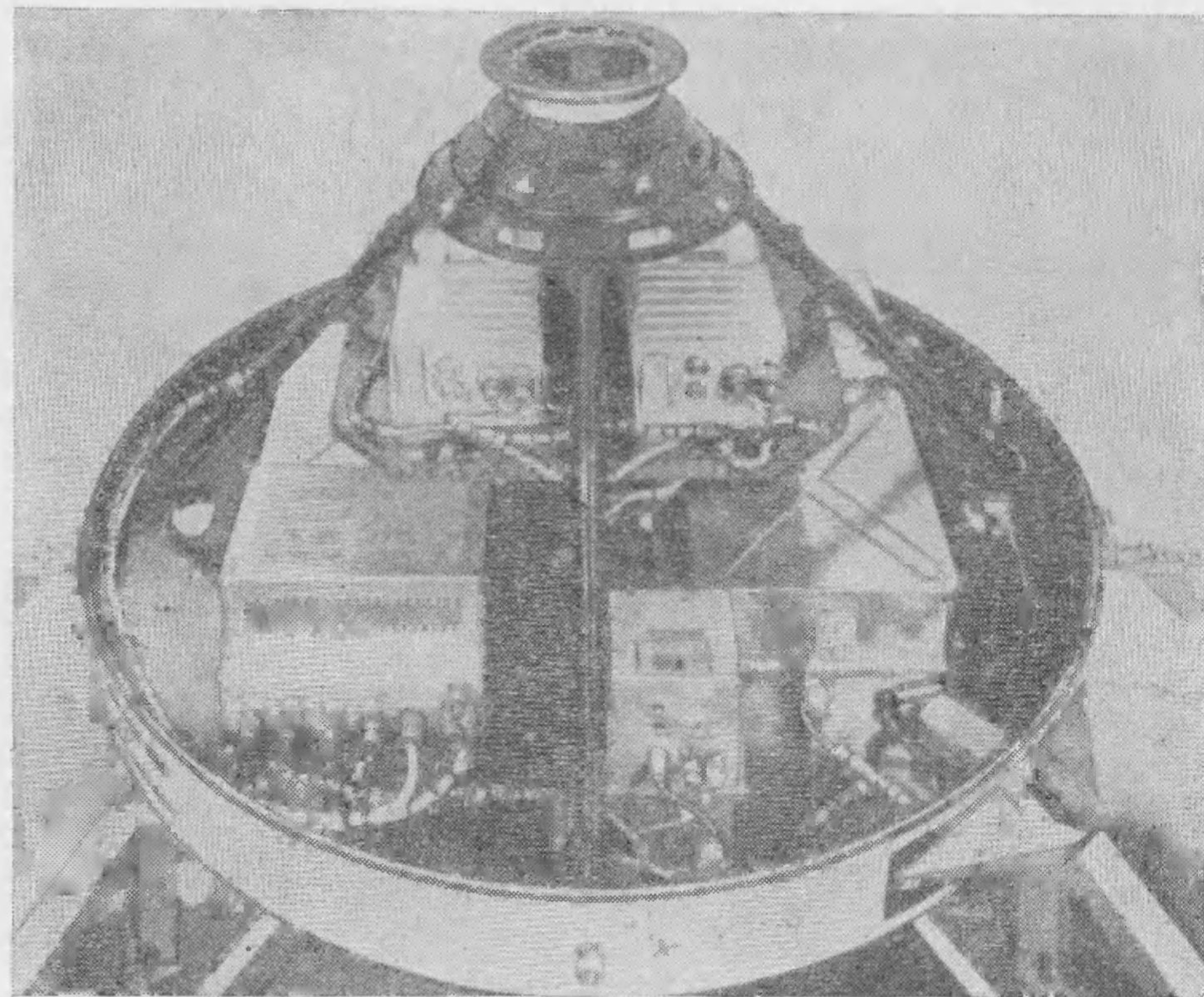


Фиг. 4. Вид аппаратуры ИСЗ сверху.

формах сотовой конструкции, выполненных из стекловолокна и эпоксидной смолы.

Опорами платформ служат алюминиевые трубки. На фиг. 4 представлен вид сверху на внутреннее расположение аппаратуры в ИСЗ: видны считывающие устройства, приемники метрового диапазона, расположенные на верхней платформе, дециметровые передатчики, антенные переключатели и приемники на средней платформе. Под верхней платформой смонтирован передатчик радиомаяка и телеметрический передатчик, телеметрический генератор и блок выделения

сообщений, входящий в командное декодирующее устройство. На фиг. 5 показан вид снизу на аппаратуру ИСЗ. Здесь видны запоминающие устройства, смонтированные на нижней платформе; дециметровые передатчики и приемники,

