

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

Кузнецов В. И. Система автономного определения орбит космических аппаратов спутниковых радионавигационных систем.....	3
Соколов Б. В., Зайчик Е. М., Охтилев М. Ю., Тарасов О. М. Комбинированные модели и алгоритмы многокритериального выбора структуры технической системы .....	10
Баглюк С. С. Модель процесса передачи данных между прикладными уровнями распределенной вычислительной системы .....	15
Гаценко О. Ю., Максимов С. В. Модель многошагового процесса подавления несанкционированных воздействий на информационные системы.....	22
Извозчикова В. В., Матвейкин И. В., Гатчин И. Ю., Нестерова Н. А., Тронников И. Б., Семенов В. А. Концептуальная модель управления предприятием .....	26

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Левский М. В. Оптимальное управление ориентацией космического аппарата.....	30
Крашенинников Б. А. Активное оптимальное демпфирование колебаний кузова автомобиля .....	36

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Зиятдинов С. И., Гирин Н. В. Анализ ошибок при тригонометрической интерполяции.....	42
Мельников Ю. П., Попов С. В. Комбинаторное объединение и кодирование номеров каналов в анализаторах импульсных радиосигналов.....	45

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Зверев В. А., Романова Г. Э. Оптическая схема телескопа с диаметром главного зеркала 10 м.....	49
Бычков А. Н. О влиянии частотно-контрастной характеристики объектива и спектрального состава источника излучения на разрешающую способность телевизионного датчика .....	52
Рахимов Н. Р., Серьезнов А. Н., Шамирзаев С. Х. Технология изготовления координатно-чувствительного приемника оптического излучения на основе АФН-пленок.....	56
Пикуль О. Ю., Строганов В. И., Карпец Ю. М. Коноскопические картины в оптически активных кристаллических пластинах.....	61
Макаренко А. А., Турнецкий Л. С. Коррекция проективных искажений изображений при мало-высотной оптико-электронной аэросъемке.....	64
Горбунова Е. В., Коротаев В. В., Тимофеев А. Н., Левитин А. И., Чертов А. Н. Возможности применения матричных приемников с зарядовой связью в фотометрическом канале рентгенолюминесцентного сепаратора алмазосодержащего сырья .....	71

РЕФЕРАТЫ.....	74
---------------	----

# CONTENTS

## INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

<b>Kuznetsov V. I.</b> System of Autonomous Definition of Space Vehicles Orbits of Satellite Radio Navigational Systems.....	3
<b>Sokolov B. V., Zaichik E. M., Okhtilev M. Yu., Tarasov O. M.</b> Combined Models and Algorithms of Multicriterion Choice of Structure of a Technical System .....	10
<b>Baglyuk S. S.</b> Model of Data Transferring Process Between Application Layers of the Distributed Computing System .....	15
<b>Gatsenko O. Yu., Maksimov S. V.</b> Model of Multistage Process of Suppression of Unauthorized Access to Information Systems.....	22
<b>Izvozchikova V. V., Matveikin I. V., Gatchin I. Yu., Nesterova N. A., Tronnikov I. B., Semenov V. A.</b> Conceptual Model of Operation of Business.....	26

## DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

<b>Levskii M. V.</b> Optimum Control of a Spacecraft Orientation .....	30
<b>Krasheninnikov B. A.</b> Active Optimal Damping of Car's Body .....	36

## ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

<b>Ziatdinov S. I., Girin N. V.</b> The Resolution of Trigonometrical Interpolation Mistakes.....	42
<b>Melnikov Yu. P., Popov S. V.</b> Combinatory Association and Coding of Numbers Channels in Analysers of Pulse Radio Signals.....	45

## OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

<b>Zverev V. A., Romanova G. E.</b> Optical Scheme of a Telescope with Primary Mirror of Diameter 10 m .....	49
<b>Bychkov A. N.</b> About Influence of the Frequent-Contrast Characteristic of an Objective and Spectral Content of a Stimulus Source on Resolution of the Television Sensor .....	52
<b>Rakhimov N. R., Serieznov A. N., Shamirzaev S. Kh.</b> The Technology of Manufacturing of the Coordinate-Sensing Receiver of Optical Radiation on the Basis of AFN-Films .....	56
<b>Picoul O. Yu., Stroganov V. I., Karpets Yu. M.</b> Conoscopic Pictures in Optically Active Crystalline Slices. ....	61
<b>Makarenko A. A., Turnetsky L. S.</b> Correction of Projective Distortions of the Maps at Low-Level Opto-Electronic Aerophotography .....	64
<b>Gorbunova E. V., Korotaev V. V., Timofeev A. N., Levitin A. I., Chertov A. N.</b> Possibility of Application Ofmatrix Charge-Coupled Device in Photometric Channel of X-Ray Separator Diamond-Containing Raw Material .....	71

ABSTRACTS .....	74
-----------------	----

*Editor-in-Chief L. F. Porfiriev*

В. И. КУЗНЕЦОВ

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского  
Санкт-Петербург*

## СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Описывается моделирующая программа, анализирующая возможность создания системы автономного определения орбит космических навигационных систем. Такая объединенная система обеспечивает автономность функционирования космических аппаратов и создает единое по точности эфемерид навигационное поле. Приводятся результаты экспериментов.

**Введение.** В настоящее время в ближнем космосе созданы две отечественные спутниковые радионавигационные системы (СРНС): низкоорбитная (высота около 1000 км) система „Цикада“ и среднеорбитная (высота около 19 100 км) система „ГЛОНАСС“. Одним из направлений обеспечения автономности функционирования космических аппаратов (КА-потребителей) признано их самоопределение по сигналам КА системы „ГЛОНАСС“. Использование системы „Цикада“ в этом ракурсе не рассматривается. Точность эфемеридной информации, выдаваемой аппаратами этих систем, существенно различается.

В связи с этим представляется актуальным обеспечение автономности функционирования КА системы „ГЛОНАСС“, во-первых, по эфемеридному каналу и, во-вторых, путем доведения точности самоопределения КА низкоорбитной системы до уровня точности среднеорбитной. Эти задачи можно решить, создав систему автономного определения орбит КА обеих систем. В результате формируется единое по точности эфемерид навигационное поле обеих систем [1] и появляется дополнительная возможность использования космических аппаратов низкоорбитной системы для определения траекторий ракет-носителей и КА на промежуточных или низких орбитах.

Методологической основой объединенной системы является идея взаимной навигации КА. С технической точки зрения она может быть осуществлена при дополнительном оборудовании КА<sub>1</sub> (аппарат низкоорбитной системы) средствами, позволяющими измерять углы „КА<sub>2</sub> — звезда“, и при установке на КА<sub>1</sub> радиотехнического комплекса, идентичного комплексу КА<sub>2</sub> (аппарат среднеорбитной системы). Кроме того, КА<sub>1</sub> должен иметь быстродействующий вычислительный комплекс и систему связи „КА<sub>1</sub> — КА<sub>2</sub>“.

Описанию объединенной системы и моделирующей программы, созданной для анализа возможности функционирования этой системы, и посвящена настоящая статья.

**Описание системы.** Объединенная система предполагает наличие любого числа аппаратов в СРНС. Известно, что низкоорбитная СРНС может состоять максимально из шести

КА, расположенных по одному на каждой из орбит, пространственные положения плоскостей которых различаются по прямому восхождению восходящих узлов на  $60^\circ$  (модельные номера аппаратов — от 1 до 6; номер 1 имеет КА, орбита которого характеризуется минимальным значением восходящего узла).

Среднеорбитная система строится в трех плоскостях, отличающихся по прямым восхождениям восходящих узлов на  $120^\circ$ . В каждой плоскости может быть размещено до восьми КА, отстоящих друг от друга по широте в орбите на  $45^\circ$ . Плоскости среднеорбитных КА в модели имеют нумерацию 1, 2, 3, начиная с плоскости с наименьшим прямым восхождением восходящего узла. Аппаратам первой плоскости присваиваются номера 11—18, начиная с минимальной широты в орбите. КА второй и третьей плоскостей имеют номера соответственно 21—28 и 31—38.

При полностью развернутых системах каждый низкоорбитный аппарат должен определять свою орбиту и орбиту четырех среднеорбитных аппаратов: для этого он должен на мерном интервале в течение времени между навигационными сеансами собрать измерительную информацию, переключаясь с заданным темпом на наблюдение каждого из четырех выбранных среднеорбитных аппаратов.

**Описание модели.** В разработанной модели задача объединенной системы решается в два этапа, названных этапами модельных и рабочих решений, которые осуществляются на мерном интервале длительностью  $T$  в течение одного витка КА<sub>2</sub>.

*Первый этап* (модельное решение) — поиск оптимальных пар КА, осуществляемый на основе перебора пар по принципу „каждый с каждым“, решения навигационной задачи для каждой пары и расчет относительных оценок орбит в зависимости от степени приближения точности взаимной навигации пары КА (качество пары) к установленной в техническом задании (ТЗ) на систему „ГЛОНАСС“.

Оценка качества пары рассчитывается для каждой из трех осей текущей орбитальной системы координат ( $STW$ ) по формуле

$$q_i = \frac{3\sigma_3 - \Delta q_i}{\sigma_3}, \quad i=1, 2, 3,$$

где  $\sigma_3$  — среднеквадратическая погрешность оценки  $i$ -й координаты орбиты КА<sub>2</sub>, установленная в техническом задании;  $\Delta q_i$  — модуль предельной погрешности оценки орбиты КА<sub>2</sub> в данной паре.

Общая оценка качества пары  $q$  рассчитывается усреднением  $q_i$  по трем осям при  $q_i \geq 0$  (т.е. в пределах ТЗ), либо принимается  $q < 0$ , если оценка радиус-вектора орбиты  $q_1 < 0$ .

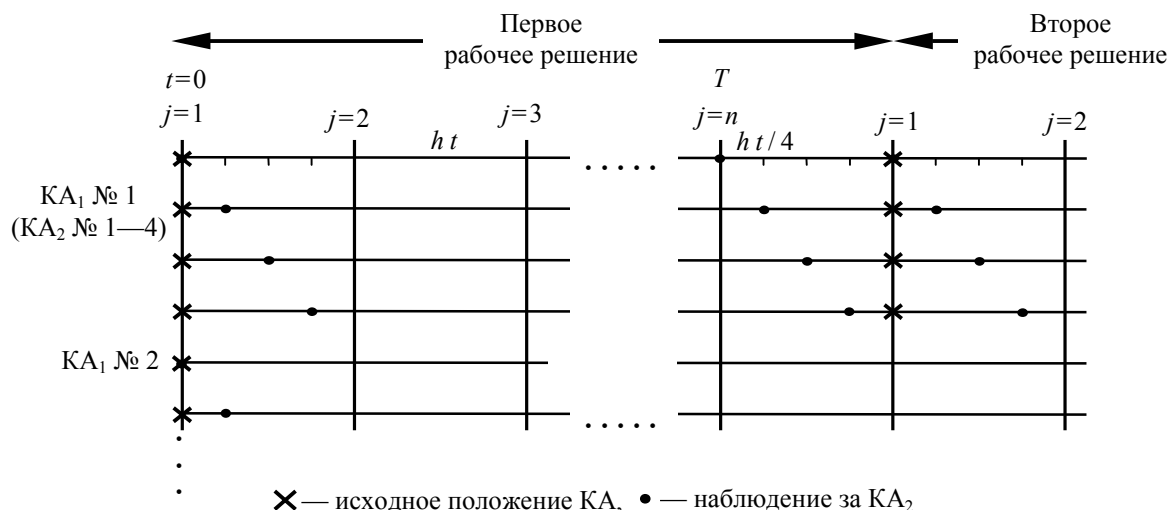
Как показали результаты моделирования, высокие оценки качества определенных таким образом оптимальных пар КА сохраняются на протяжении десятков рабочих решений, вплоть до нескольких недель или даже месяцев.

На основе анализа качества пар для каждого низкоорбитного КА выбираются четыре КА среднеорбитной системы. Порядок пар определяется ранжированием по значению оценки качества, начиная с наибольшего.

Этап заканчивается демонстрацией таблиц модельного решения с информацией о погрешностях оценок орбит и оценках качества пар, а также сформированной на их основе таблицы выбранных пар.

*Второй этап* состоит из последовательности рабочих решений, каждое из которых является набором решений навигационных задач для выбранных на первом этапе пар КА, начиная с пары, в которой КА<sub>1</sub> имеет наименьший номер, а КА<sub>2</sub> — лучшую оценку качества. Схема, иллюстрирующая динамику рабочих решений, представлена на рисунке, где  $j$  — моменты проведения навигационных сеансов,  $ht$  — шаг проведения навигационных сеансов,  $n$  — заданное число навигационных сеансов на мерном интервале.

В моменты  $j$  осуществляется наблюдение за КА<sub>2</sub> первой пары. С темпом  $ht/4$  КА<sub>1</sub> переключается на наблюдение за КА<sub>2</sub> остальных пар. По окончании мерного интервала ( $j=n$ ) время наблюдения за КА<sub>2</sub> каждой пары различно, и поэтому оно приводится ко времени наблюдения за последней парой плюс  $ht/4$  (время для переориентации на КА<sub>2</sub> первой пары для начала следующего рабочего решения). В соответствии с этой логикой рассчитываются орбиты КА<sub>1</sub> и КА<sub>2</sub>. Поскольку в полном поле возмущений для каждой пары значение  $T$  различно, то в конце каждого рабочего решения время наблюдения за всеми КА<sub>1</sub> (и КА<sub>2</sub>) приводится ко времени последнего наблюдения за КА<sub>2</sub> и пересчитываются орбиты всех КА.



По завершении каждого рабочего решения формируются итоговые таблицы, содержащие рассчитанные эфемериды первого рода (в декартовых координатах в геоцентрической экваториальной инерциальной системе координат), среднеквадратические погрешности этих эфемерид, эфемериды второго рода (альманах), соответствующие состоянию обеих СРНС на момент окончания мерного интервала для соответствующей пары.

Последней в группе итоговых демонстрируется таблица пар КА с указанием номера решения, оценки качества пар в модельном и рабочем решениях.

Завершается второй этап работы программы при возникновении одного из двух событий:

- наличии отрицательного значения текущей оценки качества какой-либо пары КА;
- превышении установленного максимально допустимого изменения взаимного положения аппаратов в паре по разнице прямых восхождений восходящих узлов КА<sub>1</sub> и КА<sub>2</sub> ( $\Delta\Omega$ ) или их аргументов перигеев ( $\Delta\omega$ ).

По завершении второго этапа осуществляются новое модельное решение, затем рабочие решения и т.д.

Предполагается, что в полете первый этап будет выполняться по моделирующей программе, установленной на каждом КА<sub>1</sub> по информации альманахов систем.

Второй этап состоит из выполняемых каждым КА<sub>1</sub> фактических наблюдений за движением „прикрепленного“ КА<sub>2</sub>, измерений навигационных параметров и оценки собственных эфемерид и эфемерид КА<sub>2</sub>, передачи на КА<sub>2</sub> выработанных оценок.

**Примеры функционирования объединенной системы.** Эксперименты проводились для следующих условий. Начальная неопределенность информации обо всех орбитах КА<sub>1</sub> составляла примерно 40 км по положению ( $\Delta R$ ) и 40 м/с по модулю вектора скорости ( $\Delta V$ ), для КА<sub>2</sub> — примерно 1 км и 19 см/с соответственно. Все решения осуществлялись в полном поле сил: для каждого КА<sub>1</sub> учитывалось все гравитационное поле Земли и сопротивление атмосферы, для КА<sub>2</sub> — гармоники 2,0; 4,0 и гравитационное влияние Луны и Солнца, а также

световое давление. Начальная дата решений 31.01.97 г., время 18 ч 00 мин 00 с. Число навигационных сеансов полагалось равным 100.

Состав аппаратов в СРНС, состав измерений и их погрешности, ограничения по  $\Delta\Omega$  и по  $\Delta\omega$  варьировались. Всего проведено более десяти экспериментов. Рассмотрим два из них — для ограниченного и полного состава космической навигационной системы.

*Эксперимент 1.* Предполагается, что в наличии имеются два аппарата низкоорбитальной СРНС (№ 2, 3) и восемь аппаратов среднеорбитальной системы (№ 16, 17, 21, 22, 23, 31, 32 и 36). Измеряются: два угла „КА<sub>2</sub> — звезда“ (в одном оптико-электронном приборе) с погрешностями  $\sigma_\gamma=2''$ ,  $\Delta\gamma=0,5''$ ; дальность до КА<sub>2</sub> с погрешностями  $\sigma_\rho=10$  м,  $\Delta\rho=5$  м; радиальная скорость КА<sub>2</sub> с погрешностями  $\sigma_{\dot{\rho}}=0,1$  см/с,  $\Delta\dot{\rho}=0,01$  см/с,  $\Delta\Omega=\Delta\omega=30^\circ$ .

Первый этап — модельное решение.

Начальные оценки эфемерид КА представлены в табл. 1. Результат оптимизации — в табл. 2.

Таблица 1

Пара КА <sub>1</sub> —КА <sub>2</sub>	Погрешности оценки орбит КА (максимальные значения)										Оценка пары
	КА <sub>1</sub>					КА <sub>2</sub>					
	$\Delta V$ , см/с	$\Delta R$ , м	$\Delta S$ , м	$\Delta T$ , м	$\Delta W$ , м	$\Delta V$ , см/с	$\Delta R$ , м	$\Delta S$ , м	$\Delta T$ , м	$\Delta W$ , м	
2—16	0,51	5,7	0,56	4,9	3,0	0,27	19	5,0	14	14	2,59
2—17	2,7	27	0,57	6,4	26	1,5	94	3,4	37	87	2,32
2—21	2,0	20	0,89	18	11	1,0	63	2,5	14	63	2,63
2—22	2,2	23	0,76	11	21	1,2	82	2,8	73	36	2,07
2—23	1,8	18	0,16	16	9	0,92	59	3,3	13	59	2,61
2—31	2,0	20	0,36	15	13	1,1	63	3,5	53	46	2,22
2—32	3,5	35	0,33	16	32	1,8	120	3,8	22	120	2,39
2—36	2,4	24	0,61	19	16	1,2	81	3,9	22	79	2,45
3—16	1,7	16	0,46	14	9,3	0,9	57	2,7	20	56	2,58
3—17	2,4	24	0,31	14	20	1,3	84	3,0	78	38	2,01
3—21	4,0	40	0,54	8,1	40	2,1	140	4,7	53	130	2,02
3—22	2,2	22	0,44	16	15	1,1	72	3,4	39	62	2,33
3—23	2,7	28	0,63	17	22	1,4	89	5,2	26	87	2,34
3—31	1,8	18	0,22	16	8,2	1,0	60	2,6	55	36	2,26
3—32	1,3	13	0,19	7,8	11	0,76	45	2,5	31	39	2,50
3—36	4,0	40	0,20	37	17	2,1	140	1,4	69	120	2,04

Таблица 2

КА <sub>1</sub>	КА <sub>2</sub> и оценки качества пар			
2	21 (2,63)	23 (2,61)	16 (2,59)	36 (2,45)
3	32 (2,50)	22 (2,33)	31 (2,26)	17 (2,01)

Примечания. Оценка ( $q$ ) по оси:  $3 \geq q \geq 1$  — отлично,  $1 > q \geq 0$  — допустимо,  $q < 0$  — недопустимо.

Общая оценка равна оценке по радиус-вектору, если  $q < 0$ , или усредненной из трех оценок.

Второй этап — 20 рабочих решений.

Оценки орбит КА<sub>1</sub> (эфимериды 1-го рода) и их среднеквадратические погрешности в результате первого рабочего решения представлены в итоговых табл. 3—5. Из табл. 4 видно, что точность определения орбит КА<sub>1</sub> при измерениях по КА<sub>2</sub> в различных парах высока и практически одинакова, что свидетельствует о соответствующем качестве оптимизации. Для КА<sub>2</sub> аналогичные результаты содержатся в табл. 6—8. В качестве итога 1-го рабочего решения имеем таблицу выбранных пар (табл. 9).

Такой же объем информации выдается после каждого рабочего решения.

Таблица 3

Номер КА	Дата, время (ч, мин, с)	Эфемериды 1-го рода КА <sub>1</sub>					
		X, км	Y, км	Z, км	V <sub>x</sub> , км/с	V <sub>y</sub> , км/с	V <sub>z</sub> , км/с
2	01.02.97; 5.14.3,25	-3631,605	-5551,397	3360,003	-1,104189	-3,222717	-6,445097
2	01.02.97; 5.16.1,37	-3725,126	-5849,442	2692,244	-0,7432399	-2,663355	-6,742751
2	01.02.97; 5.17.5,46	-3781,668	-6088,831	1999,959	-0,376368	-2,079846	-6,972636
2	01.02.97; 5.19.3,56	-3800,947	-6269,251	1283,489	0,003636	-1,4723757	-7,134419
3	01.02.97; 5.14.3,25	2990,004	-5918,850	3365,685	2,241300	-2,572516	-6,441965
3	01.02.97; 5.16.1,35	3201,309	-6149,046	2699,316	1,938077	-1,981467	-6,739718
3	01.02.97; 5.17.5,49	3381,428	-6318,948	2004,162	1,614958	-1,369454	-6,971146
3	01.02.97; 5.19.3,61	3527,866	-6426,015	1289,878	1,276348	-0,744855	-7,132966

Таблица 4

Номер КА	Дата, время (ч, мин, с)	Среднеквадратические погрешности эфемерид 1-го рода КА <sub>1</sub>					
		X, м	Y, м	Z, м	V <sub>x</sub> , см/с	V <sub>y</sub> , см/с	V <sub>z</sub> , см/с
2	01.02.97; 5.14.32	12,79	7,343	13,54	1,279	1,254	0,1227
2	01.02.97; 5.16.13	14,57	8,340	14,20	1,358	1,253	0,2153
2	01.02.97; 5.17.54	13,67	7,714	12,33	1,139	1,305	0,2805
2	01.02.97; 5.19.35	12,38	6,629	10,83	1,151	1,216	0,3716
3	01.02.97; 5.14.32	11,31	6,583	12,43	1,200	1,153	0,1078
3	01.02.97; 5.16.13	13,86	7,854	11,87	1,216	1,249	0,1943
3	01.02.97; 5.17.54	10,73	7,337	12,64	1,168	1,132	0,2768
3	01.02.97; 5.19.36	10,42	8,767	15,74	1,250	1,614	0,5567

Таблица 5

Номер КА	Дата, время (ч, мин, с)	Эфемериды 2-го рода (альманах) КА <sub>1</sub>					
		a, км	e	i, ...°	Ω, ...°	ω, ...°	θ, ...°
2	01.02.97; 5.14.32	7373	0,009678	84,10	59,81	0,5651	152,4
2	01.02.97; 5.16.13	7374	0,009496	84,10	59,81	0,6780	158,0
2	01.02.97; 5.17.54	7375	0,009338	84,10	59,81	0,4807	163,8
2	01.02.97; 5.19.35	7376	0,009217	84,10	59,81	0,0152	170,0
3	01.02.97; 5.14.32	7373	0,009722	84,10	119,8	0,5254	152,4
3	01.02.97; 5.16.13	7374	0,009541	84,10	119,8	0,6532	158,0
3	01.02.97; 5.17.54	7375	0,009382	84,10	119,8	0,4744	163,8
3	01.02.97; 5.19.36	7376	0,009262	84,10	119,8	0,0318	169,9

Таблица 6

Номер КА	Дата, время (ч, мин, с)	Эфемериды 1-го рода КА <sub>2</sub>					
		X, км	Y, км	Z, км	V <sub>x</sub> , км/с	V <sub>y</sub> , км/с	V <sub>z</sub> , км/с
16	01.02.97; 5.17.5,46	-17570,845	-8480,785	-16653,329	2,881837	-1,212660	-2,378626
17	01.02.97; 5.19.3,61	1174,240	-11548,073	-22664,163	3,951354	0,100001	0,198172
21	01.02.97; 5.14.3,25	-12614,002	21842,362	17,857	-1,569336	-0,909181	3,559731
22	01.02.97; 5.16.1,35	-15942,922	11124,957	16189,936	0,322029	-3,094121	2,487686
23	01.02.97; 5.16.1,37	-9827,258	-6110,206	22699,914	1,984394	-3,421482	-0,017392
31	01.02.97; 5.17.5,49	-12285,444	-22016,660	735,822	1,634419	-0,794579	3,557864
32	01.02.97; 5.14.3,25	-1918,640	-19552,319	15935,324	2,514079	1,777309	2,527864
36	01.02.97; 5.19.3,56	1190,232	19264,730	-16890,734	-2,494188	-1,935439	-2,338792

Таблица 7

Номер КА	Дата, время (ч, мин, с)	Среднеквадратические погрешности эфемерид 1-го рода КА <sub>2</sub>					
		X, м	Y, м	Z, м	V <sub>x</sub> , см/с	V <sub>y</sub> , см/с	V <sub>z</sub> , см/с
16	01.02.97; 5.17.54	32,62	46,94	31,87	0,4656	0,7469	0,5048
17	01.02.97; 5.19.36	34,23	52,26	27,05	0,0342	0,7359	0,5906
21	01.02.97; 5.14.32	44,02	25,40	37,57	0,5972	0,6892	0,3385
22	01.02.97; 5.16.13	40,46	39,49	31,41	0,7016	0,4458	0,5293
23	01.02.97; 5.16.13	42,93	42,00	23,36	0,7720	0,4485	0,6022
31	01.02.97; 5.17.54	38,2	21,58	34,01	0,5646	0,5732	0,3105
32	01.02.97; 5.14.32	41,67	25,18	29,31	0,5380	0,5331	0,4356
36	01.02.97; 5.19.35	43,71	27,27	30,75	0,5418	0,5535	0,4876

Таблица 8

Номер КА	Дата, время (ч, мин, с)	Эфемериды 2-го рода (альманах) КА <sub>2</sub>					
		a, км	e	i, ...°	Ω, ...°	ω, ...°	θ, ...°
16	01.02.97; 5.17.54	2548	0,01001	63	360	0,02124	-133,20
17	01.02.97; 5.19.36	2548	0,01000	63	-0,01407	-0,004942	-87,35
21	01.02.97; 5.14.32	2548	0,01001	63	120	360	0,04918
22	01.02.97; 5.16.13	2548	0,01001	63	120	-0,01596	45,92
23	01.02.97; 5.16.13	2548	0,01001	63	120	360	90,86
31	01.02.97; 5.17.54	2548	0,01001	63	-120	0,01869	1,858
32	01.02.97; 5.17.32	2548	0,01001	63	-120	-0,003773	44,99
36	01.02.97; 5.19.35	2548	0,01001	63	240	0,04072	-132,40

Таблица 9

КА <sub>1</sub>	КА <sub>2</sub>	Оценка качества пары		КА <sub>2</sub>	Оценка качества пары	
		начальная	текущая		начальная	текущая
2	21	2,63	2,63	23	2,61	2,25
3	32	2,50	2,50	22	2,33	2,41
2	16	2,59	2,49	36	2,45	2,06
3	31	2,26	2,69	17	2,01	2,68

Таблица 10

КА <sub>1</sub>	КА <sub>2</sub>	Оценка качества пары		КА <sub>2</sub>	Оценка качества пары	
		начальная	текущая		начальная	текущая
2	21	2,63	2,87	23	2,61	2,71
3	32	2,50	2,54	22	2,33	1,79
2	16	2,59	2,37	36	2,45	1,73
3	31	2,26	2,58	17	2,01	2,32

Итог 20-го рабочего решения представлен в табл. 10. Видно, что и оно не содержит отрицательной оценки качества, но вследствие изменившегося взаимного положения аппаратов в паре необходимо перейти к новому модельному решению от 10.02.97 г., время 5 ч 5 мин 26,742 с, которое определяет новые оптимальные пары: 2—23, 2—16, 2—31, 2—17 (+2,42) и 3—32, 3—36, 3—21, 3—22 (+2,09). В скобках указаны наихудшие оценки качества. По этим парам можно было провести 14 рабочих решений до 16.02.97 г. На этом эксперимент был остановлен.



*Эксперимент 2.* В ходе эксперимента были задействованы все аппараты обеих СРНС при тех же погрешностях измерений, но  $\Delta\Omega = \Delta\omega = 10^\circ$ .

Первое модельное решение определило следующие пары:

1—32, 1—35, 1—38, 1—25 (+2,63);  
 2—14, 2—15, 2—21, 2—26 (+2,61);  
 3—13, 3—33, 3—18, 3—16 (+2,61);  
 4—28, 4—31, 4—12, 4—37 (+2,51);  
 5—23, 5—27, 5—11, 5—22 (+2,63);  
 6—24, 6—34, 6—36, 6—17 (+2,42).

Эти пары обеспечили проведение восьми рабочих решений, окончившихся при положительных оценках качества всех пар 04.02.97 г. в 12 ч 48 мин 43,818 с.

Повторное модельное решение на этот момент времени дало следующие пары:

1—34, 1—24, 1—26, 1—31 (+2,60);  
 2—27, 2—13, 2—21, 2—16 (+2,63);  
 3—15, 3—35, 3—12, 3—28 (+2,53);  
 4—23, 4—33, 4—37, 4—36 (+2,53);  
 5—18, 5—17, 5—25, 5—22 (+2,37);  
 6—11, 6—14, 6—32, 6—38 (+2,26).

Эти пары обеспечили проведение пяти рабочих решений, окончившихся 06.02.97 г. в 21 ч 35 мин 33,502 с также при всех положительных оценках качества пар. На этом эксперимент был прекращен.

В остальных восьми экспериментах варьировались другие переменные задачи.

**Выводы.** Результаты моделирования показывают, что при организации объединенной системы КА-потребитель будет получать эфемериды СРНС не хуже заданных в системе „ГЛОНАСС“. Обе СРНС приобретают автономность по каналам эфемерид, и точность эфемерид низкоорбитной системы становится равной точности среднеорбитной.

Подчеркнем, что описанная моделирующая программа предусматривает безусловную оптическую видимость КА<sub>2</sub> с борта КА<sub>1</sub>, что, очевидно, не всегда возможно в действительности.

В работах [1, 2] описаны программы и результаты моделирования метода взаимной автономной навигации по алгоритмам, поддерживающим определение орбит обоих аппаратов с высокой точностью и при оптической невидимости КА<sub>2</sub>. При использовании этих алгоритмов возможность построения объединенной системы становится еще более обоснованной.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Автоматизированная система исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов: Учеб. пособие. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2006. 322 с.
2. Моделирование метода взаимной автономной навигации космических аппаратов: новые результаты / В. И. Кузнецов, Т. В. Данилова // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 10. С. 20—27.

Рекомендована  
научно-вычислительным отделом ВКА

Поступила в редакцию  
26.04.07 г.

Б. В. СОКОЛОВ, Е. М. ЗАЙЧИК, М. Ю. ОХТИЛЕВ

*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН*

О. М. ТАРАСОВ

*Военная академия связи  
Санкт-Петербург*

## КОМБИНИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА СТРУКТУРЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается оригинальный подход к решению задачи многокритериального выбора структуры сложной технической системы. Разработан прототип программного обеспечения, реализующего предложенное модельно-алгоритмическое обеспечение. Приводятся результаты решения задачи.

**Введение.** В современной системотехнике одним из основных объектов исследования являются сложные технические системы (СТС), в состав которых входят следующие основные виды структур [1]: техническая, топологическая, информационного обеспечения, технологическая, программно-математического обеспечения, организационная. Основная цель исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, заключается в разработке модельно-алгоритмического обеспечения решения задач многокритериального упорядочения и выбора наиболее предпочтительной структуры СТС. Предлагаемый подход к решению данного класса задач может найти широкое применение на практике при исследовании проблем структурно-функционального синтеза СТС [2, 3].

**Постановка и алгоритм решения задачи.** При исследовании структур СТС будем использовать их полимодельное описание, включающее в себя как статические, так и динамические модели. Пусть множество элементов, используемых для построения статических моделей структур СТС, представлено следующим образом:  $X^{(c,k)} = \{x_1^{(c,k)}, x_2^{(c,k)}, \dots, x_{n_k}^{(c,k)}\}$ , где  $k \in S$ ,  $S = \{1, \dots, K\}$ , — порядковый номер конкретного варианта структуры СТС заданного класса,  $S$  — множество вариантов структур в заданном классе,  $n_k$  — число элементов  $k$ -й структуры, принадлежащей заданному классу.