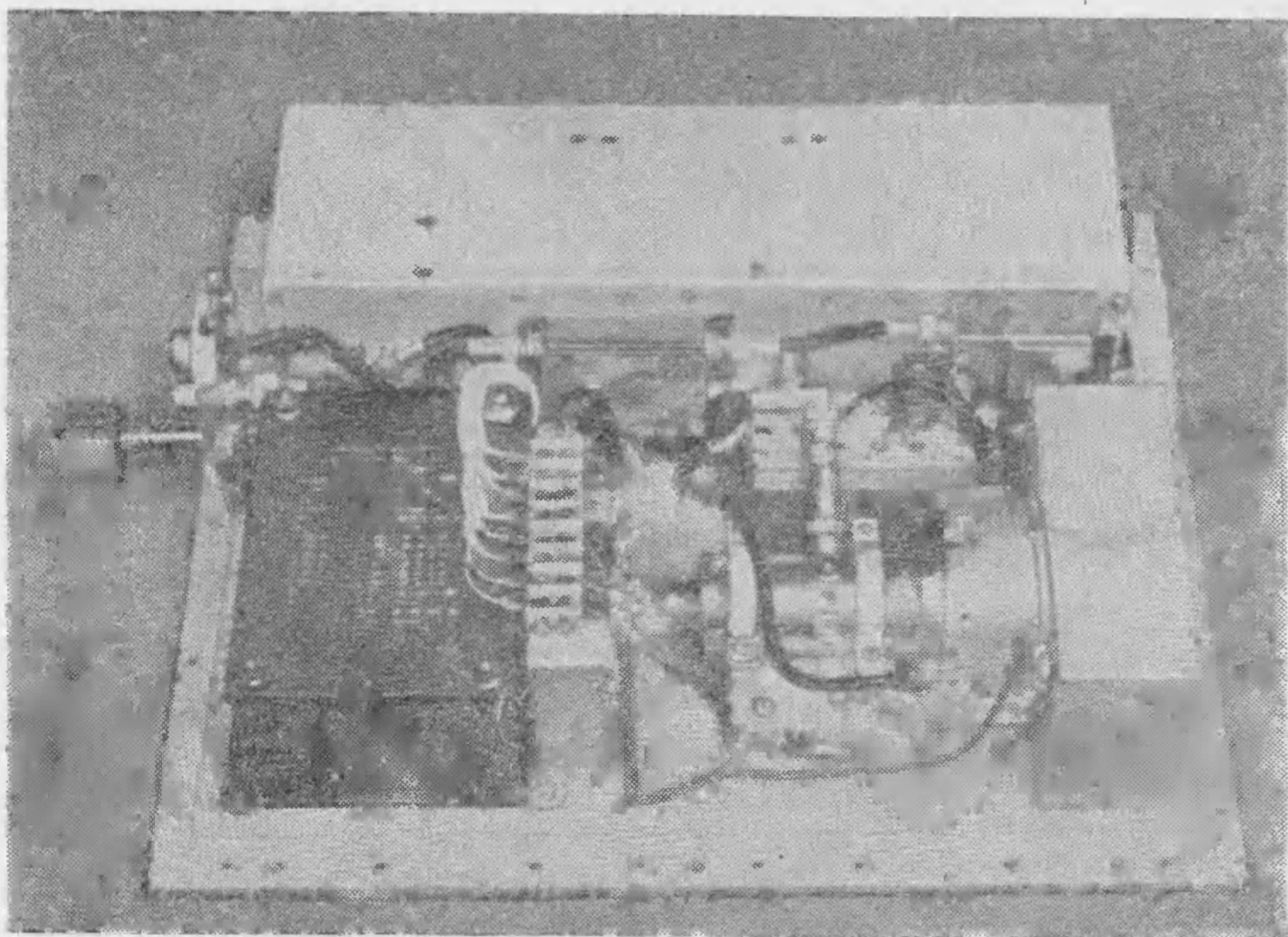


Фиг. 5. Вид аппаратуры ИСЗ снизу.

а также логические блоки командного декодирующего устройства, смонтированного на нижней стороне средней платформы. Контейнеры с никель-кадмиевыми аккумуляторами установлены также в центре средней платформы. Каждый блок термически изолирован от других. Регулирование температуры достигается путем подбора соответствующих покрытий поверхности блоков и выбором соответствующей «геометрии излучения» различных элементов. Кольцо, видимое в верхней части фиг. 5, прилегает к вращающейся плите второй ступени ракеты.

На фиг. 6 показан дециметровый передатчик со схемой автоматической подстройки частоты (перед герметизацией блока).

Каждый передатчик герметизируется в сварном магниевом кожухе с целью обеспечения надежной работы механи-

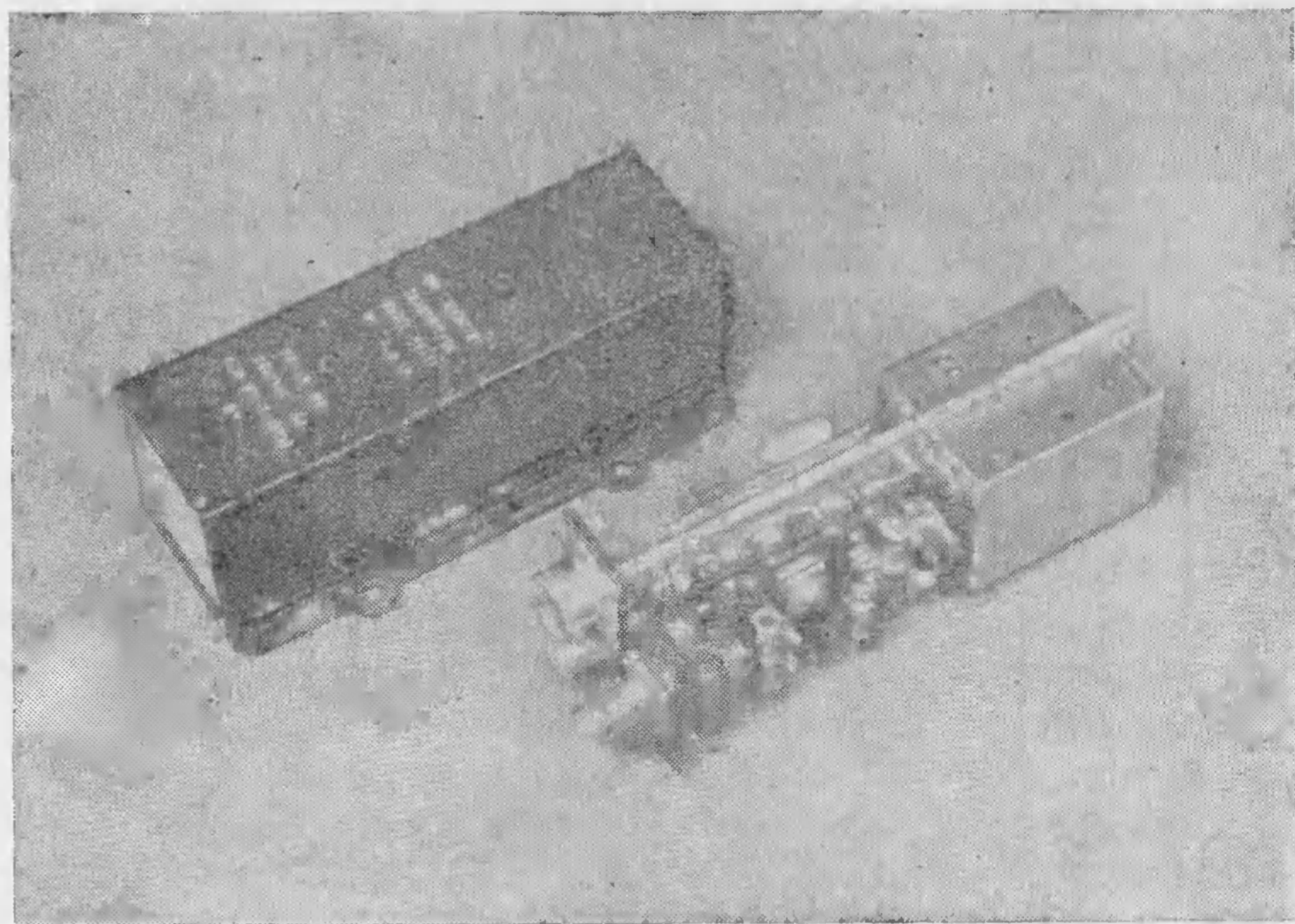


Фиг. 6. Передатчик дециметрового диапазона.

ческих элементов схемы автоматической подстройки частоты (АПЧ) в условиях космического пространства. Прямоугольный блок в нижнем правом углу представляет собой теплоотвод, наполненный воском, работа которого основана на поглощении тепла при переходе воска из твердого в жидкое состояние в процессе его нагрева при охлаждении анода лампы передатчика.

На фиг. 7 показан телеметрический передатчик метрового диапазона волн, полностью собранный на полупроводниковых приборах. Частота этого передатчика стабилизируется при помощи кварца в пределах $\pm 0,002\%$. Выходная мощность составляет 1 *вт*. Все элементы ИСЗ были испытаны на вибрационном стенде при вибрации с ускорением

11,5 *g* и по шумовому закону со спектром 20—2000 *гц* в течение 3 *мин*. ИСЗ в целом был испытан при вибрации 7,5 *g* в том же шумовом спектре. ИСЗ «Курьер» испытывались также в вакуумных камерах в условиях, имитирующих условия на орбите. В установке, служившей для испытания,



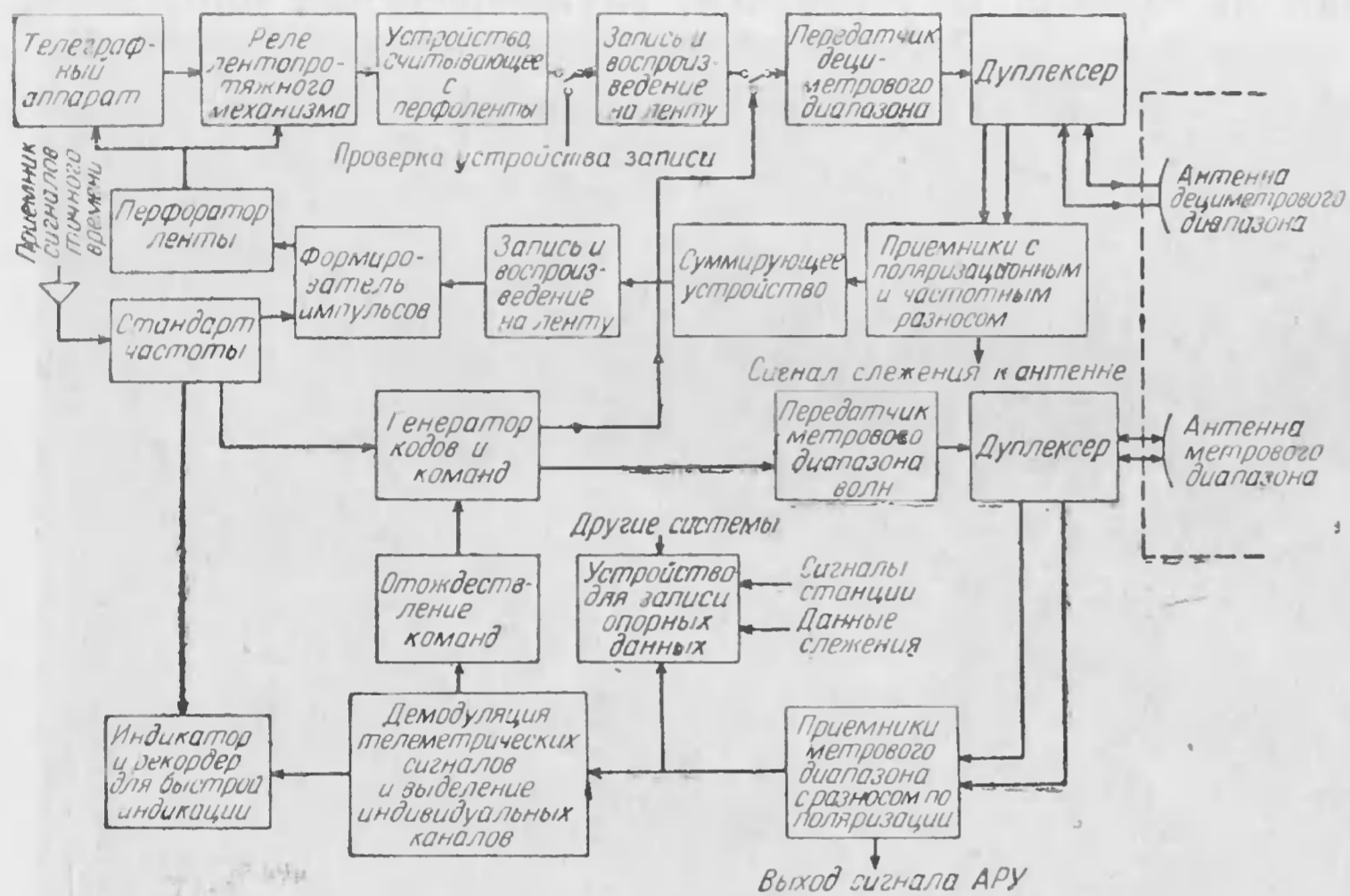
Фиг. 7. Телеметрический передатчик метрового диапазона.

между стенками камеры пропускаться жидкий азот, имитировавший холод космического пространства. Давление в камере было снижено до 10^{-5} *мм рт. ст.* Имитация солнечного тепла производилась при помощи электрического нагревательного элемента, который вращался вокруг ИСЗ со скоростью, соответствующей скорости вращения последнего.

4. Наземные станции

Наземные станции были расположены в форте Монмус (шт. Нью-Джерси) и в Кэмп Салинас (Пуэрто-Рико). Расположение станций в этих пунктах позволило провести эксперименты с ИСЗ в режиме задержанной и мгновенной

ретрансляции. Высота и наклон орбиты ИСЗ сделали возможным примерно из 14 оборотов ИСЗ в сутки использовать 5 оборотов для работы с фортом Монмус и 7 оборотов с пуэрториканской станцией. Сеансы связи продолжались



Фиг. 8. Блок-схема наземной станции.