Тогда каждая из статических моделей будет описываться следующим бинарным отношением:

$$r^{(c,k)} = \langle X^{(c,k)}, X^{(c,k)}, R^{(c,k)} \rangle,$$

где  $R^{(c,k)} \subseteq X^{(c,k)} \times X^{(c,k)}$ .

Для количественного оценивания структур СТС введем отображение следующего вида:

$$\eta_k^{(c,l)} = \langle R^{(c,k)}, IR^+, F_k^{(c,l)} \rangle,$$

где  $l \in \{1, \dots, L\}$  — порядковый номер показателя, оценивающего качество структур, заданных на статических моделях;  $IR^+ = [0, +\infty)$ ,  $F_k^{(c,l)}: R^{(c,k)} \rightarrow IR^+$  — график отображения подмножества пар декартовых произведений множества элементов  $k$ -й структуры на область положительных вещественных чисел.

Динамические модели, описывающие возможные технологии управления СТС (модели функциональной структуры СТС), будем задавать на множестве элементов  $X^{(д,к)} = \{x_1^{(д,к)}, x_2^{(д,к)}, \dots, x_{n_k}^{(д,к)}\}$ .

Пусть каждый элемент множества  $X^{(д,к)}$  в предлагаемой динамической модели описывает состояние, при котором выполняется операция взаимодействия основных подсистем СТС, и количественно характеризует текущий объем переданной (обработанной) информации в СТС. Для задания данной динамической модели введем следующие обозначения:  $T$  — множество моментов времени;  $U, Y$  — множества управляющих и выходных воздействий соответственно. В этом случае переходное и выходное отображения рассматриваемой динамической модели имеют вид

$$\Psi^{(д,к)} : X^{(д,к)} \times U^{(д,к)} \times T \rightarrow X^{(д,к)}, \tag{1}$$

$$\Phi^{(д,к)} : X^{(д,к)} \times U^{(д,к)} \times T \rightarrow Y^{(д,к)}. \tag{2}$$

Для количественного оценивания СТС с помощью динамической модели (1), (2) введем следующее отображение:

$$\Pi_k^{(д,р)} : X^{(д,к)} \times U^{(д,к)} \times T \rightarrow IR^+,$$

где  $p = 1, \dots, P$  — порядковый номер показателя, оценивающего качество функциональных структур СТС.

Для корректной реализации технологии системного моделирования СТС необходимо связать предложенные статическую и динамическую модели с помощью правил, базирующихся на аксиоматике гомоморфизмов отношений, задающих указанные модели [3].

На рис. 1 представлена графическая интерпретация выполнения условий гомоморфизма отношений следующего вида:

$$R^{(с,к)} \circ \Phi^{(к)} = \Phi^{(к)} \circ \Psi^{(д,к)};$$

$$\Phi^{(к)} : X^{(с,к)} \rightarrow X^{(д,к)},$$

где  $\circ$  — символ операции композиции соответствующих бинарных отношений.

С учетом вышеизложенного задача выбора (синтеза) наиболее предпочтительной структуры СТС формально сводится к задаче векторной (многокритериальной) оптимизации:

$$\mathbf{I}_k = \left\| F_k^{(с,л)}, \Pi_k^{(д,р)} \right\|_{k \in S}^T \rightarrow \text{extr}. \tag{3}$$

Для решения данной задачи в соответствии с теорией многокритериального выбора надо найти такое правило согласования (свертку)  $G$  частных показателей, оценивающих качество структур СТС, с помощью которого можно определить  $k^*$  — наиболее предпочтительную структуру СТС. Формально результаты решения этой задачи описываются следующим выражением:

$$k^* = \arg \text{extr}_{k \in S} G \left( F_k^{(с,л)}, \Pi_k^{(д,р)} \right).$$

Как показал проведенный анализ, в качестве метода решения задачи (3) целесообразно использовать метод анализа иерархий [2]. Применительно к технико-топологической и функциональной (технологической) структурам СТС алгоритм решения этой задачи состоит из двух фаз.

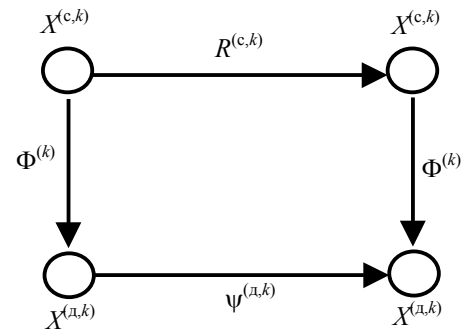


Рис. 1

**Фаза 1.** Расчет количественных показателей, оценивающих конкретные варианты структур СТС с использованием статических и динамических моделей. Данная фаза включает в себя следующие этапы.

*Этап 1.1.* Формальное описание ориентированных графов, задающих каждую из структур СТС.

*Этап 1.2.* Формирование матрицы смежности для каждого из графов. Указанные матрицы, а также их порядки являются входными данными, используемыми соответствующей программой расчета значений показателей качества структур СТС, написанной на языке MathLab.

*Этап 1.3.* Расчет степенных матриц смежности после ввода входной информации.

*Этап 1.4.* Вычисление матрицы достижимости.

*Этап 1.5.* Расчет матрицы расстояний. Удобным и несложным методом поиска кратчайших путей между любыми достижимыми вершинами графа является алгоритм Флойда [1], с помощью которого формируется матрица, определяющая кратчайшие расстояния между любыми достижимыми вершинами графа.

На основе матриц смежности, достижимости и расстояний посредством элементарных формул определяются с использованием статических моделей показатели соответствующих графов: показатели связности, достижимости, централизованности и др. Если провести динамическую интерпретацию исходного графа структурных состояний СТС [3], то можно определить показатели достижимости и различимости.

**Фаза 2.** Многокритериальный выбор наиболее предпочтительной структуры СТС. Вводятся дополнительные исходные данные в виде матрицы попарных сравнений показателей качества структур СТС, а также матриц попарных сравнений вариантов решений для каждого отдельного показателя. Метод анализа иерархий [2] предполагает многоэтапное структурирование и решение задачи многокритериального выбора на основе экспертной информации, с помощью которой задаются перечисленные матрицы.

Фаза 2 включает в себя следующие этапы [2].

*Этап 2.1.* По шкале относительной важности формирование матрицы попарных сравнений показателей качества структур СТС по отношению к высшему уровню иерархии (цели).

*Этап 2.2.* Определение приближенных компонент ненормализованного вектора приоритетов.

*Этап 2.3.* Нормализация компонент вектора приоритетов.

*Этап 2.4.* Составление матриц попарных сравнений для каждого отдельного показателя качества структур СТС. Попарное сравнение предлагаемых вариантов решений по отношению к промежуточному уровню иерархии (т.е. к каждому из показателей качества структур СТС).

*Этап 2.5.* Расчет подобно этапам 2.2 и 2.3 приближенных нормированных векторов приоритетов для предлагаемых решений по отношению к каждому из показателей качества структур СТС (локальные приоритеты).

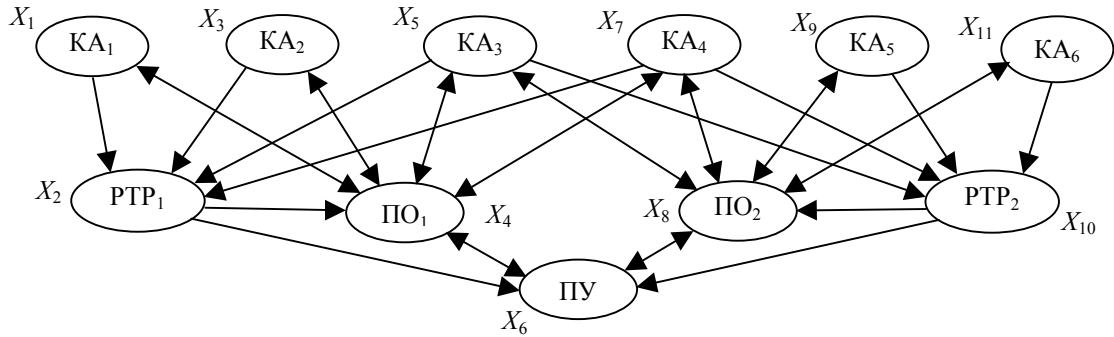
*Этап 2.6.* Для выявления глобальных приоритетов формирование матрицы полученных на этапе 2.5 локальных приоритетов, строки которой соответствуют вариантам решений, а столбцы — показателям качества структур СТС.

*Этап 2.7.* Умножение сформированной на этапе 2.6 матрицы на вычисленный на этапе 2.3 нормализованный вектор-столбец приоритетов, рассчитанный для всех показателей качества структур СТС. В результате данной операции определяется вектор-столбец глобальных приоритетов, с помощью которых можно упорядочить исходное множество структур СТС.

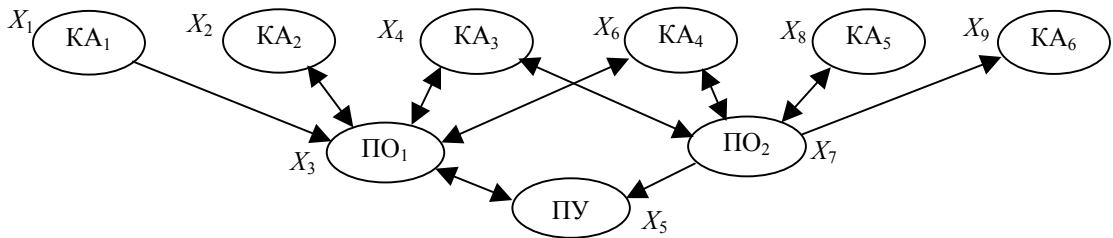
Практическую реализацию предложенного подхода проиллюстрируем на примере многокритериального анализа структур наземного комплекса управления (НКУ), входящего в состав наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами [3].

Представленные на рис. 2 четыре возможных варианта технико-топологической структуры НКУ отличаются друг от друга технологией обмена информацией. На рисунке приняты следующие сокращения: КА — космический аппарат; РТР — ретранслятор; ПО — пункт обслуживания; ПУ — пункт управления.

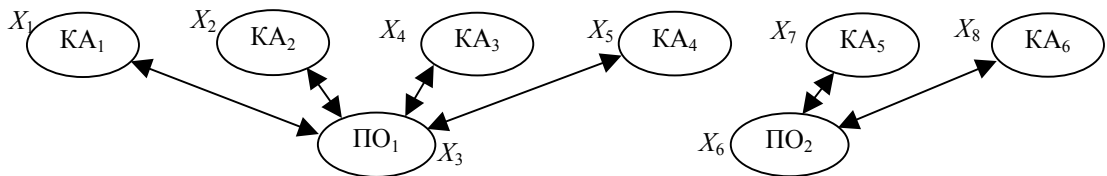
Структура № 1



Структура № 2



Структура № 3



Структура № 4

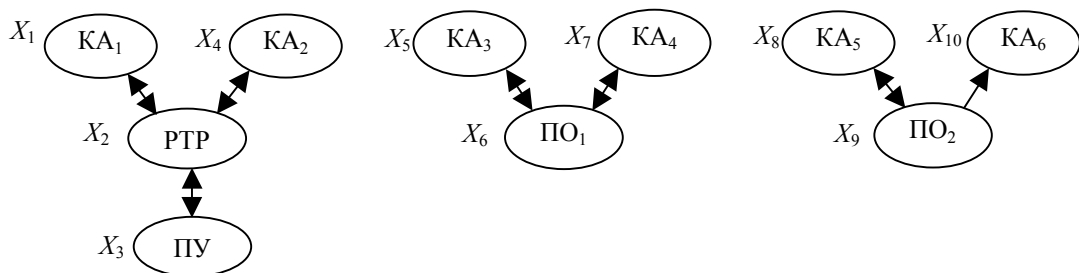


Рис. 2

На примере приведенных структур показаны лишь возможные варианты обмена информацией, используемой при решении задач мониторинга окружающей среды.

С использованием специальной программы были построены сети Петри, имитирующие работу каждой из четырех структур на заданном временном интервале. С помощью соответствующей программы было определено время последовательного обслуживания всех шести космических аппаратов каждой структуры с учетом времени формирования, обработки и прохождения информации, корректирующей траекторию КА.

Особое внимание было уделено формированию показателя устойчивости структур на основе подхода, предложенного в работе [4]. При этом учитывалась как положительная связь параметров в разработанной модели (увеличение одного параметра приводит к увеличению другого), так и отрицательная (увеличение одного параметра приводит к уменьшению другого). При составлении матриц весов для каждого графа положительная связь между вершинами означает, что соответствующий элемент матрицы равен +1, при отрицательной связи значение элемента равно -1, при отсутствии связи соответствующий элемент матрицы равняется нулю. Для количественной оценки степени устойчивости была выбрана степень близости к единице максимального из модулей собственных значений матрицы весов, соответствующей каждой из анализируемых структур СТС. При превышении хотя бы одним из модулей значения единицы система считается неустойчивой.

Итак, при многокритериальном выборе наиболее предпочтительной структуры НКУ КА учитывались следующие показатели качества структур СТС:

— *показатели, рассчитываемые с использованием статических моделей*: показатель связности ( $J_1$ ), квадратическое отклонение распределения степеней вершин от равномерного ( $J_2$ ), показатель достижимости ( $J_3$ ), показатель компактности структуры ( $J_4$ ), показатель централизованности ( $J_5$ );

— *показатели, рассчитываемые с использованием динамических моделей*: время передачи информации от космического аппарата до пункта управления ( $J_6$ ), показатель достижимости состояний ( $J_7$ ), показатель различимости состояний ( $J_8$ ), время последовательного обслуживания всех космических аппаратов ( $J_9$ );

— *показатель устойчивости* ( $J_{10}$ ).

Расчеты, произведенные в ходе первой фазы исследований, выявили значения показателей качества для четырех структур НКУ (см. рис. 2), которые представлены в таблице.

Номер структуры	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$ , мин	$J_7$	$J_8$	$J_9$ , мин	$J_{10}$
1	3,2000	85,6364	1	0,0168	0,3167	73	1	1	148	2,0923
2	2,1250	67,5556	0,7901	0,1500	0,4196	68	0,8148	0,7778	148	1,2361
3	1,7143	32	0,5313	0,1364	0,4762	43	0,5313	0,5417	43	1,0000
4	1,4444	18,4000	0,3100	0,1667	0,2361	43	0,3200	0,3167	108	0,7321

В ходе второй фазы решения задачи на основе использования метода анализа иерархий были определены приоритеты исследуемых структур с учетом значений всех десяти показателей, рассчитанных на первой фазе. В итоге структуре № 1 соответствует значение приоритета 0,2951; структуре № 2 — 0,1902; структуре № 3 — 0,2699; структуре № 4 — 0,2448. Таким образом, в рассматриваемой задаче наиболее предпочтительной оказалась первая структура.

**Заключение.** На основе предложенного модельно-алгоритмического обеспечения решения задач многокритериального выбора структур СТС был разработан соответствующий прототип программного обеспечения. Использование данного прототипа позволяет решить ряд важных прикладных задач в различных областях (космонавтика, электроэнергетика, бизнес).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 06-07-89242; 07-07-00169, 05-08-18111, 08-08-00403) и Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № О-2.5/03).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников Б. А. Системный анализ и методы системотехники. Ч. 1. Методология системных исследований. Моделирование сложных систем. МО СССР. 1990.
2. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь. 1989.

3. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
4. Корнеев В. В., Гареев А. Ф., Васютин С. В., Райх В. В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. М.: Нолидж, 2001.

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
31.05.07 г.

УДК 004.728.8

С. С. БАГЛЮК

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского  
Санкт-Петербург*

## **МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ МЕЖДУ ПРИКЛАДНЫМИ УРОВНЯМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Рассматриваются основные протоколы передачи данных в современных информационных системах и предпосылки к разработке протокола передачи информации на основе прогнозирования трафика. Приводится математическое обоснование возможности прогнозирования объема ненарушаемой целостности информации.