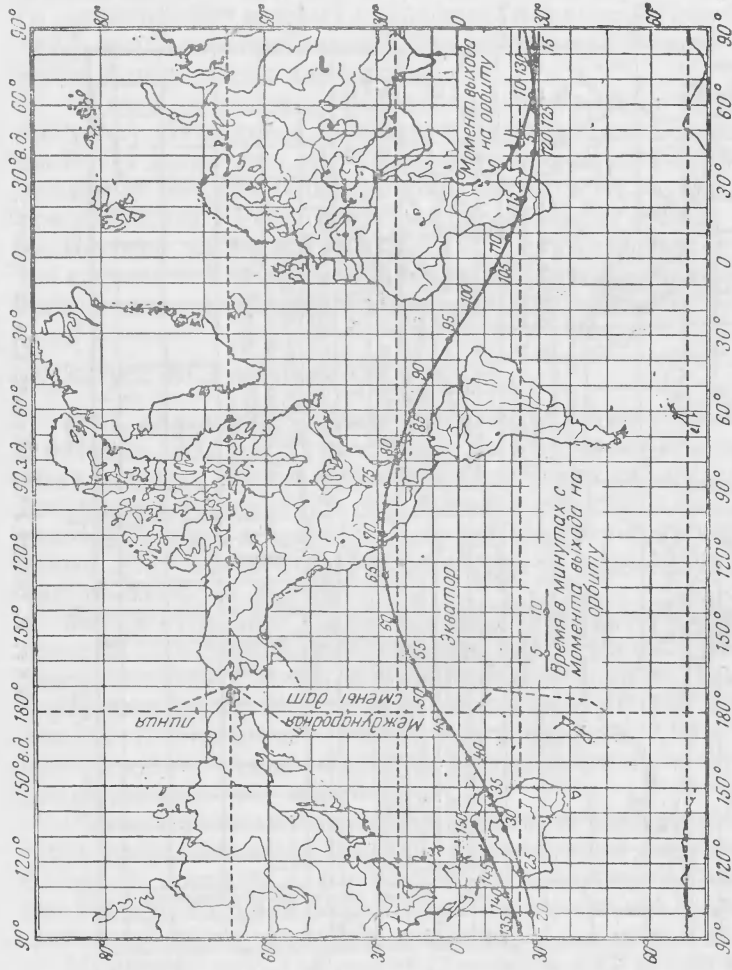
от 8 до 19 мин, при этом в течение значительных промежутков времени ИСЗ находился в зоне прямой видимости обеих станций. Это позволило провести эксперименты в режиме мгновенной ретрансляции. В комплект станции в форте Монмус входит параболическая антенна диаметром 8,4 м, 3 полуприцепа и ремонтный фургон. Оборудование полуприцепов обеспечивает согласованное управление процессами связи и включает в себя пульт управления и центр обработки сообщений. Радиоприцеп содержит всю передающую аппаратуру метрового и дециметрового диапазонов волн.

На фиг. 8 представлена упрощенная блок-схема наземной станции. Система питания антенны содержит элементы для возбуждения ее в дециметровом и в метровом диапазонах волн, а также линзовое сканирующее устройство с приводом, обеспечивающее коническое сканирование. Обо-

рудование наземной станции, работающее в метровом диапазоне, использует разнесенный прием с селекцией по поляризации, причем при передаче предусмотрено переключение на горизонтальную или на вертикальную линейную поляризацию. Прием сигналов радиомаяка и телеметрических сигналов ведется с помощью этой аппаратуры метровых волн. Телеметрическая информация записывается на ленту самописца. Последний применяется для наблюдения за условиями загрузки записывающего устройства с магнитной лентой, а также для контроля степени заряженности никель-кадмиевых аккумуляторов в начале сеанса.

В дециметровом диапазоне применяется круговая поляризация при передаче и частотный и поляризационный разнос при приеме. Для обеспечения частотного и поляризационного разноса в приемной аппаратуре наземной станции применяется супергетеродинная схема с двойным преобразованием частоты, в которой используется 4 параметрических усилителя. Некогерентная работа двух передатчиков ИСЗ требует сложения сигналов как до, так и после детектора. Приемное устройство имеет динамический диапазон от -140 до -100 дБ относительно ватта.

Для повышения пропускной способности при передаче телеграфных сообщений применяется буферный метод преобразования скорости передачи. Телеграфные сообщения с бумажной ленты преобразуются в электрические сигналы со скоростью 200 кодовых комбинаций в секунду и записываются на магнитную ленту, движущуюся со скоростью 4,2 см/сек. Каждая кодовая комбинация сообщения записывается параллельно на 6 дорожек магнитной ленты. Эта информация воспроизводится затем при скорости движения ленты, равной 152 см/сек. Сигналы с магнитной ленты преобразуются из параллельной в последовательную форму и используются для частотной модуляции несущей, служащей для передачи информации на ИСЗ со скоростью 55 000 дв. ед/сек. Седьмой, или стоповый, двоичный знак каждой кодовой комбинации вводится в устройство, преобразующее данные из параллельной в последовательную форму. Сообщения, поступающие с ИСЗ на наземные приемники, преобразуются из последовательной в параллельную форму и записываются на магнитную ленту, движущуюся со скоростью 152 см/сек. Эти сообщения затем



Ф и г. 10. Расчетная трасса, соответствующая орбите ИСЗ «Курьер-IV»

продолжал работать, что свидетельствует о том, что оборудование ИСЗ функционировало в резервном режиме.

Хотя срок службы ИСЗ оказался небольшим, система продемонстрировала возможности, которые позволят ей конкурировать с трансатлантическими коротковолновыми и кабельными линиями связи. При ее усовершенствовании такая система может быть сделана конкурентоспособной и в экономическом отношении.

10. Антенные устройства наземных станций в системах связи с помощью искусственных спутников Земли¹

Тодд Дж.

1. Введение

В печати широко обсуждается наступление новой эры всемирной связи с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ). Хотя в основном рассматривается трансатлантическое телевидение, такой метод может быть применен для обычной коммерческой и военной связи. В данной статье описаны некоторые требования к наземным антенным устройствам при использовании их в системах связи с помощью ИСЗ.

2. Параметры системы

Для связи с помощью ИСЗ могут быть использованы частоты от 20 Мгц до 10 Ггц. По мере повышения требований к качеству связи становится желательным использование все более высоких частот как с точки зрения уменьшения помех, так и с точки зрения получения более широкой полосы частот. Однако использование слишком высоких

частот приводит к заметному затуханию сигналов в осадках; это в свою очередь, согласно теореме обратимости, вызывает рост тепловых шумов; кроме того, сами приемники в этом случае имеют более высокий коэффициент шума. Поэтому оптимальными частотами являются частоты от 2 до 6 Ггц.

3. Шумы антенных устройств

ИСЗ могут быть активными или пассивными. В любом случае способность наземной приемной станции принимать чрезвычайно малые уровни сигнала будет ограничивающим фактором. Поэтому потребуются антенные устройства с большим коэффициентом усиления, что вызовет необходимость применения управляемых зеркал диаметром в 18 и более метров. Кроме того, чрезвычайную важность приобретают характеристики всей приемной системы (включая антенные устройства) и уровень шумов как внутренних, так и внешних. Поскольку используются малозумящие приемные устройства, то необходимо рассмотреть шумы, вносимые антенными устройствами.

4. Эффективная шумовая температура антенн

Несколько десятилетий назад чувствительность приемной системы ограничивалась усилением приемника и увеличивалась путем добавления дополнительных ламповых каскадов. Впоследствии было установлено, что наряду с полезным сигналом в этих каскадах усиливаются также и шумы, так что имеет место некоторое предельное усиление, после которого дальнейшее увеличение усиления не приводит к росту отношения сигнал/шум. Тогда все большее внимание стали обращать на уменьшение уровня шумов системы и увеличение отношения сигнал/шум достигалось за счет применения каскадных триодных усилителей с малыми шумами. Положение, существовавшее ранее в усилителях, наблюдается теперь в антенных устройствах.

Кроме полезного сигнала, принимаемого основным лепестком диаграммы направленности, антенная система принимает также шумы как по основному лепестку, так и по боковым и задним лепесткам. Шумы возникают также в фидере. Эти шумы могут быть вызваны помехами, но во

¹ Todd J. K., Point to Point Telecommunications, v. 6, № 3, 1962, 30—42.

многих случаях уровень тепловых шумов является определяющим. Точно так же как разработка более высококачественных усилителей открыла нам значение шумов, возникающих в первых каскадах приемной системы, так и новые современные усилители — парамагнитные, параметрические с охлаждением и даже неохлаждаемые параметрические усилители позволили оценить шумы собственно антенных устройств.

Шумовые характеристики больших антенных устройств (и приемников) часто выражаются в виде эффективной шумовой температуры в градусах Кельвина. Порядок величин эффективной шумовой температуры современных входных усилителей приемников ($^{\circ}$ К):

2000 — для усилителей на лампах бегущей волны (ЛБВ),

150 — для параметрических усилителей,

20 — для параметрических усилителей с охлаждением,

10 — для парамагнитных усилителей.

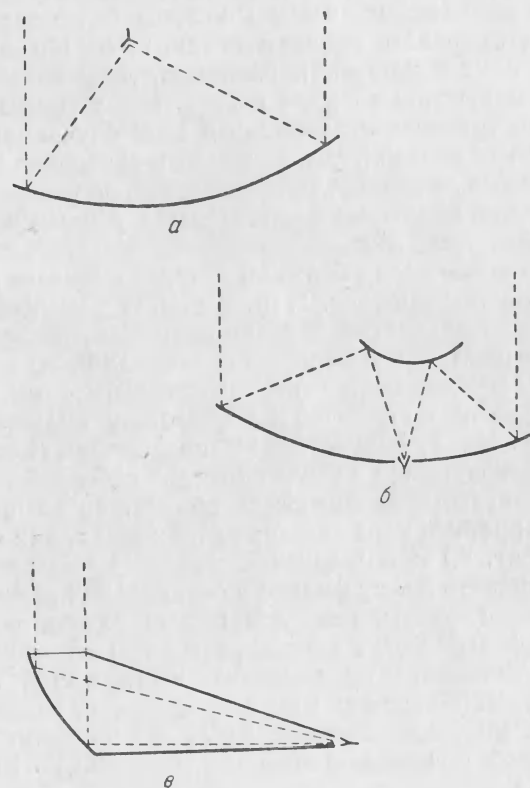
Эффективная шумовая температура антенных устройств зависит от местных источников помех, от диаграммы направленности антенны, от угла подъема лепестков диаграммы, потерь и т. д. Она может меняться от величин, меньших 20° К, для очень сложных антенн до 250° К — для более простых антенн. Эффективная шумовая температура всей системы может быть найдена как сумма эффективных шумовых температур отдельных компонент системы.

5. Типы антенных устройств

Для построения антенных устройств больших размеров используются три основные системы, приведенные на фиг. 1.

На фиг. 1, *a* показан наиболее простой тип, в котором облучатель в форме рупора (или другого вида) устанавливается в фокусе параболического отражателя. Максимальное усиление такой антенны может быть получено при определенном облучении отражателя рупором. Для получения максимального усиления облучатель располагается обычно за плоскостью раскрыва отражателя. Угол, образуемый краями отражателя у рупора, обычно составляет 120° . В этом случае, однако, получается частичное излучение за края отражателя и земля (или другие предметы)

за отражателем облучается, что приводит к появлению боковых лепестков диаграммы направленности. Когда антенна



Фиг. 1. Типы антенных систем наземных станций, используемых для связи с помощью ИСЗ.
a — Обычный параболический отражатель; *b* — система Кассегрена; *v* — рупорно-параболическая антенна.

используется для приема сигналов через эти боковые лепестки, в систему будет попадать дополнительный шум как от помех, воспринимаемых боковыми лепестками, так и от тепловых шумов. Например, если на поверхность Земли падает 15% общей мощности, из которых 60% поглощаются, то в нагрузке (в земле) поглощается 9% общей мощности

при температуре 290° К . Из теоремы обратимости следует, что эффективная шумовая температура системы увеличивается на $0,09 \cdot 290^\circ \text{ К}$, т. е. на 26° К . Поэтому с точки зрения качества всей системы часто считается более целесообразным конструировать отражатель так, чтобы облучатель находился либо в плоскости раскрыва, либо за ней; таким образом излучения за края отражателя уменьшаются, но не вся поверхность отражателя в этом случае облучается оптимальным образом. Это приводит к снижению как величины боковых лепестков, так и усиления, но усиление в этом случае падает медленнее по сравнению с уменьшением уровня боковых лепестков.