**Анализ основных протоколов передачи информации в клиент-серверной информационной системе.** Известные протоколы передачи информации TCP (Transmission Control Protocol) и UDP (User Datagram Protocol), обеспечивающие транспортный уровень стека протоколов TCP/IP, реализуют надежную (с гарантированной целостностью) и ненадежную доставку информации соответственно. Данные протоколы являются основными (для своего уровня) в современных распределенных вычислительных системах. Они удобны для пользователей и применяются не одно десятилетие. Однако эти протоколы реализуют два различных подхода к передаче данных. Гарантия целостности передаваемых по протоколу TCP данных (основная спецификация этого протокола представлена в официальном стандарте Internet-архитектуры Request for Comment, далее — RFC, 793 и дополнена в описании транспортного уровня в RFC 1122) влечет за собой неэффективное использование канала вследствие совокупности ряда факторов, а именно:

- реализации механизмов установления и разрыва соединений;
- отсутствия алгоритмов быстрого восстановления при нарушении целостности в двух и более передаваемых подряд сегментах;
- работы механизма медленного старта (запуск этого механизма осуществляется всегда при передаче информации, начиная с версии протокола 4.3 BSD Reno — 1990);
- работы механизма предотвращения переполнения.

Тем не менее, несмотря на невысокую эффективность использования канала, совокупная работа этих механизмов и алгоритмов расчета, наложения и верификации контрольных сумм обеспечивает гарантированную целостность [1] передаваемых данных. График изменения объема ( $V$ ) передачи данных по протоколу TCP в случае группового нарушения целостности представлен на рис. 1. Спады на 8-й, 17-й, 23-й и 32-й секундах вызваны нарушением целостности в двух и более передаваемых сегментах, идущих подряд. В таких условиях не может быть задействован алгоритм быстрого восстановления протокола TCP, поскольку этот механизм обеспечивает повторную отправку лишь одиночного сегмента, целостность которого

была нарушена. В данном случае после группового нарушения целостности инициируется механизм медленного старта, и размер скользящего окна ТСР-сессии устанавливается равным одному сегменту. При этом при реализации прикладного процесса постоянно увеличивается объем передаваемой информации, и логично предположить, что на прикладном уровне необходимо окно большего размера, чем окно, предоставляемое протоколом ТСР.

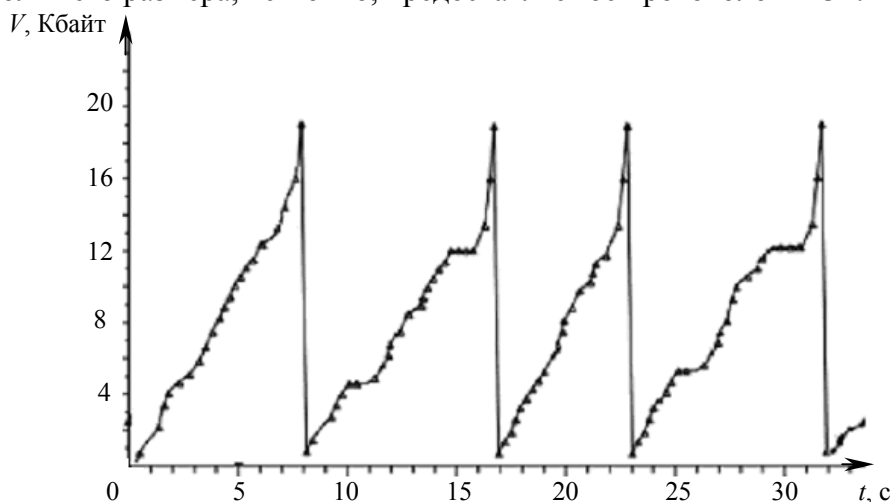


Рис. 1

Другой характерной особенностью протокола ТСР является не самая высокая эффективность использования доступной ширины канала. Даже в том случае, когда ширина канала позволяет передать весь объем информации, генерируемый в ходе реализации прикладных процессов, механизмы медленного старта и предотвращения переполнения протокола не позволяют этого сделать: размер окна передачи будет увеличиваться сначала экспоненциально (медленный старт), а потом линейно (предотвращение переполнения). Размер окна будет увеличиваться до тех пор, пока не достигнет максимального для данного канала или для ТСР (65 535 байт, если не используется опция масштабирования ТСР).

В итоге можно сделать следующий вывод: использование алгоритмов протокола ТСР обеспечивает вычисление емкости канала (ширина канала, умноженная на время возврата) итерационным методом, т.е. путем постепенного увеличения размера окна до максимального. Постоянную передачу данных в максимальном объеме (равном доступной емкости канала в конкретный момент), с первой до последней секунды, протокол ТСР обеспечить не может.

В отличие от ТСР при использовании протокола UDP (официальная спецификация этого протокола изложена в RFC 768) в случае нарушения целостности (объем информации, целостность которой при передаче нарушена, значения не имеет — это может быть как одна датаграмма, так и несколько подряд) объем передаваемой информации не будет снижаться до минимума. Данные будут отправляться постоянно, причем в том объеме, который был сгенерирован каждым приложением в конкретный момент времени. Это позволяет использовать всю доступную на данный момент ширину канала для передачи информации, поступающей с прикладного уровня. Однако восстановление целостности объема протокол UDP не обеспечивает. Датаграммы, целостность которых была нарушена, приемной стороной отбрасываются и никаких шагов по их восстановлению не предпринимается. Емкость канала в этот момент на объем передаваемых данных не влияет.

В приведенном примере использована выделенная линия с постоянной шириной канала, и весь канал предоставлен одному приложению (см. рис. 1). Следовательно, при информационном обмене между двумя хостами емкость канала также будет фиксирована. В таком идеальном случае можно передавать данные с максимальным использованием ресурсов — именно в том объеме, который доступен в конкретный момент, причем этот объем известен заранее. Эффективность работы такой системы будет существенно более высокой, чем эффектив-



ность реальных систем передачи данных, поскольку в большинстве случаев в современных распределенных вычислительных системах емкость канала — величина непостоянная. Основными причинами, влияющими на изменение ширины канала, могут служить маршрутизация соседних пакетов данных по каналам с разной пропускной способностью, передача данных по каналу другими приложениями и т.п. Использование протокола TCP в случае переменной пропускной способности канала передачи позволяет избежать нарушения целостности передаваемых данных за счет уменьшения размера окна до минимума (см. рис. 1, 2).

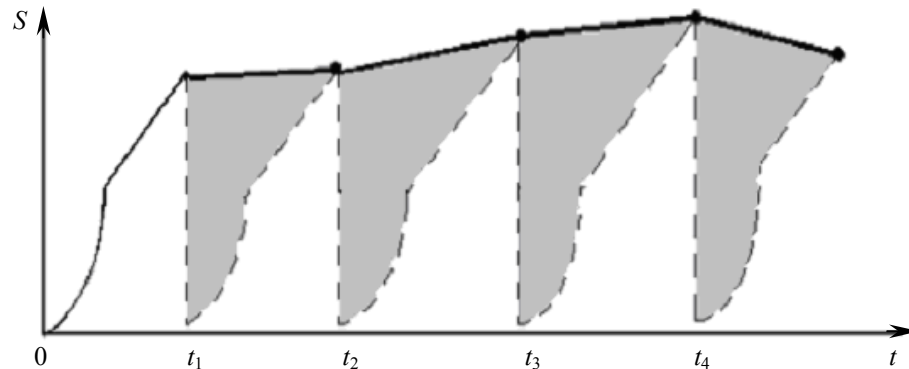


Рис. 2

Изменение размеров ( $S$ ) скользящего окна протокола TCP показано на рис. 2, наглядно демонстрирующем невысокую эффективность канала (незадействованная ширина канала выделена серым цветом). Неэффективное использование доступной пропускной способности (тем более в условиях ее нехватки для процессов прикладного уровня) — это издержки, которые влечет за собой гарантия целостной передачи. Вследствие этого зачастую (например, в системах видеоконтроля), приходится жертвовать целостностью существенной части информации и отказываться от применения TCP в пользу UDP.

В настоящее время в условиях переменной ширины канала не существует механизмов, позволяющих оценить объем информации, возможный к передаче без нарушения целостности в конкретный момент времени.

**Методика оценки характера распределения при моделировании процесса передачи данных прикладного уровня.** Пусть процесс передачи данных прикладного уровня — функция случайной величины (объем информации в байтах в единицу времени). Тогда такой процесс можно моделировать стандартными распределениями теории вероятности.

Пусть  $X=(X_1, X_2, \dots)$  — стохастический процесс дискретного аргумента (времени), отражающий изменение объема передачи данных по схеме „прикладной уровень сервера — прикладной уровень клиента“ без нарушения целостности. Тогда каждый отсчет  $X_i$  отражает объем информации, переданный без нарушения ее целостности с прикладного уровня сервера на прикладной уровень клиента за момент времени  $T=t_i-t_{i-1}$ . Для оценки характера распределения такого процесса предлагается воспользоваться следующей методикой:

- по статистике трафика вычислить дисперсию  $D(X)$  и математическое ожидание  $M(X)$  процесса  $X$ ;
- согласно работе [2] выполнить проверку классического условия пуассоновского потока:

$$\sqrt{D(X)}=M(X);$$

- при выполнении условия пуассоновского потока считать, что трафик распределен по закону Пуассона [2, 3]; в этом случае трафик нельзя считать достоверно прогнозируемым; для передачи данных более целесообразно воспользоваться стандартными механизмами, реализованными в стеке протоколов TCP/IP;

— в случае когда выполняется условие  $\sqrt{D(X)} > M(X)$ , процесс передачи информации описывается распределением с тяжелым хвостом (РТХ).

Распределение с тяжелым хвостом позволяет построить модель процесса передачи данных на основе метода, предложенного в работе [4].

**Модель процесса передачи информации по схеме „прикладной уровень сервера — прикладной уровень клиента“.** Представим процесс  $X=(X_1, X_2, \dots)$  в виде полубесконечного отрезка стационарного в широком смысле случайного процесса дискретного аргумента (времени)  $t \in N$ . Пусть автокорреляционная функция (АКФ) процесса  $X=(X_1, X_2, \dots)$  имеет вид

$$r(k) \approx k^{-\beta} L(k), \quad k \in Z, \quad k \rightarrow \infty. \quad (1)$$

Здесь  $0 < \beta < 1$ ,  $L(k)$  — медленно меняющаяся на бесконечности функция, т.е.  $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{L(tx)}{L(t)} = 1$  для всех  $x > 0$ .

Поскольку зачастую трафик представляет собой неэквиливантный временной ряд, то отсутствует постоянный шаг по шкале времени. Для приведения трафика к эквиливантному виду введем процесс  $X^{(m)}=(X_1^{(m)}, X_2^{(m)}, \dots)$ , такой что  $X_t^{(m)} = \frac{1}{m}(X_{tm-m+1} + \dots + X_{tm})$ ,  $t, m \in N$ , т.е.  $X^{(m)}$  представляет собой агрегацию процесса  $X$  по фрагментам продолжительностью  $m$ . Тогда процесс  $X$  может быть представлен тремя определениями [4, 5].

1. Процесс  $X$  является самоподобным в узком смысле с параметром самоподобия  $H = 1 - \frac{\beta}{2}$ ,  $0 < \beta < 1$ , если

$$m^{1-H} X^{(m)} \overset{\bullet}{=} X, \quad m \in N.$$

Это выражение следует понимать как равенство распределений. Параметр  $H$ , называемый коэффициентом Хэрста, имеет принципиальное значение. Он является индикатором степени самоподобия процесса, а также свидетельствует о наличии таких его свойств, как продолжительная память и возможность сохранения своего поведения.

2. Процесс  $X$  является строго самоподобным в широком смысле с параметром самоподобия  $H = 1 - \frac{\beta}{2}$ ,  $0 < \beta < 1$ , если

$$r(k) = \frac{(k+1)^{2-\beta} - 2k^{2-\beta} + (k-1)^{2-\beta}}{2} \overset{\Delta}{=} g(k) \quad \text{при } k \in N;$$

$$r_m(k) = r(k), \quad m \in \{2, 3, \dots\} \quad \text{для всех } k \in Z,$$

здесь  $g(k)$  — коэффициент корреляции процесса  $X$ .

Приведенные зависимости показывают, что коэффициент корреляции строго самоподобного в широком смысле процесса не изменяется после усреднения по фрагментам продолжительностью  $m$  [4]. Другими словами, процесс  $X$  является строго самоподобным в широком смысле, если агрегированный процесс  $X^{(m)}$  неотличим от исходного процесса  $X$ , как минимум, в отношении статистических характеристик второго порядка [5].

3. Процесс  $X$  является асимптотически самоподобным в широком смысле с параметром самоподобия  $H = 1 - \frac{\beta}{2}$ ,  $0 < \beta < 1$ , если

$$\lim_{m \rightarrow \infty} r_m(k) = \frac{(k+1)^{2-\beta} - 2k^{2-\beta} + (k-1)^{2-\beta}}{2} \overset{\Delta}{=} g(k) \quad \text{для всех } k \in N.$$

Таким образом, процесс  $X$  является асимптотически самоподобным в широком смысле в том случае, когда после агрегации по фрагментам продолжительностью  $m$  он при  $m \rightarrow \infty$  сходится к строго самоподобному в широком смысле процессу.

Самоподобный процесс  $X$  описывается распределением с тяжелым хвостом: процесс  $X$  обладает АКФ вида  $r_m(k)$ , которая при  $m \rightarrow \infty$  убывает значительно медленнее, чем АКФ других стохастических моделей (для которых справедливо  $r_m(k) \rightarrow 0, m \rightarrow \infty, k \in N$ ). Так как при распределении с легким хвостом (РЛХ) АКФ убывает по экспоненте и имеет вид  $r(k) \approx \rho^k, k \rightarrow \infty, 0 < \rho < 1$ , то  $0 < \sum_k r(k) < 1$ , а при АКФ вида (1) справедливо условие  $\sum_k r(k) \rightarrow \infty$ . Следовательно, процесс  $X$  обладает распределением с тяжелым хвостом.

Представленная модель характеризуется двумя свойствами — персистентностью и бесконечным (при строгом выполнении условия (1)) интервалом корреляции. Покажем это путем доказательства двух утверждений.

**Утверждение 1.** Процесс целостной передачи данных по схеме „прикладной уровень сервера — прикладной уровень клиента“, описываемый приведенной моделью, характеризуется свойством сохранять свое поведение (увеличение или уменьшение объема передаваемых данных, существование активного периода передачи данных и т.п.).

**Доказательство.** Доказательство основано на результатах исследования, представленных в работе [5]. Пусть  $Q$  — случайная величина, которая описывается РТХ и отражает продолжительность активной целостной передачи данных с прикладного уровня сервера прикладному уровню клиента. Тогда при передаче данных без нарушения их целостности в течение интервала времени  $1 \leq t \leq \tau$  условная вероятность того, что в момент  $\tau+1$  передача данных будет осуществляться без нарушения целостности, определяется как

$$L(\tau) = P\{A(\tau+1)=1 | A(t)=1\}$$

или

$$L(\tau) = 1 - \frac{P\{Q=\tau\}}{P\{Q \geq \tau\}}$$

Индикаторная функция  $A(t)$ , введенная в работе [5], имеет вид

$$\left. \begin{aligned} A(t) &= 1, \\ Q(t) &\geq t. \end{aligned} \right\}$$

Учитывая, что величина  $Q$  описывается РТХ, можно записать

$$\frac{P\{Q=\tau\}}{P\{Q \geq \tau\}} \approx \frac{c\tau^{-a} - c(\tau+1)^{-a}}{c\tau^{-a}} = 1 - \left(\frac{\tau}{\tau+1}\right)^a; \quad c, a = \text{const},$$

а значит,

$$L(\tau) = 1 - \frac{P\{Q=\tau\}}{P\{Q \geq \tau\}} \approx 1 - \left(1 - \left(\frac{\tau}{\tau+1}\right)^a\right) = \left(\frac{1}{1/\tau+1}\right)^a \rightarrow 1 \quad \text{при } \tau \rightarrow \infty.$$

Для существования активного периода  $Q$  в момент времени  $\tau+\delta, \delta > 1$ , будет справедливо выражение

$$L(\tau) = P\{A(\tau+s)=1 | A(t)=1\} \approx \left(1 + \frac{\delta}{\tau}\right)^{-a} \rightarrow 1 \quad \text{при } \tau \rightarrow \infty, 1 \leq s \leq \delta, 1 \leq t \leq \tau. \quad (2)$$

**Утверждение 2.** Пусть объем информации, передаваемой по схеме „прикладной уровень сервера — прикладной уровень клиента“ без нарушения целостности, описывается приведенной моделью. Тогда этот объем является величиной, значение которой прогнозируемо на некотором интервале  $\tau_k$ .