В настоящее время большой интерес вызывает антенная система Кассегрена (фиг. 1, б). В этой системе формы двух отражающих поверхностей взаимозависимы, т. е. если главный (большой) отражатель параболический, то малый отражатель должен быть гиперболическим. Одним из преимуществ этого типа антенных устройств является малое расстояние между облучателем и приемником. (Когда облучатель располагается в фокусе отдельного параболического отражателя, то длина фидера от облучателя до приемника равна по крайней мере диаметру отражателя, как это показано на фиг. 2.) Использование системы Кассегрена позволяет уменьшить длину фидера до нескольких десятков или даже единиц дециметров. Это весьма важно, поскольку потери в фидере могут дать эффективную шумовую температуру, составляющую заметную часть общей шумовой температуры. (Например, если затухание фидера равно 1 дБ , то потеря мощности составит 21% , что приводит к росту эффективной шумовой температуры на $0,21 \cdot 290^\circ \text{ К} = 61^\circ \text{ К}$.)

С точки зрения минимальных шумов наиболее перспективной считается рупорно-параболическая антенна, показанная на фиг. 1, в. Модели антенн такого типа были разработаны и изготовлены в лабораториях фирмы «Белл телефон». По мнению специалистов этой фирмы, эффективная шумовая температура антенн такого типа может быть порядка 20° К . Недостатками таких антенн являются трудности управления их положением и большая ее длина. С точки зрения отношения сигнал/шум всей системы может быть целесообразно, однако, использование такой антенны



Фиг. 2. Обычная управляемая параболическая антенна (видна волноводная система).

со сравнительно небольшим раскрытием и усилением, но зато с низкой температурой шумов вместо антенны с большим усилением и раскрытием и с большими шумами. Мнения по поводу оптимальной конструкции резко расходятся, и этот вопрос в настоящее время тщательно изучается.

6. Усиление антенны и ширина основного лепестка диаграммы направленности

Отражатель антенного устройства предназначается для увеличения усиления антенны в заданном направлении (по сравнению со всенаправленной антенной). При этом, конечно, уменьшается и ширина основного лепестка диаграммы направленности антенны. Наибольшее влияние здесь оказывает диаметр отражателя, измеренный в длинах волн. Например, коэффициент усиления и ширина основного лепестка будут

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2},$$

$$\theta = 75 \frac{\lambda}{d},$$

где A , λ и d имеют одинаковую размерность, угол θ выражен в градусах по точкам половинной мощности, G — коэффициент усиления по мощности.

Приведенные формулы являются несколько упрощенными и поэтому приближенными. Очень часто усиление получается равным примерно 50% от рассчитанного по этой формуле в связи с неравномерностью облучения отражателя, хотя некоторые типы антенных устройств дают усиление, достигающее 85% от теоретического значения.

При построении управляемых антенных устройств с высокими коэффициентами усиления возникает много трудностей. Во-первых, с увеличением размеров антенны усложняется и механизм привода, который должен поворачивать отражатель с заданной точностью. Площадь отражателя изменяется пропорционально квадрату его линейных размеров, а от площади зависит ветровая нагрузка устройства. Следовательно, опрокидывающий момент приблизительно пропорционален кубу линейных размеров; вес устройства

также приблизительно пропорционален третьей степени линейных размеров.

Далее, чем больше размеры отражателя, тем при заданной частоте меньше ширина основного лепестка диаграммы направленности. Чем меньше ширина основного лепестка, тем больше требуемая точность ориентации антенны. Если момент, создаваемый ветровой нагрузкой, пропорционален кубу линейных размеров, а ширина основного лепестка обратно пропорциональна линейным размерам, то жесткость привода, определяемая как восстанавливающий момент на единицу угловой ошибки, должна изменяться пропорционально четвертой степени линейных размеров.

Степень приближения к оптимальным характеристикам антенны во многом зависит от точности изготовления поверхности отражателя. Допуск здесь может быть примерно $1/16$ длины волны, что на частоте 6000 Мгц составляет величину порядка 3 мм. Сохранение формы поверхности отражателей больших размеров, вращаемых при ветровых нагрузках или даже с учетом только их собственного веса, с указанной точностью, является серьезной проблемой. Особенно трудно обеспечить необходимую точность размеров антенного устройства, когда диаметр отражателя превосходит 600 длин волн.

Приведенные выше соображения основывались на определении ширины основного лепестка диаграммы направленности по точкам, соответствующим половинной мощности, но в некоторых случаях снижение мощности на 3 дб может быть неприемлемо. Более точным управлением положения антенны возможно уменьшить потери до 1 дб. Ширина основного лепестка по точкам, соответствующим уменьшению мощности на 1 дб, равна примерно половине ширины основного лепестка, определенного по точкам, соответствующим половинной мощности; необходимая точность направления антенны также возрастает вдвое.

Для иллюстрации рассмотрим практический случай отражателя диаметром 18 м, предназначенного для работы на частоте 6000 Мгц. Ширина основного лепестка такой антенны по точкам 3 дб равна 12', что приводит к необходимой точности установки направления (с учетом всех нагрузок, включая ветровые) не хуже 3' (при потерях мощности, не превышающих 1 дб).

7. Управление антеннами

Обычно применяются антенны, построенные по принципу иллюстрируемому фиг. 1, *а*; преимущества антенн, изображенных на фиг. 1, *б* и *в*, сильно сказываются при приеме весьма слабых сигналов. В условиях обычной связи передатчик и приемник располагаются в двух неподвижных точках, и в общем случае направление антенны не нуждается в какой-либо корректировке после первоначальной юстировки антенн. Очевидно, однако, что использование ИСЗ приводит к необходимости точного управления движением основного лепестка, причем точность этого управления в большой степени определяется шириной основного лепестка диаграммы направленности.

В радиолокационных системах также необходимо иметь возможность вращать антенное устройство больших размеров, но обычно это вращение производится с постоянной скоростью. В радиолокационных станциях управления огнем, однако, применяются антенные устройства, задачей которых является поиск и сопровождение цели; методика реализации таких требований хорошо известна для антенных устройств небольших размеров. Таким образом, проблема заключается в применении известной методики управления малыми жесткими антеннами к случаю управления большими тяжелыми и, вероятно, менее устойчивыми антеннами.