**Доказательство.** Доказательство основано на результатах исследования, представленных в работе [6]. Интервал корреляции, являясь числовой характеристикой случайной величины, напрямую связанной с ее предсказуемостью, для рассматриваемого процесса определяется как  $\tau_k = \int_0^{\Delta} |r(\tau)| d\tau$ , где  $r(\tau)$  — нормированная функция корреляции.

В условиях гиперболически убывающей корреляционной функции (1)

$$\tau_k = \int_0^{+\infty} |\tau^{-\beta}| d\tau.$$

Если  $\beta \neq 1$ , то для любого  $R > 0$

$$\tau_k = \lim_{R \rightarrow +\infty} \int_0^R \frac{d\tau}{\tau^\beta} = \lim_{R \rightarrow +\infty} \left. \frac{\tau^{1-\beta}}{1-\beta} \right|_0^R = \lim_{R \rightarrow +\infty} \frac{R^{1-\beta}}{1-\beta}; \tau_k = 0 \text{ при } \beta > 1, \tau_k \rightarrow \infty \text{ при } \beta < 1. \quad (3)$$

Если  $\beta = 1$ , то для любого  $R > 0$

$$\tau_k = \lim_{R \rightarrow +\infty} \int_0^R \frac{d\tau}{\tau} = \lim_{R \rightarrow +\infty} \ln \tau \Big|_0^R \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Таким образом, обобщая выражения (3) и (4) для процесса, удовлетворяющего условию (1), интервал корреляции будет бесконечно протяженным:

$$\left. \begin{array}{l} \tau_k \rightarrow \infty, \\ 0 < \beta < 1. \end{array} \right\} \quad (5)$$

Представленные утверждения позволяют говорить об оценивании целостности данных до начала их передачи с прикладного на транспортный уровень (для процессов, удовлетворяющих условию (1) и описываемых РТХ).

**Разработка протокола передачи данных на основе прогнозирования объема ненарушаемой целостности.** Зависимости (2) и (5), полученные для процессов передачи данных по схеме „прикладной уровень сервера — прикладной уровень клиента“, позволяют сделать вывод о возможности прогнозирования сетевого трафика в случае, когда справедливо условие (1). Это целесообразно реализовать при разработке протокола с прогнозируемой целостностью (IPP — Integrity Prediction Protocol). Принципы работы перспективного протокола IPP в сравнении с TCP и UDP представлены на рис. 3, *a—в* в виде графиков, характеризующих объем передаваемой информации в единицу времени в условиях переменной пропускной способности канала (кривая 1) при использовании протокола TCP (*a*), протокола UDP (*б*) и протокола IPP (*в*); кривая 2 соответствует объему информации, генерируемому на прикладном уровне, а кривые 3 и 4 — объему, пропускаемому в сеть протоколами TCP и IPP соответственно.

Протокол IPP может осуществлять передачу данных на основе прогнозирования того объема информации, который допустим в настоящий момент к передаче без нарушения ее целостности. Целостность передаваемой информации предлагается проверять на приемной стороне с использованием методов контрольных сумм. Необходимо учитывать и ошибки прогнозирования — расхождения между текущим объемом информации, переданной без нарушения целост-

ности, и соответствующим ему прогнозируемым значением. В зависимости от важности информации датаграммы с нарушенной целостностью можно отбрасывать либо повторять, обеспечивая тем самым допустимым уровень потерь при заданной скорости передачи.

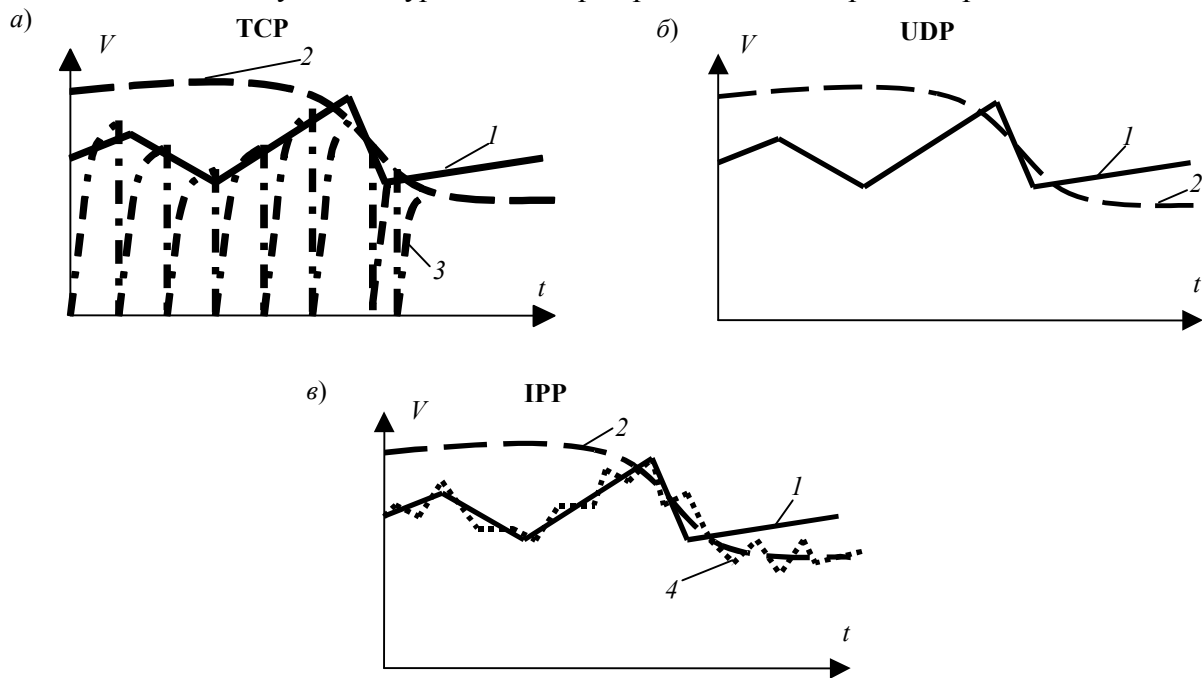


Рис. 3

**Заключение.** На основании проведенного анализа основных протоколов передачи информации стека TCP/IP выявлены такие недостатки, как низкая эффективность канала при использовании протокола TCP и отсутствие гарантированной целостности при использовании протокола UDP. Для моделирования процесса передачи информации была определена методика выбора характера распределения. Построена модель процесса передачи данных и приведены доказательства прогнозируемости объема передаваемой информации. Определено направление использования прогнозирования для управления процессом передачи информации в распределенной клиент-серверной системе, что позволяет устранить выявленные недостатки существующих протоколов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 2002. 672 с.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Физматгиз, 1958. 464 с.
3. Столлингс В. Современные компьютерные сети. СПб.: Питер, 2003. С. 200—202.
4. Цыбаков Б. С. Модель телетрафика на основе самоподобного случайного процесса // Радиотехника. 1999. № 5. С. 24—31.
5. Петров В. В. Структура телетрафика и алгоритм обеспечения качества обслуживания при влиянии эффекта самоподобия. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ(ТУ), 2004. 199 с.
6. Petroff V. Self-similar network traffic: from chaos and fractals to forecasting and QoS // Proc. of the Intern. Conf. „Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking“, St. Petersburg, Febr. 2—6, 2004. St. Petersburg, 2004. P. 110—118.

Рекомендована кафедрой  
математического обеспечения

Поступила в редакцию  
31.05.07 г.

О. Ю. ГАЦЕНКО, С. В. МАКСИМОВ

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского  
Санкт-Петербург*

## **МОДЕЛЬ МНОГОШАГОВОГО ПРОЦЕССА ПОДАВЛЕНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ**

Рассматривается процесс подавления несанкционированных воздействий на информационные системы, на каждом шаге которого осуществляется сбор информации о применяемом воздействии и выбирается способ его подавления. Предлагается модель процесса, позволяющая определить оптимальные моменты принятия решений по выбору способа применения средств защиты информации.

В настоящее время реализация возрастающих требований к защищенности информации в автоматизированных системах управления обуславливает необходимость совершенствования моделей процессов защиты информации. Модель процесса защиты с полным перекрытием и ряд других моделей [1], построенных на ее основе, не позволяют учесть динамику информационного противоборства. Использование таких моделей ограничивается в основном этапом проектирования систем защиты информации. Модели на основе игрового подхода [2, 3] снимают это ограничение, однако при их разработке предполагается, что подавление несанкционированных воздействий (НВ) на информационные системы происходит за один шаг. Такое предположение в общем случае не всегда справедливо. В настоящей статье предлагается модель многошагового процесса подавления НВ, которая описывает этот процесс более детально и позволяет решить задачу определения оптимальных моментов принятия решений по выбору способа применения средств защиты информации. Под НВ понимается воздействие, осуществляемое с нарушением установленных прав и/или правил доступа и приводящее к утечке, искажению или уничтожению информации, либо к блокированию доступа [4].

На каждом шаге процесса осуществляется сбор информации о примененном НВ, выбор способа его подавления и реализация этого способа. Сбор информации осуществляется путем анализа log-файлов, проверки контрольных сумм системных файлов, проверки файлов на наличие сигнатур вирусов, проверки компонентов операционной системы на уязвимость и т.п. Такой анализ требует значительных временных затрат и не всегда дает однозначный ответ о примененном способе воздействия. Временных затрат требует и сам процесс подавления НВ.

Рассмотрим случай, когда точно идентифицировать способ НВ не удастся: например, при использовании противоборствующей стороной неизвестных ранее методов воздействия и т.п. Принятие решений о выборе способа применения средств защиты информации в этом случае происходит в условиях риска, когда данные о способе НВ описываются вероятностными распределениями.

Целью процесса подавления НВ является перевод вычислительной системы из состояния  $s_i \in S$  (где  $S$  — множество возможных способов НВ,  $i = \overline{1, m}$  — номер используемого противоборствующей стороной способа воздействия,  $m$  — количество рассматриваемых способов НВ) в состояние, при котором сохраняется целостность, доступность и конфиденциальность информации, —  $s_0$ . Каждому способу НВ соответствует свой способ его подавления  $n_i \in N$ , где  $N$  — множество способов подавления воздействия. Переход  $s_i \rightarrow s_0$  осуще-

ствляется только при правильном определении способа воздействия, в остальных случаях состояние вычислительной системы не изменяется.

Дальнейшее рассмотрение процесса подавления НВ происходит при допущении о невозможности реализации очередного воздействия, в то время когда осуществляется подавление предыдущего. Такое допущение представляется оправданным, так как при подозрении об информационном воздействии на объект вычислительной системы принимаются дополнительные меры безопасности. Например, при подозрении о вирусном заражении объекта в качестве таких мер могут быть выбраны блокирование сетевого доступа к объекту, перезагрузка компьютера и запуск программы антивирусной проверки. Эти меры позволяют исключить возможность заражения других компьютеров, а также возможность реализации удаленных и локальных информационных воздействий на проверяемый объект в период проверки.

Принимая во внимание предыдущее допущение и учитывая, что вероятность реализации одновременно нескольких НВ мала, случаи подавления нескольких воздействий одновременно здесь не рассматриваются.

Исходными данными для определения оптимального времени принятия решений по выбору способа применения средств защиты являются зависимость  $R(n_i, t)$  времени, затрачиваемого на подавление НВ, от интервала времени, прошедшего с начала его реализации до начала процесса подавления, а также априорные вероятности  $p(s_i)$  того, что вычислительная система находится в состоянии  $s_i$ . Эти вероятности в процессе сбора информации будут изменяться.

Граф смены состояний вычислительной системы представлен на рис. 1.

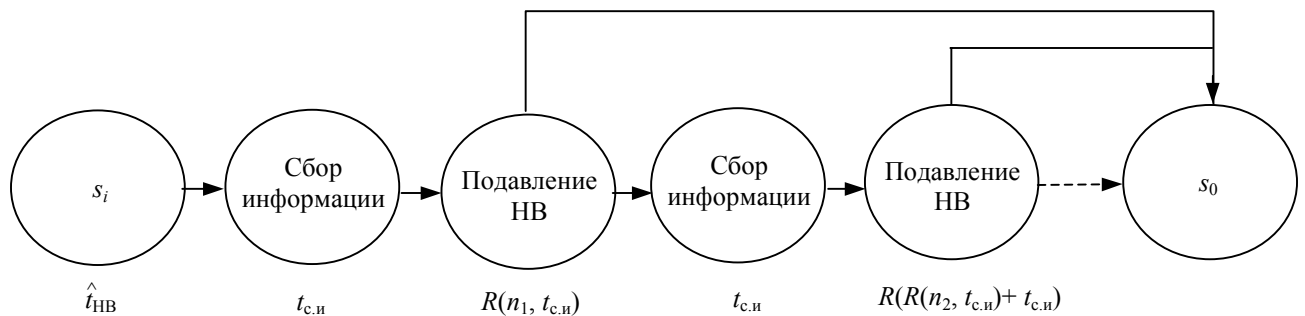


Рис. 1

Пусть в момент времени  $\hat{t}_{НВ}$  вычислительная система подвергается НВ, после чего осуществляется сбор информации об используемом способе воздействия, его идентификация и подавление.

Количество информации об НВ можно определить как уменьшение энтропии в результате изменения представлений о распределении вероятностей  $p(s_i)$  [5]. При этом энтропия определяется как

$$H = -\sum_{i=1}^m p(s_i) \log_2 p(s_i).$$

Так как каждому НВ соответствует свой способ подавления, то в случае если подавить воздействие способом  $n_j$  не удалось ( $j$  — номер способа подавления воздействия), можно сделать вывод о том, что противник реализует отличный от  $i$ -го способ НВ:  $s_1, s_2, \dots, s_{i-1}, s_{i+1}, \dots, s_m$ . Таким образом, количество информации о применяемом воздействии изменяется как в результате анализа признаков, по которым производится диагностика НВ, так и в результате неудачных попыток подавления воздействия. Максимальное количество неудачных попыток подавления определяется мощностью множества  $S$ .

Выбор способа подавления НВ на каждом шаге может осуществляться по одному из критериев принятия решений в условиях риска. На начальном этапе, когда информация о способе НВ отсутствует, целесообразно применить критерий Бернулли — Лапласа, полагая  $p(s_1) = p(s_2) = \dots = p(s_n) = 1/m$  и выбирая способ подавления из условия

$$n_j = \operatorname{arg\,min}_{j=1\dots m} R(n_j, t).$$

При накоплении информации об НВ, когда становятся известны вероятности  $p(s_i)$ , выбор способа подавления можно осуществлять по критерию Байеса:

$$n_j = \operatorname{arg\,min}_{j=1\dots m} R(n_j, t) p(s_i).$$

В случае когда вероятности  $p(s_i)$  известны, но получены на основании небольшого числа наблюдений, можно использовать критерий Ходжа — Лемана:

$$n_j = \operatorname{arg\,min}_{j=1\dots m} (uR(n_j, t) p(s_i) + (1-u)R(n_j, t)),$$

где  $u \in [0, 1]$  — параметр достоверности информации о вероятностях  $p(s_i)$ .

Рассчитаем зависимость среднего времени подавления воздействия  $\bar{t}_\Pi$  от времени  $t_{c.и}$ , в течение которого осуществлялся сбор информации о примененном НВ.

Вероятность подавления НВ с первой и со второй попыток определяется как

$$P_1 = p(s_l), \quad P_2 = \frac{p(s_k)}{\sum_{j=1}^{l-1} p(s_j) + \sum_{j=l+1}^m p(s_j)},$$

где  $l$  и  $k$  — номера выбранных способов подавления для первой и второй попыток соответственно (и т.д.).

Вероятностный процесс подавления НВ можно представить в следующем виде:

$$P_1 + (1-P_1)P_2 + \dots + \prod_{j=1}^{m-1} (1-P_j)P_m.$$

Среднее время подавления НВ определяется выражением

$$\bar{t}_\Pi(t_{c.и}) = P_1 R_1 + \sum_{i=1}^m \left\{ \left[ \prod_{j=1}^{i-1} (1-P_j) \right] P_i \sum_{j=1}^m R_j \right\}, \quad (1)$$

где  $R_1 = R(n_1, t_{c.и})$ ,  $R_j = R(n_j, t_{c.и} + R_{j-1})$ .

Максимальное время подавления НВ, соответствующее случаю, когда выбор способа подавления приходится осуществлять при максимальной энтропии  $H = -\log_2 1/(m-q+1)$ , где  $q$  — шаг процесса подавления, определяется как

$$t_\Pi^{\max} = \frac{1}{m} R_1 + \frac{1}{m-1} R_2 + \dots + \frac{1}{2} R_{m-1} + R_m,$$

где  $R_1 = R(n_1, 0)$ ,  $R_i = R(n_i, R_{i-1})$ .

Для расчета  $\bar{t}_\Pi(t_{c.и})$  по формуле (1) экстраполируем  $H(t_{c.и})$  на интервале  $t_{c.и} = [0, t_\Pi^{\max}]$ , а при расчете  $P_i$  используем вероятности  $p(s_i)$ , в качестве которых выберем любое из решений системы уравнений



$$\left. \begin{aligned} -\sum_{i=1}^m p(s_i) \log_2 p(s_i) &= H(t_{c.и}), \\ \sum_{i=1}^m p(s_i) &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Оптимальным моментом принятия решения по выбору способа подавления НВ будет

$$t_{c.и}^* = \operatorname{arg\,min}_{t_{c.и}=0 \dots t_{\Pi}^{\max}} \bar{t}_{\Pi}(t_{c.и}).$$

Рассмотрим следующий пример. Пусть  $m = 3$ ,  $H(t) = -\log_2(1/3)(1 - t/100)$ , зависимость  $R(n_i, t)$  одинакова для всех НВ:  $R(n_1, t) = R(n_2, t) = R(n_3, t) = 100 + 0,05t$ . Выбор способа подавления на каждом шаге осуществлялся по критерию максимума априорной вероятности используемого воздействия.

Зависимость  $\bar{t}_{\Pi}(t_{c.и})$ , рассчитанная по формуле (1), представлена на рис. 2 (сплошная кривая), здесь же приведены результаты моделирования процесса подавления НВ, проведенного в системе MathCad 13.

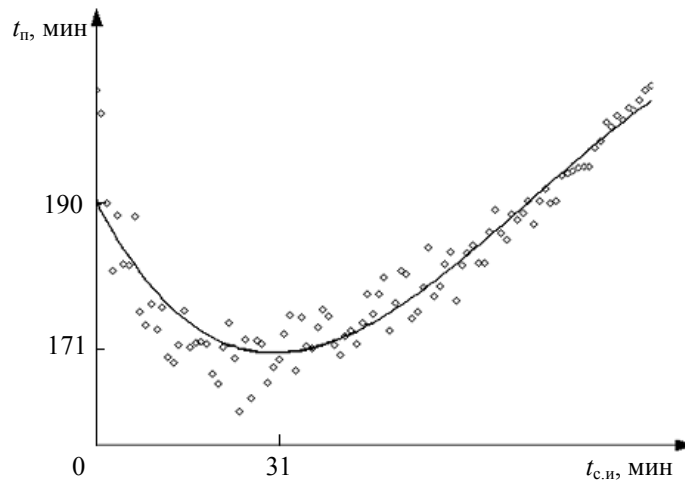


Рис. 2

При моделировании использовались те же исходные данные. Время  $t$  изменялось от 0 до 100 мин с шагом 1 мин. Выбиралось одно из решений  $p(s_i)$  системы уравнений (2). Генерировалась случайная величина  $x$ , имеющая равномерное распределение с параметрами  $[0, 1]$ . Критерием выбора способа подавления являлся максимум априорной вероятности НВ.

Время подавления НВ определяется следующим образом:

$$t_{\Pi} = \begin{cases} t + R(n_1, t) & \text{при } x < \max_{i=1 \dots 3} (p(s_i)); \\ t + R(n_2, t + R(t)) & \text{при } x < 1 - \min_{i=1 \dots 3} (p(s_i)), \\ t + R(n_3, t + R(t + R(t))) & \text{при } x > 1 - \min_{i=1 \dots 3} (p(s_i)). \end{cases}$$

Для каждого значения  $t$  проводилось 500 экспериментов, и в качестве результата бралось среднее арифметическое времени диагностики и подавления НВ.

При известных исходных данных оптимальное время сбора информации о примененном НВ  $t_{c.и}^* = 31,3$  мин, а среднее время подавления  $\bar{t}_{\Pi}(t_{c.и}^*) = 171$  мин. В случае если принятие решения о выборе способа подавления НВ происходит только на основе априорных данных (при  $t_{c.и} = 0$ ), то среднее время подавления  $\bar{t}_{\Pi}(0) = 190$  мин. Таким образом, выбор

оптимального времени, отводимого на сбор информации об НВ, позволяет при заданных исходных данных уменьшить временные потери на подавление воздействия на 10 %.

Итак, предложенная модель многошагового процесса подавления несанкционированных воздействий на информационные системы позволяет, с одной стороны, определить оптимальные моменты принятия решений по выбору способа применения средств защиты информации, а с другой — определить среднее время, необходимое для подавления воздействий, которое может быть использовано для расчета показателей защищенности информации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Домарев В. В.* Безопасность информационных технологий. Системный подход. Киев: ДиаСофт, 2004. 992 с.
2. *Воробьев А. А.* Игровые модели процессов защиты информации // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации: Сб. докл. Респ. науч.-техн. конф. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1995. С. 58—60.
3. *Козлов В. Н., Нестеров С. А.* Использование одношаговых конечных игровых моделей при анализе экономической эффективности средств защиты информации в автоматизированных системах // Безопасность информационных технологий. 2001. № 1. С. 29—31.
4. ГОСТ 51583-2000. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении. М.: Изд-во стандартов, 2000.
5. *Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетике: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 829 с.

Рекомендована кафедрой  
моделирования и эффективности  
применения космических систем и  
комплексов

Поступила в редакцию  
06.04.07 г.

УДК 681.3-002.51.6

В. В. ИЗВОЗЧИКОВА, И. В. МАТВЕЙКИН

*Оренбургский государственный университет*

И. Ю. ГАТЧИН, Н. А. НЕСТЕРОВА, И. Б. ТРОННИКОВ, В. А. СЕМЕНОВ

*Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики*

#### КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ

Обсуждается проблема построения концептуальной схемы (информационной структуры) управления предприятием. Предлагается методика определения границ предметной области путем декомпозиции задач прогнозирования с последующей их обработкой.

Проектирование базы знаний любой экспертной системы предусматривает описание предметной области и формализацию ее модели. Разработка предметной области состоит из нескольких этапов, одним из которых является построение ее концептуальной схемы. В свою очередь, решение этой задачи сводится к определению границ самой предметной области, выделению объектов и их атрибутов, а также установлению фактов зависимости одних атрибутов от значений других [1].

Разработка методики определения границ предметной области на основе декомпозиции задач прогнозирования с последующей их обработкой и является целью исследования в настоящей статье.

Для определения границ предметной области введем понятие концептуальной схемы, под которым будем понимать схему, состоящую из объектов, их атрибутов и отношений и представленную парой  $\langle Ra, Rd \rangle$ , где  $Ra$  — отношение, интерпретируемое как „иметь атрибут“;  $Rd$  — отношение „зависеть от“.

Будем считать, что концептуальная схема предметной области оптимальна, если она содержит только те объекты, атрибуты и отношения, которые необходимы для задач прогнозирования.

Отношение  $Ra$  может быть представлено как множество имен объектов  $O$  и множество имен атрибутов  $A$ , т.е.

$$Ra = \{ \langle o, a \rangle : o \text{ имеет атрибут } a \}, Ra \in O \times A; o \in O, a \in A.$$

Задача определения значений атрибута объекта формулируется следующим образом: имеется множество вариантов решения, реализация каждого из которых приводит к наступлению некоторых последствий. Каждый вариант однозначно характеризуется критериальной оценкой. Требуется на основе системы предпочтений экспертов определить критериальную оценку каждого варианта и осуществить выбор вариантов, имеющих критериальную оценку ниже требуемой. Таким образом, постановку задачи определения значений атрибута объекта можно определить кортежем

$$\langle \langle o, a \rangle, \Phi, \tilde{X}, K_f, E, S_n, W \rangle,$$

где  $\Phi$  — нечеткое множество вариантов, являющихся множеством несовместимых событий;  $\tilde{X}$  — нечеткое множество исходов или значения атрибута;  $K_f$  — критерий выбора варианта, осуществляемого экспертом;  $E$  — условия, в которых осуществляется выбор вариантов;  $S_n$  — система предпочтений экспертов;  $W$  — требуемое действие над множеством вариантов (выбор, ссылка, пересечение множеств и т.п.).

Значение  $\Phi$  может быть получено с помощью процедуры, определяемой экспертами, которая заключается в выделении из домена (области определения атрибута) подмножеств, являющихся несовместимыми событиями, и соединении элементов подмножеств с помощью синтаксической процедуры в семантически правильные конструкции. Будем считать, что значение одного атрибута зависит от значений другого атрибута, если

$$\exists (\tilde{x}_i^{(1)} \neq \tilde{x}_j^{(2)}) (\tilde{x}_j^{(1)} \rightarrow \tilde{x}_i^{(1)}, \tilde{x}_j^{(2)} \rightarrow \tilde{x}_i^{(2)}) (\tilde{x}_i^{(1)} \neq \tilde{x}_i^{(2)}), \quad (1)$$

где  $\tilde{x}_i^{(1)}, \tilde{x}_i^{(2)}, \tilde{x}_j^{(1)}, \tilde{x}_j^{(2)}$  — значения атрибутов объектов.

Любая пара  $\langle o, a \rangle \in Ra$  однозначно идентифицирует постановку задачи определения значений атрибута  $a$  и объекта  $o$  и может выступать в качестве имени задачи.

Количество постановок задач  $Kz$  в предметной области обуславливается мощностью пар объектов и их атрибутов и определяется как  $Kz = |Ra|$ , а множество постановок задач прогнозирования может быть выражено через отношение  $Ra$ , т.е.

$$Ra^{(пр)} = \{ (\text{„определение возможных вариантов решения научно-практических проблем“}, \text{„прогнозы научно-технического прогресса“}), (\text{„определение возможных вариантов решения научно-практических проблем“}, \text{„экономические прогнозы“}), (\text{„экономические прогнозы“}, \text{„цены на энергоносители“}) \}.$$

Отношение  $Rd$  — „зависеть от“ — определяется как  $Rd \subseteq Ra \times Ra$ .

При этом считается, что  $\langle \langle o, a \rangle_i, \langle o, a \rangle_j \rangle \in Rd$ , если выполняется условие (1). Выделим из множества  $Rd$  подмножества  $Rd^{(k)}$ , у которых левые части отношений  $Rd$  совпадают, т.е. справедливо условие

$$\forall (\langle \langle o, a \rangle_i, \langle o, a \rangle_j \rangle \in Rd^{(k)}, \langle \langle o, a \rangle_m, \langle o, a \rangle_n \rangle \in Rd^{(k)}) \Rightarrow (\langle o, a \rangle_i = \langle o, a \rangle_m),$$

здесь  $i, j, m, n$  — целочисленные индексы.

Построим множество  $F^{(k)}(o, a)_i = \{\langle o, a \rangle_j\}$ , такое что

$$\forall \langle o, a \rangle_j (\langle o, a \rangle_j \times F^{(k)}(o, a)_i = Rd^{(k)}),$$

т.е.  $F^{(k)}(o, a)_i$  представляет собой множество элементов правых частей  $Rd^{(k)}$ , которое назовем множеством факторов. Пару  $\langle o, a \rangle_j \in F^{(k)}(o, a)_i$  назовем фактором, определяющим величину  $\tilde{x}_i$ , и будем считать, что эта величина зависит от значений атрибутов объектов, принадлежащих множеству факторов  $F^{(k)}(o, a)_i$ . Таким образом, каждый фактор можно рассматривать как имя подзадачи главной задачи. В свою очередь, подзадачи могут иметь другие подзадачи и т.д.

Поскольку рассматриваемая предметная область является довольно сложной, для определения ее границ используем метод анализа иерархий [2], суть которого заключается в декомпозиции задач прогнозирования на более простые составляющие части с последующей обработкой последовательности суждений экспертов. Декомпозиция при этом производится таким образом, что каждый атрибут объекта нижнего уровня может выступать в качестве критерия для атрибута объекта высшего уровня.

Введем следующие предположения.

1. Определение границ предметной области возможно путем декомпозиции задач на подзадачи и выделении „фрагмента“ предметной области, описывающего решения конкретной подзадачи.

2. Процесс решения экспертом  $l$ -й задачи прогнозирования представляется некоторым числом шагов  $K$  таким образом, что на  $k$ -м шаге определяется значение атрибута с именем  $a$  объекта  $o$ , и имеет место постановка задачи  $\langle o, a \rangle_i$ :

$$Ra^{(l,k)} = \langle o, a \rangle_i \cup Ra^{(l,k-1)}, Ra^{(l,k)} \subseteq Ra.$$

Если  $l=1$  и  $k=1$ , то  $Ra^{(l,k)}=0$ . Множество  $Ra^{(l,k)}$  при этом является множеством выделенных пар  $\langle o, a \rangle_i$  при решении  $l$ -й задачи прогнозирования на  $k$ -м шаге декомпозиции. Постановка задачи  $\langle o, a \rangle_i$  осуществляется только при выполнении условия  $\langle o, a \rangle_i \cap Ra^{(l,k-1)} = 0$ , т.е. если постановка данной задачи не осуществлялась на предыдущих шагах декомпозиции.

3. На каждом шаге решения  $l$ -й задачи эксперт определяет некоторое множество  $F^{(k)}(o, a)_i$ , такое что  $\langle o, a \rangle_i \times F^{(k)}(o, a)_i \subseteq Rd$ , т.е. определяет множество пар имен объектов и имен атрибутов, от значений которых зависит значение атрибута на данном шаге.

4. Декомпозиция задач на подзадачи осуществляется до того момента, пока

$$\forall (\langle o, a \rangle_j \in F^{(k)}(o, a)_i) : (F^{(k)}(o, a)_i = 0), \quad (2)$$

т.е. для задачи  $\langle o, a \rangle_j \exists \tilde{x}_j$  существует определенное множество констант или исходных данных, которые должны быть известны эксперту.

Таким образом, число шагов  $K$  есть конечное целое, определяющее границы предметной области. Эту величину будем называть размером предметной области, которая будет определять пространство поиска решений задач прогнозирования.

Декомпозиция задач на подзадачи начинается постановкой одной из задач множества  $Ra^{(pp)}$ . При полной декомпозиции и выполнении условия (2) получим

$$Ra = Ra^{(pp)} \bigcup_i \left( \bigcup_{k=1}^K F^{(k)}(o, a)_i \right), Rd = \bigcup_i (< o, a >_i \times F^{(k)}(o, a)_i). \quad (3)$$

Элементы множеств  $Ra$ ,  $Rd$  в выражении (3) являются решением задачи построения концептуальной структуры предметной области.

Наиболее существенным этапом при построении базы знаний представляется выявление необходимых для решения задач прогнозирования имен объектов, имен их атрибутов и наиболее общих отношений для формирования концептуальной схемы предметной области.

Решение задачи выделения имен объектов и имен атрибутов из семантической информации, предоставляемой экспертами, может рассматриваться как преобразование первичной семантической информации  $Sp$  (ответов экспертов) во вторичную  $Sv$  (имена объектов и имена атрибутов) посредством сжатия первичной. Тогда формально такое преобразование может быть представлено отношением  $Sp Sm Sv$ , где  $Sm$  — знак семантического преобразования.

Вторичная семантическая информация отражает результаты преобразования первичной семантической информации и является ее моделью. При сжатии первичной семантической информации используется модельный способ, общими понятиями которого являются объекты, атрибуты и домены [3]. В результате из первичной семантической информации выделяется множество имен объектов и имен их атрибутов. Введение понятия домена в формальную модель объясняется тем, что значения доменов используются при построении полной модели предметной области управления предприятием.

По результатам выполнения методики формируется итоговая таблица, в графах которой указываются соответственно идентификатор эксперта, предоставившего первичную семантическую информацию, имя выделенного объекта, имя атрибута и значение домена соответствующего атрибута объекта.

После завершения  $k$ -го шага декомпозиции выделенные факторы ранжируются по важности методом парных сравнений, рассмотренным в работе [4].

Предложенная методика построения концептуальной схемы предметной области описывает зависимости значений атрибутов одних объектов от значений атрибутов других, а построенная на ее основе модель дает возможность автоматизировать процесс формирования полной модели управления развитием предприятия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Циркритус Д., Лоховский Ф. Модели данных. М.: Финансы и статистика, 1985.
2. Попов Э. В. Экспертные системы: Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. М.: Наука, 1987.
3. Поспелов Д. А. Моделирование рассуждений: опыт и анализ мыслительной деятельности. М.: Радио и связь, 1989.
4. Рабочая книга по прогнозированию. М.: Мысль, 1982.