Полезно рассмотреть этот вопрос количественно. Мы вправе принять, что движение ИСЗ относительно антенного устройства происходит с угловой скоростью 2° в минуту. Для осуществления связи с ИСЗ антенна обычно монтируется на двухосевой поворотной площадке (одна ось вертикальна, вторая горизонтальна). Отражатель должен будет двигаться с незначительной скоростью, за исключением случая параллельности одной из осей — оси орбиты ИСЗ. Например, если орбита составляет с вертикальной осью угол, допустим в 5° , то азимутальное движение будет весьма медленным во время приближения ИСЗ к зениту, после чего направление антенны должно будет измениться очень быстро почти на 180° . Системы таких поворотных устройств хорошо известны и испытаны, однако рассмотренное выше требование быстрой переборки направления мо-

жет привести к необходимости использования других систем. Например, поворотное устройство с двумя горизонтальными взаимно-перпендикулярными осями может обеспечить сопровождение вблизи зенита без особых трудностей; при этом, однако, потребуются большие скорости и ускорения при сопровождении ИСЗ, находящегося вблизи горизонта. Можно применить также систему с тремя взаимно-перпендикулярными осями.

По крайней мере одна система такого типа уже изготовлена. При этом все же остается нерешенной проблема высоких скоростей и ускорений. Практической задачей при построении таких систем является компромиссное решение, а именно задается скорость углового движения 3° в секунду и ускорение $3^\circ/\text{сек}^2$; при этом, однако, получаются значительные мертвые зоны, в которых антенна не может сопровождать ИСЗ.

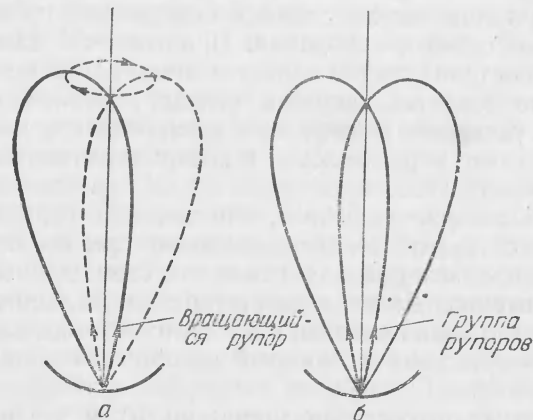
Выше говорилось о том, что точность сопровождения должна составлять $3'$. Это возможно при исключительно высокой точности привода и точности съема данных о положении антенны. Далее, если статор азимутального датчика может легко быть привязан к земле, то этого нельзя сказать о датчике угла места, который расположен вблизи цапфы подшипника.

В случае отражателя диаметром 18 м эти подшипники могут располагаться на высоте порядка 12 м над землей и на статор будут воздействовать все люфты, качания и искажения сложной механической системы. Поэтому необходимо найти способ привязки статора к земле. Усадка самой почвы может достигать $3'$ в год и необходимо будет производить периодическую проверку положения антенны с помощью клинометра.

Точность датчиков для получения сопровождения с точностью в $3'$ должна быть на порядок выше. Такую точность невозможно получить при непрерывном съеме данных и поэтому предпочтительно применение цифровой системы. В настоящее время имеются 18-разрядные системы с разрешающей способностью в 3 сек с фотоэлектрическими датчиками. Жесткость самой механической конструкции должна быть еще выше как для обеспечения малой разницы между положением антенны и показанием датчика, так и для хорошей работы сервопривода.

8. Автоматическое сопровождение и управление положением антенны

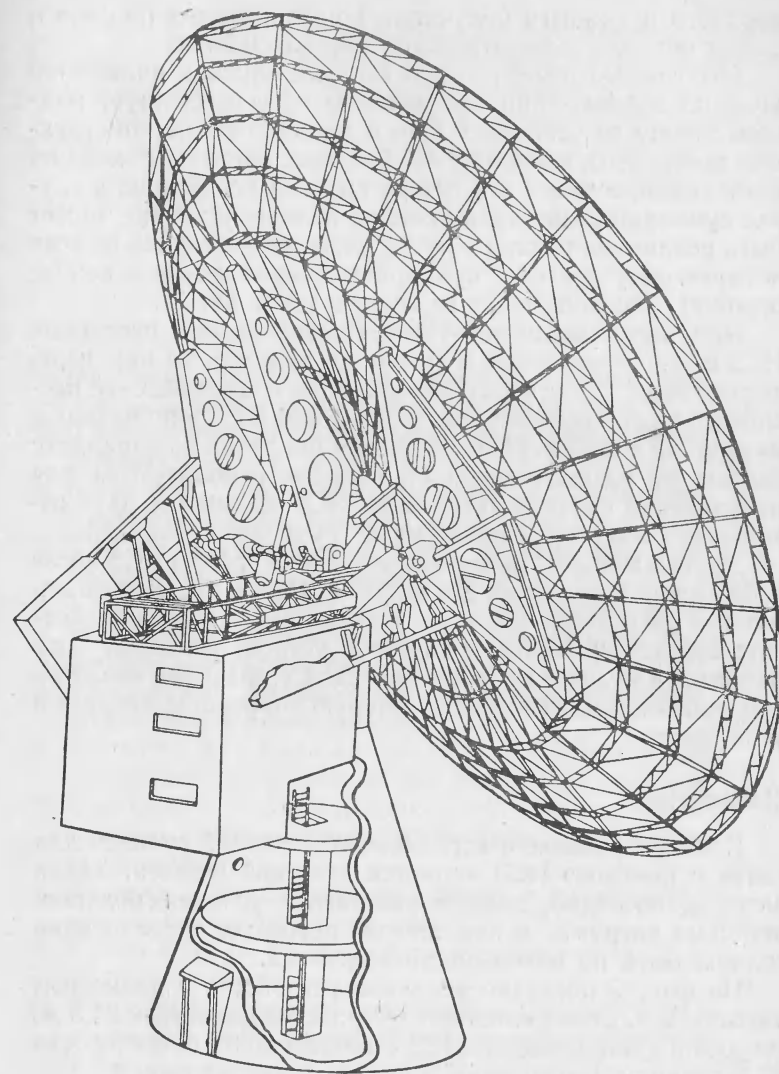
Метод получения и ввода угловой информации в сервопривод в большой степени зависит от того, ведется ли работа с пассивным или активным ИСЗ. В случае активного ИСЗ может быть применен один из методов, разработанных, например, для радиолокационных систем управления огнем. В наиболее известном методе, носящем название кониче-



Фиг. 3. Различные методы автоматического сопровождения.

a — вращающийся облучатель; *b* — набор облучателей.

ского сканирования, облучатель помещается несколько в стороне от фокуса отражателя и вращается вокруг оси последнего. В другом варианте применяется неподвижный облучатель с вращающейся перед ним немного смещенной электрической линзой. Постоянство амплитуды сигнала указывает на правильность положения; если ИСЗ находится не в центре, то будет иметь место модуляция, фаза которой, по сравнению с положением облучателя, указывает на угол между направлением на ИСЗ и осью антенны. При другом методе, называемом суммарно-разностным или моноимпульсным, применяются четыре облучателя, расположенных симметрично вокруг фокуса. Сигналы правого и левого или



Фиг. 4. Эскиз антенны диаметром 25,5 м для связи с помощью ИСЗ.

верхнего и нижнего облучателей сравниваются по фазе и таким образом вырабатывается сигнал ошибки.

Необходимо отметить, что в обоих случаях положение ИСЗ на продолжении оси антенны не соответствует максимальному ее усилению. Оно в зависимости от конструкции может быть ниже на 3 дБ. В случае системы с коническим сканированием эта потеря сигнала неизбежна, в случае суммарно-разностной системы полное усиление может быть реализовано только путем сложения сигналов от всех четырех облучателей в суммарном канале (но не в канале ошибки). Это положение иллюстрируется фиг. 3.

Для целей автоматического сопровождения пассивные ИСЗ можно превращать в активные, помещая на них передатчик-маяк. Другим путем является сопровождение пассивного ИСЗ с помощью расположенной в стороне радиолокационной станции. После внесения поправки на параллакс данные от радиолокационной станции используются для направления связной антенны на ИСЗ. Стоимость двух отдельных установок, однако, может быть очень большой.

Другим методом является вычисление орбиты ИСЗ после наблюдения нескольких его витков и запись параметров орбиты на магнитную ленту. По этим данным с помощью соответствующей аппаратуры антенное устройство может быть нацелено в нужном направлении. Для устранения неизбежных ошибок можно ввести некоторую коррекцию азимута и угла места.

Заключение

Конструирование и изготовление антенной системы для связи с помощью ИСЗ является нелегкой задачей. Такая антенна, очевидно, должна работать в условиях больших ветровых нагрузок и при плохой погоде; ее эксплуатация должна быть по возможности облегчена.

На фиг. 2 показано реальное устройство с диаметром антенны 9 м. Эскиз антенного устройства диаметром 25,5 м, способного сопровождать ИСЗ с точностью 3', при скорости 3° в секунду и ускорении 3°/сек² показан на фиг. 4.

СОДЕРЖАНИЕ

Вступительная статья редактора перевода. Системы связи с использованием искусственных спутников Земли	5
1. Джоллифф С., Райт У. Линии связи с помощью искусственных спутников Земли	17
2. Пирс Дж. Некоторые практические проблемы связи с помощью искусственных спутников Земли	43
3. Пардо Г. Техника и экономика системы связи с помощью искусственных спутников Земли	55
4. Хилтон У. Системы связи с использованием искусственных спутников Земли для обслуживания стран Британского содружества наций	72
5. Хэвиленд Р. Использование стационарных искусственных спутников Земли для связи	94
6. Мюллер Г., Хебенштрейт В., Шпенглер Э. Искусственные спутники Земли, применяемые для связи	115
7. Сандеман Е. Системы связи с использованием искусственных спутников Земли, обеспечивающие разделение групп каналов	182
8. Брэдли Дж. Система кодирования и декодирования при импульсно-кодовой модуляции	248
9. Зиглин П., Сенн Дж. Искусственный спутник Земли «Курьер»	259
10. Годд Дж. Антенные устройства наземных станций в системах связи с помощью искусственных спутников Земли	280

**СИСТЕМЫ СВЯЗИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ
ЗЕМЛИ**

Редактор *Д. Коровяков*
Художник *Б. Фомин*
Художественный редактор *Н. Зотова*
Технический редактор *Л. Кондюкова*
Корректор *В. Киселева*

Сдано в производство 19/V 1964 г.
Подписано к печати 15/IX 1964 г.
Бумага 84×108/32 = 4,63 бум. л.
9,25 печ. л.

Уч.-изд. л. 13,9. Изд. № 20/2136
Цена 1 р. 12 к. Зак. 232

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Московская тип. № 4 «Главполиграф-
прома» Государственного комитета
Совета Министров СССР по печати
Б. Переяславская, 46.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

*готовит к изданию в 1965 г.
книги по радиоэлектронике*

Миниатюризация и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Лондон, 1961, перевод с английского, изд-во «Мир», 25 изд. л., тираж 16 тыс. экз., цена 2 р. 10 к. (1 кв.).

В книге рассматриваются методы и приемы миниатюризации схем и деталей, а также образцы миниатюрных конструкций электронного оборудования. Описываются три основные системы микроминиатюризации: микромодули или собранные из миниатюрных деталей отдельные узлы; микросхемы пленочные или полученные вакуумным осаждением; твердые схемы или узлы, образованные на монокристаллической полупроводниковой плате. Рассматриваются также вопросы перспективного развития разных направлений микроминиатюризации, проблемы, связанные с производством микроэлементов, с их эксплуатацией и надежностью действия.

Книга может служить справочным пособием как для инженеров, только что приступивших к подобного рода работам, так и для специалистов, имеющих уже опыт в этой области техники, а также для широкого круга инженеров и экономистов, занятых планированием и организацией производства в электронной промышленности, в машино- и аппарато-строении.

Полупроводниковые фотоприемники и преобразователи излучения. Перевод с английского, французского, немецкого, изд-во «Мир», 28 изд. л., тираж 10 тыс. экз., цена 2 р. 20 к. (1 кв.).

Применение фотоэлектрических полупроводниковых устройств имеет большое значение для дальнейшего совершенствования контрольно-измерительной аппаратуры, счетно-решающих устройств, системы автоматки, телемеханики и дальней связи.

В собранных в книге статьях освещаются физические процессы, происходящие в полупроводниковых приборах указанно-

го типа, описываются новые разработки, их параметры и характеристики, обсуждаются различные практические применения этих устройств.

Ценность книге придает приложенная к ней обширная библиография зарубежных и отечественных работ по указанной теме.

Книга предназначена для широкого круга научных работников и инженеров, занимающихся разработкой фотоэлектрических полупроводниковых приборов и их применением в системах автоматки, телемеханики и связи, а также для преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов радиотехнических учебных заведений.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

На готовящиеся к изданию книги магазины Книготорга принимают предварительные заказы. Заполнив в магазине почтовую открытку, вы получите извещение о поступлении интересующей вас книги в продажу.

Предварительный заказ гарантирует приобретение нужной вам книги и помогает в правильном установлении ее тиража.