Рекомендована кафедрой  
программного обеспечения вычислительной  
техники и автоматизированных систем  
Оренбургского государственного университета

Поступила в редакцию  
06.12.07 г.

---

---

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК 629.7

М. В. ЛЕВСКИЙ

*НИИ космических систем  
Сергиев Посад*

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Приводится аналитическое решение задачи управления пространственным разворотом космического аппарата за заданное время с минимальным нагружением его конструкции. Момент начала торможения определяется исходя из принципов терминального управления, что существенно повышает точность приведения аппарата в заданное положение.

**Введение.** Исследованию задачи оптимального управления переориентацией твердого тела посвящено множество публикаций, в которых приводятся различные постановки задачи и используется широкий спектр методов ее решения. Однако динамические нагрузки, возникающие во время пространственного разворота космического аппарата (КА), прежде не учитывались. Нахождению оптимального режима пространственной переориентации КА с минимальным нагружением его конструкции с учетом влияния кинетического фактора и посвящена настоящая статья.

**Уравнения движения и постановка задачи.** Движение связанного базиса **E** относительно опорного базиса **I** зададим кватернионом  $\Lambda$  [1]. Будем считать, что опорной является инерциальная система координат (ИСК). В этом случае уравнения углового движения КА имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= J_1 \dot{\omega}_1 + (J_3 - J_2) \omega_2 \omega_3, \quad M_2 = J_2 \dot{\omega}_2 + (J_1 - J_3) \omega_1 \omega_3, \quad M_3 = J_3 \dot{\omega}_3 + (J_2 - J_1) \omega_1 \omega_2; \\ 2\dot{\lambda}_0 &= -\lambda_1 \omega_1 - \lambda_2 \omega_2 - \lambda_3 \omega_3, \quad 2\dot{\lambda}_1 = \lambda_0 \omega_1 + \lambda_2 \omega_3 - \lambda_3 \omega_2; \\ 2\dot{\lambda}_2 &= \lambda_0 \omega_2 + \lambda_3 \omega_1 - \lambda_1 \omega_3, \quad 2\dot{\lambda}_3 = \lambda_0 \omega_3 + \lambda_1 \omega_2 - \lambda_2 \omega_1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $J_i$  — главные центральные моменты инерции КА;  $M_i$  — проекции главного момента внешних сил на главные центральные оси эллипсоида инерции аппарата;  $\omega_i$  — проекции вектора  $\boldsymbol{\omega}$  абсолютной угловой скорости на оси связанного базиса **E**, образованного главными центральными осями эллипсоида инерции КА,  $i = 1, 2, 3$ ;  $\lambda_j, j = 0, 1, 2, 3$ , — компоненты кватерниона  $\Lambda$ , определяющего ориентацию связанных с КА осей относительно ИСК, причем  $\lambda_0^2 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 1$ .

Граничные условия положения КА и его угловой скорости зададим в следующем виде:

$$\Lambda(0) = \Lambda_n, \omega(0) = \omega_0; \tag{2}$$

$$\Lambda(T) = \Lambda_k, \omega(T) = \omega_T, \tag{3}$$

где  $T$  — время разворота; кватернионы  $\Lambda_n$  и  $\Lambda_k$ , задающие ориентацию связанных с КА осей в начальный и конечный моменты времени, известны априори.

Изменение ориентации КА происходит путем воздействия на него моментов  $M_i$ . Считаем, что при управлении движением КА существенным является ограничение скоростных параметров движения  $\omega_i$ . Возможна следующая постановка задачи оптимального управления разворотом: требуется перевести связанную с КА систему координат  $OXYZ$  из начального углового положения  $\Lambda_n = \Lambda(0)$  в требуемое конечное положение  $\Lambda_k = \Lambda(T)$  в течение заданного времени  $T = T_3$  с учетом дифференциальных связей (1). При этом значение кинетического фактора  $Q = K_1\omega_1^2 + K_2\omega_2^2 + K_3\omega_3^2$  (где  $K_1, K_2, K_3$  — постоянные положительные коэффициенты), характеризующего степень нагружения КА при его вращении, должно быть минимальным:

$$H = \max_{0 < t < T} (K_1\omega_1^2 + K_2\omega_2^2 + K_3\omega_3^2) \rightarrow \min.$$

Прямыми методами решить эту задачу достаточно трудно. Полагаем, что время на переходных участках разгона и торможения КА мало по сравнению с временем разворота, и рассмотрим задачу оптимального разворота КА в импульсной постановке, т.е. кинематическую задачу разворота. В качестве оптимизируемого функционала примем величину

$$G = 2 \int_0^T f_0 dt + G_0, \quad G_0 = G(0) = K_1\omega_{10}^2 + K_2\omega_{20}^2 + K_3\omega_{30}^2; \tag{4}$$

$$f_0 = \begin{cases} K_1\dot{\omega}_1\omega_1 + K_2\dot{\omega}_2\omega_2 + K_3\dot{\omega}_3\omega_3, & \text{если } \sum_{i=1}^3 K_i\omega_i\dot{\omega}_i > 0; \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^3 K_i\omega_i\dot{\omega}_i \leq 0. \end{cases}$$

Задачу оптимального управления сформулируем следующим образом: необходимо перевести КА из начального углового положения в конечное (см. формулы (2), (3)) в соответствии с уравнениями (1) при условии, что время маневра ограничено величиной  $T_3$ , при этом значение функционала  $G$  (а значит, и  $H$ ) должно быть минимальным.

**Решение задачи оптимального управления.** Наличие интегрального показателя  $G$  позволяет применить принцип максимума Понтрягина и найти необходимые условия оптимальности [2]. Введем сопряженные переменные  $\psi_j, j = 0, 1, 2, 3$ , соответствующие компонентам  $\lambda_j$  кватерниона. Переменная  $f_0$  соответствует критерию оптимальности (значению функционала  $G$ ). Функция Понтрягина (гамильтонова функция) задачи определяется как

$$\Gamma = -f_0 + \Gamma_k,$$

где

$$\Gamma_k = -0,5\psi_0(\lambda_1\omega_1 + \lambda_2\omega_2 + \lambda_3\omega_3) + 0,5\psi_1(\lambda_0\omega_1 + \lambda_2\omega_3 - \lambda_3\omega_2) + 0,5\psi_2(\lambda_0\omega_2 + \lambda_3\omega_1 - \lambda_1\omega_3) + 0,5\psi_3(\lambda_0\omega_3 + \lambda_1\omega_2 - \lambda_2\omega_1).$$

Уравнения для сопряженных функций  $\psi_j$  имеют вид  $\dot{\psi}_j = -\partial\Gamma/\partial\lambda_j, j = \overline{0, 3}$ .

В рассматриваемой задаче оптимального управления разворотом КА значение функционала качества  $G$  не зависит от позиционных координат  $\lambda_j, \partial f_0/\partial\lambda_j = 0$ .

Сопряженная система дифференциальных уравнений может быть записана следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}_0 &= -0,5(\psi_1\omega_1 + \psi_2\omega_2 + \psi_3\omega_3), \dot{\psi}_1 = 0,5(\psi_0\omega_1 + \psi_2\omega_3 - \psi_3\omega_2), \\ \dot{\psi}_2 &= 0,5(\psi_0\omega_2 + \psi_3\omega_1 - \psi_1\omega_3), \dot{\psi}_3 = 0,5(\psi_0\omega_3 + \psi_1\omega_2 - \psi_2\omega_1). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В результате преобразований функции  $\Gamma_k$  получим

$$\Gamma_k = 0,5\omega_1(\lambda_0\psi_1 + \lambda_3\psi_2 - \lambda_1\psi_3 - \lambda_2\psi_3) + 0,5\omega_2(\lambda_0\psi_2 + \lambda_1\psi_3 - \lambda_2\psi_0 - \lambda_3\psi_1) + \\ + 0,5\omega_3(\lambda_0\psi_3 + \lambda_2\psi_1 - \lambda_3\psi_0 - \lambda_1\psi_2) = 0,5(\omega_1 p_1 + \omega_2 p_2 + \omega_3 p_3),$$

где

$$\begin{aligned} p_1 &= \lambda_0\psi_1 + \lambda_3\psi_2 - \lambda_1\psi_0 - \lambda_2\psi_3; \\ p_2 &= \lambda_0\psi_2 + \lambda_1\psi_3 - \lambda_2\psi_0 - \lambda_3\psi_1; \\ p_3 &= \lambda_0\psi_3 + \lambda_2\psi_1 - \lambda_3\psi_0 - \lambda_1\psi_2. \end{aligned}$$

Для понижения порядка системы достаточно предположить, что  $p_1, p_2, p_3$  являются проекциями некоторого вектора  $\mathbf{p}$  на оси связанного базиса  $\mathbf{E}$ . Из уравнений (5) следует, что совокупность переменных  $\psi_0, \psi_1, \psi_2, \psi_3$  обладает свойствами кватерниона  $\Psi$ , для которого справедливо соотношение  $2\dot{\Psi} = \Psi \circ \boldsymbol{\omega}$ . Тогда вектор  $\mathbf{p}$  может быть записан в кватернионной форме:  $\mathbf{p} = \text{vect}(\tilde{\Lambda} \circ \Psi)$ , здесь  $\text{vect}$  — операция выделения векторной части кватерниона, а  $\Gamma_k = -\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{p} / 2$ .

Изменение вектора  $\mathbf{p}$  определяется решением системы уравнений

$$\dot{p}_1 = \omega_3 p_2 - \omega_2 p_3, \dot{p}_2 = \omega_1 p_3 - \omega_3 p_1, \dot{p}_3 = \omega_2 p_1 - \omega_1 p_2 \quad (6)$$

или в векторной форме

$$\dot{\mathbf{p}} = -\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{p}. \quad (7)$$

Полученное дифференциальное уравнение (7) отражает вращение вектора  $\mathbf{p}$  с угловой скоростью  $-\boldsymbol{\omega}$  относительно связанного базиса  $\mathbf{E}$ , который совершает угловое движение относительно опорного базиса  $\mathbf{I}$  с угловой скоростью  $\boldsymbol{\omega}$ . В результате вектор  $\mathbf{p}$  является неподвижным в опорной системе отсчета. Так как  $|\mathbf{p}| = \text{const}$ , полагаем в дальнейшем вектор  $\mathbf{p}$  нормированным:  $|\mathbf{p}| = 1$ .

Таким образом, задача определения оптимального управления сводится к решению системы уравнений углового движения КА и уравнений (6) при том, что управление выбрано исходя из условия максимизации гамильтониана. Сопряженная система (5) заменяется системой уравнений (6), характеризующих поведение вектора  $\mathbf{p}$  относительно связанных осей. Семейство решений  $\mathbf{p}(t)$  определяется значениями  $\Lambda_n$  и  $\Lambda_k$  [1]:

$$\mathbf{p} = \tilde{\Lambda} \circ \mathbf{c}_E \circ \Lambda, \mathbf{c}_E = \Lambda_n \circ \mathbf{p}(0) \circ \tilde{\Lambda}_n = \text{const}.$$

Граничные условия  $\Lambda_n, \Lambda_k$  и условия максимума функции  $\Gamma$  определяют искомое решение  $\boldsymbol{\omega}(t)$ . Для того чтобы КА имел требуемую ориентацию  $\Lambda(T) = \Lambda_k$  в конечный момент времени  $t = T$ , необходимо оценить вектор  $\mathbf{c}_E$  (или значение вектора  $\mathbf{p}$  в момент времени  $t = 0$ ) исходя из получающихся решений системы (1).

Управляющими переменными (управлениями) будем считать проекции угловой скорости  $\omega_i, i = \overline{1, 3}$ , а моменты  $M_i$ , необходимые для поддержания оптимального режима вращения, рассчитываются согласно динамическим уравнениям Эйлера. Исходная задача оптимального управления сводится к нахождению функции  $\boldsymbol{\omega}(t)$  в интервале между участками разгона и торможения, минимизирующей функционал (4), в котором за  $G_0$  принимается значение функционала  $G$  на момент времени, соответствующий окончанию набора угловой скорости (начало участка номинального движения), и с этого же момента начинается интегрирование функции  $f_0$ .



Вследствие того, что  $f_0 \geq 0$ , условие оптимальности (максимум функции  $\Gamma$ ) будет соблюдаться при  $f_0 = 0$ , при этом  $G = \text{const}$ . Оптимальный разворот КА с минимальной степенью динамического нагружения  $H$  на этапе между моментами разгона и торможения происходит при  $Q = \text{const}$ . Необходимое условие оптимальности представляется как  $\Gamma_k \rightarrow \text{max}$ .

Использование уравнений (1)–(3), равенства  $Q = \text{const} = Q_0$  и требование максимальности функции  $\Gamma_k$  приводят к решению замкнутой задачи определения условного экстремума. Значение  $Q_0$  должно быть таким, чтобы маневр переориентации КА был завершен в установленное время  $T_3$ . Для получения уравнений, характеризующих оптимальное решение, введем новые переменные:  $q_i = \sqrt{K_i} \cdot \omega_i$  и  $\mu_i = p_i / \sqrt{K_i}$ ,  $i = \overline{1, 3}$ , тогда  $\Gamma_k = 0,5(q_1\mu_1 + q_2\mu_2 + q_3\mu_3)$ . Очевидно,  $\Gamma_k \rightarrow \text{max}$  при условии  $q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = Q_0$ , когда векторы  $\mathbf{q} = \{q_1, q_2, q_3\}$  и  $\boldsymbol{\mu} = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3\}$  коллинеарны. При этом выполняются соотношения

$$q_i = \frac{\sqrt{Q_0} \cdot p_i}{\sqrt{K_i} \cdot \sqrt{p_1^2/K_1 + p_2^2/K_2 + p_3^2/K_3}}.$$

Оптимальное движение КА полностью определяется системой дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{p}} + \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{p} = 0, \quad \omega_i = \frac{\sqrt{Q_0} \cdot p_i}{K_i \sqrt{p_1^2/K_1 + p_2^2/K_2 + p_3^2/K_3}} \quad (8)$$

при обеспечении краевых условий  $\Lambda(0) = \Lambda_n$ ,  $\Lambda(T) = \Lambda_k$  для решения уравнений (1).

Задача построения оптимального управления заключается в нахождении такого значения вектора  $\mathbf{p}(0)$ , при котором в результате движения КА согласно уравнениям (1), (6), (8) выполняется равенство  $\Lambda(T) = \Lambda_k$ . Общее решение приведенной системы уравнений осуществить практически невозможно. Трудность заключается в определении граничных условий  $\mathbf{p}(0)$  и  $\mathbf{p}(T)$ , связанных соотношением  $\mathbf{p}(T) = \tilde{\Lambda}_k \circ \Lambda_n \circ \mathbf{p}(0) \circ \tilde{\Lambda}_n \circ \Lambda_k = \tilde{\Lambda}_p \circ \mathbf{p}(0) \circ \Lambda_p$ , где  $\Lambda_p = \tilde{\Lambda}_n \circ \Lambda_k$  — кватернион разворота.

При искомом решении  $\boldsymbol{\omega}(t)$  на участке номинального движения  $K_1\omega_1^2 + K_2\omega_2^2 + K_3\omega_3^2 = R = \text{const}$ ,  $K_1^2\omega_1^2 + K_2^2\omega_2^2 + K_3^2\omega_3^2 = D = \text{const}$ .

Оптимизация сводится к минимизации величины  $Q_0$  (при условии, что через время  $T=T_3$  КА достигнет положения  $\Lambda_k$ ). Фактическая ограниченность управления скоростью  $\dot{\omega}_i$  (или моментом  $M_i$ ) качественно не меняет характера траектории движения  $\Lambda(t)$ . Основное соотношение для рассмотренного разворота сохраняется, т.е.  $\omega_i = b(t)p_i/K_i$ , где  $b(t)$  — скалярная функция времени (причем в интервале между моментами разгона и торможения  $b = \text{const}$ ).

Для симметричного распределения нагрузок ( $K_2 = K_3$ ) решение поставленной задачи может быть найдено в аналитическом виде. Оптимальное движение КА соответствует его одновременному вращению вокруг своей продольной оси  $OX$  и вокруг некоторого вектора  $\boldsymbol{\eta}$ , неподвижного в инерциальном пространстве и составляющего с продольной осью КА расчетный угол  $\vartheta$ . Для случая регулярной прецессии справедливо

$$e^{\mathbf{p}_0\beta/2} \circ e^{\mathbf{e}_1\alpha/2} = \tilde{\Lambda}_n \circ \Lambda_k,$$

где  $\mathbf{p}_0 = \mathbf{p}(0)$ ;  $\mathbf{e}_1$  — орт продольной оси КА;  $\alpha, \beta$  — углы поворота КА вокруг своей продольной оси и вокруг вектора  $\mathbf{p}$  соответственно.

Оптимизация заключается в определении таких значений углов  $\vartheta, \alpha$  и  $\beta$ , при которых значение кинетического фактора  $Q$  в процессе разворота минимально [3].

Необходимое для синтеза оптимального управления решение  $\mathbf{p}(t)$  имеет вид

$$p_1 = p_{10} = \cos\vartheta; p_2 = \sin\vartheta \sin(\dot{\alpha}t + \sigma); p_3 = \sin\vartheta \cos(\dot{\alpha}t + \sigma), \sigma = \arctg(p_{20}/p_{30}).$$

Программные значения проекций вектора угловой скорости  $\omega^*$  на связанные оси следующие:

$$\omega_1^* = \omega_{10} = \dot{\alpha} + \dot{\beta} \cos\vartheta; \omega_2^* = \dot{\beta} p_2 = \dot{\beta} \sin\vartheta \sin(\dot{\alpha}t + \sigma), \omega_3^* = \dot{\beta} p_3 = \dot{\beta} \sin\vartheta \cos(\dot{\alpha}t + \sigma).$$

Требуемый программный разворот КА из начального  $\Lambda_n$  в заданное  $\Lambda_k$  угловое положение за время  $T$  обеспечивается путем поддержания программной угловой скорости вращения КА с высокой точностью. Наилучшим является применение систем, построенных в соответствии с принципом управления по ускорению [4].

Практическое значение имеют задачи, в которых граничные значения  $\omega_0 = \omega_T = 0$ . На участках набора требуемой угловой скорости и ее гашения значение момента  $M$  должно быть максимально возможным, а вращение КА происходит с максимальным угловым ускорением. Чтобы реализовать управление по описанному выше способу, необходимо знать величину угла  $\gamma$  разворота, который предстоит совершить, а также текущие значения углового рассогласования  $\varphi$  и угловой скорости  $\omega$  во время выполнения этого разворота. Тогда система ориентации сможет выработать в нужный момент команды на прекращение разгона и начало торможения с таким расчетом, чтобы к моменту поворота на угол  $\gamma$  КА был полностью заторможен ( $\omega = 0$ ). Для обеспечения условия терминальности (требования окончания разворота строго в назначенное время  $T$ ) приходится несколько увеличивать расчетную скорость разворота. Полагая ограничение управлений в виде  $|\dot{L}| \leq m$  (здесь  $L$  и  $m$  — значение кинетического момента КА и максимальное значение управляющего момента) и считая линейным закон изменения угловой скорости на этапах разгона и торможения, получаем условие начала торможения:

$$\int_0^T \left( |\omega_1| + \sqrt{\omega_2^2 + \omega_3^2} \right) dt + \left( |\omega_1| + \sqrt{\omega_2^2 + \omega_3^2} \right) \tau / 2 = \theta, \quad \theta = |\alpha + \beta \cos \vartheta| + \beta \sin \vartheta,$$

где  $\tau = (T - \sqrt{T^2 - 4S/m})/2$  — время разгона (и торможения),  $S = \sqrt{J_1^2 (\alpha + \beta \cos \vartheta)^2 + J^2 \beta^2 \sin^2 \vartheta}$ .

Критерий формирования сигнала на торможение определяется выражением

$$\left( |\omega_1| + \sqrt{\omega_2^2 + \omega_3^2} \right) \tau = 2\theta\varphi/\gamma,$$

где  $\gamma = 2\arccos(\text{sqal}(\Lambda_n \circ \tilde{\Lambda}_k))$ ,  $\varphi = 2\arccos(\text{sqal}(\Lambda \circ \tilde{\Lambda}_k))$ , здесь  $\text{sqal}$  — операция выделения скалярной части кватерниона.

Расчетные значения управляющих моментов  $M_i$  определяются исходя из условия движения КА по заданной кинематической траектории согласно программе управления  $\omega^*(t)$ .

**Пример математического моделирования.** Приведем решение задачи оптимального управления программным разворотом КА при минимальном значении кинетического фактора  $Q$ . В результате решения кинематической задачи ориентации по переводу КА из положения  $\Lambda(0) = \Lambda_n$  в положение  $\Lambda(T) = \Lambda_k$  (задачи оптимального разворота в импульсной постановке) было получено расчетное значение вектора  $\mathbf{p}_0$ . Для  $K_1 = 0,31$ ;  $K_2 = 1,67$ ;  $K_3 = 1,61$ ,  $\Lambda_n = \{1, 0, 0, 0\}$ ,  $\Lambda_k = \{0,5000; 0,6548; 0,5200; 0,2248\}$  и  $\omega_0 = \omega_T = 0$  определено  $\mathbf{p}_0 = \{0,2599; 0,4118; 0,8734\}$ . Время разгона и торможения  $\tau = 50$  с. Результаты математического моделирования процесса разворота при оптимальном управлении, минимизирующем динамические нагрузки, представлены на рис. 1 графиками изменения угловых скоростей в связанной с КА системе координат  $\omega_1(t)$ ,  $\omega_2(t)$ ,  $\omega_3(t)$  по времени. На рисунке отчетливо видны три характерных этапа —

разгон (набор угловой скорости), движение КА с постоянным по критерию  $Q$  динамическим нагружением ( $Q = Q_{\max}$ ) и торможение аппарата (гашение угловой скорости до нуля). На рис. 2 приведена динамика изменения координат  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ ,  $p_3(t)$  во времени, а рис. 3 иллюстрирует поведение компонент кватерниона  $\Lambda(t)$ , определяющего текущую ориентацию КА в процессе совершаемого маневра:  $\lambda_0(t)$ ,  $\lambda_1(t)$ ,  $\lambda_2(t)$ ,  $\lambda_3(t)$ . В отличие от переменных  $\omega_i$  переменные  $p_i$  и  $\lambda_j$  являются гладкими функциями.

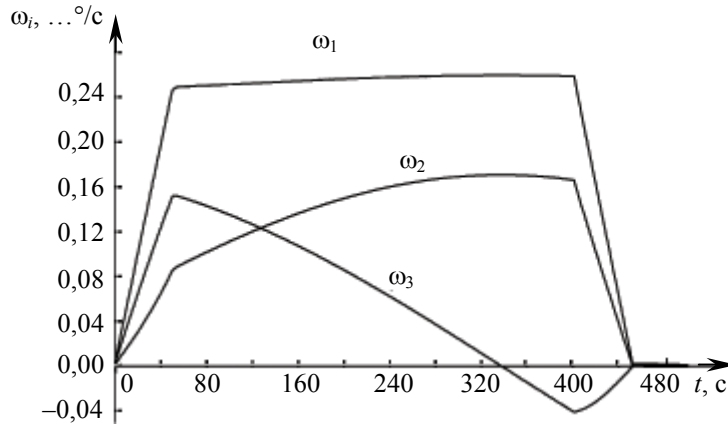


Рис. 1

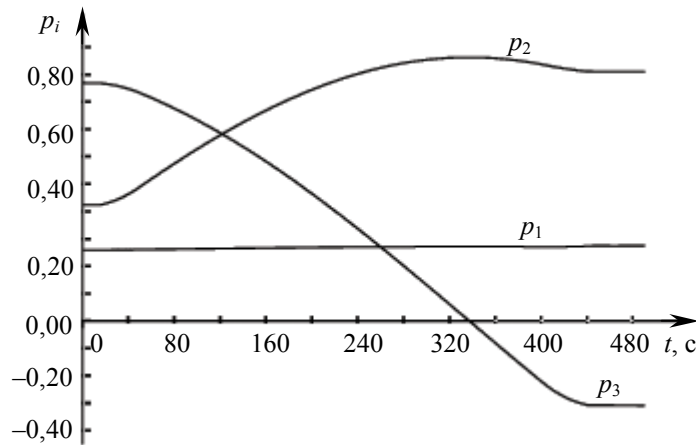


Рис. 2

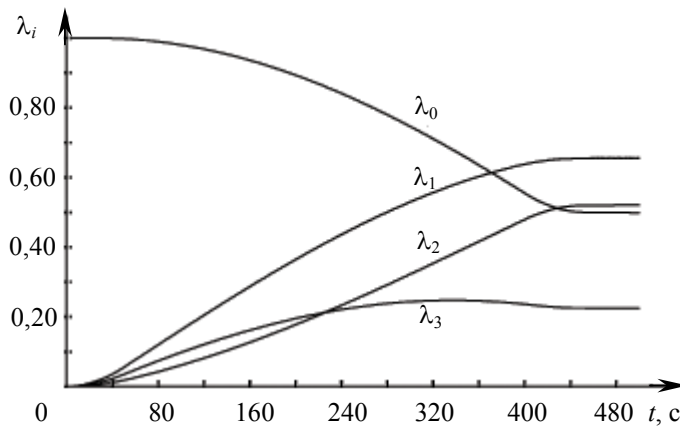


Рис. 3

**Заключение.** Итак, рассмотрена и решена задача оптимального пространственного разворота твердого тела из его начального углового положения в требуемое конечное. Время разворота считается известным. Для оптимизации программы управления минимизируется функционал, отражающий степень нагружения конструкции. На основе метода кватернионов найдено аналитическое решение поставленной задачи. Для частного случая, когда КА имеет ось симметрии, представлено полное решение в замкнутой форме. Учет ограниченности

управляющих моментов производится выбором момента, с которого начинается торможение, по измерениям текущих параметров движения. Эффективность разработанного способа управления подтверждена данными математического моделирования.

Предложенный способ управления переориентацией КА позволяет значительно уменьшить динамические нагрузки, вызванные вращением КА около центра масс, что особенно важно в случаях, когда кинетический фактор оказывается определяющим для штатного функционирования КА и его бортовых систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.
  2. Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1969. 408 с.
  3. Пат. 2153446RU, МКИ<sup>7</sup> В64 G1/24, G06 G7/66, 7/122. Устройство определения параметров регулярной прецессии (варианты) / М. В. Левский // Бюл. 2000. № 21.
  4. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. М.: Наука, 1988. 328 с.
- Рекомендована Институтом Поступила в редакцию  
12.12.06 г.

УДК 62-50

Б. А. КРАШЕНИННИКОВ

*Балтийский государственный технический университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова  
Санкт-Петербург*

### **АКТИВНОЕ ОПТИМАЛЬНОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ**

Рассматривается задача автоматического управления динамикой колебаний кузова автомобиля. Представлены решения задачи оптимального управления силой воздействия на кузов с использованием различных критериев. Показана возможность формирования на борту в реальном времени оптимальных значений силового воздействия для обеспечения плавности хода.

Автомобиль является современным средством передвижения, эксплуатация которого производится в различных условиях. В случае вертикальных колебаний вследствие неровностей дорожного покрытия водитель не может самостоятельно вмешаться в управление движением автомобиля [1—3]. Усложнение математических моделей движения автомобиля в целях повышения уровня их адекватности реальному процессу связано с трудностями применения к ним современных методов исследования. В первую очередь, это касается проблемы оптимального управления автомобилем, так как реализовать такой алгоритм возможно лишь для простейших моделей. С другой стороны, управление автомобилем как сложной системой можно реализовать с помощью адаптивной информационной модели, используя алгоритмы на основе теории самоорганизующихся оптимальных регуляторов с экстраполяцией (СОРЭ) Красовского [4—6]. При этом в критерии качества вводятся заданные значения выходных показателей исследуемой системы, найденные, например, с помощью решения задачи оптимизации динамики простейшей модели.

В настоящей статье рассматриваются возможности активного оптимального демпфирования колебаний кузова автомобиля с использованием различных критериев качества (целевых функционалов) на примере:

- 1) критерия максимального быстродействия;
- 2) алгоритма управления с фиксированной программой прогноза движения;
- 3) критерия плавности хода с минимизацией затрат на ускорение кузова;
- 4) алгоритма, минимизирующего критерий Красовского;
- 5) алгоритма, минимизирующего иерархию из двух критериев Красовского.

В работе [1] представлено решение задачи оптимального управления силой воздействия на кузов по принципу максимума с учетом ограничений на средний квадрат ускорения кузова. В качестве модели использована простейшая модель  $\ddot{x} = u$ . Профиль дороги считался известным.

Представим указанную модель в виде

$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

где  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ;  $x = (x_1, x_2)^T$ ;  $B = (0, 1)^T$ ;  $u_2 = w/m$  — управление, здесь  $m$  — масса кузова;

$w$  — сила, передаваемая подвеской на кузов;  $x_1, x_2$  — вертикальные координата и скорость кузова соответственно.

Задача оптимального управления положением кузова решается с помощью минимизации различных критериев качества.

1. Использование принципа максимума [4] для решения задачи максимального быстродействия при переводе системы из состояния  $x(t_0)$  в состояние  $x_g(t_f)$  с ограничением

$|u(t)| \leq u_m$  и минимизируемым критерием качества  $I = \int_{t_0}^{t_f} dt$  приводит к переключению управ-

ления с одного предельного положения на другое в некоторый момент времени  $\tau$  ( $t_0$  и  $t_f$  — начальный и конечный моменты времени оптимизации). Численное моделирование при шаге интегрирования  $\Delta t = 0,01$  с,  $x_{1g}(t_f) = 0$ ,  $x_{2g}(t_f) = 0$  и  $u_m = 2,1$  Н/кг дает следующие значения:  $\tau = 1,24$  с,  $t_f = 2,01$  с,  $x_1(t_f) = 0,013$  м,  $x_2(t_f) = 0,0045$  м/с.

Алгоритм формирует оптимальную программу управления положением кузова на интервале  $[t_0, t_f]$ . Во время движения характеристики профиля дороги  $x_{1g}(t_f) = x_{1f}$ ,  $x_{2g}(t_f) = x_{2f}$  изменяются ( $t_0 = t$ ,  $t_f = t + T$  — скользящий интервал оптимизации,  $T$  — заданная величина), и алгоритм нужно применять заново.

2. Для упрощения процедуры пересчета управления можно использовать алгоритм управления с фиксированной программой прогноза движения. При этом за управление  $v$  принимается производная момента  $\tau$  переключения управления  $u$ , т.е.  $\dot{\tau} = v$ . В качестве минимизируемого выбирается критерий Красовского [4]

$$I = V_g(x, t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \frac{v^2 + v_0^2}{k^2} dt,$$

где  $V_g = \frac{1}{2} \Delta x_f^T \rho \Delta x_f$ ;  $\Delta x = x - x_g$ ;  $\rho = \text{diag}(\rho_1, \rho_2)$ ;  $k, \rho_1, \rho_2$  — заданные коэффициенты.

Уравнения прогнозирующей модели имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \quad \dot{x}_2 = u + \Delta u \mathbf{1}(t - \tau), \quad \dot{\tau} = 0; \\ \dot{p}_1 &= 0, \quad \dot{p}_2 = -p_1, \quad \dot{p}_\tau = p_2 \Delta u \delta(t - \tau); \end{aligned}$$

$$p_1(t_f) = \rho_1 \Delta x_1(t_f), \quad p_2(t_f) = \rho_2 \Delta x_2(t_f), \quad p_\tau(t_f) = 0,$$

здесь управление  $v = -k^2 p_\tau$ ;  $\mathbf{1}(t-\tau)$ ,  $\delta(t-\tau)$  — единичная и дельта-функции соответственно;  $p(t)$  — вектор сопряженных переменных.

Алгоритм устойчиво работает при достаточно больших отклонениях в задании начальных условий для  $\tau(t_0) \in [\Delta t, t_f]$  без изменения параметров  $k$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ . При этом формируется оптимальное позиционное управление, что позволяет учесть отклонения реального движения от программного.

Результаты моделирования при шаге интегрирования  $\Delta t = 0,01$  с и значении  $u_m = 2,1$  Н/кг следующие:  $x_{10} = 1$  м,  $x_{20} = 1$  м/с,  $x_{1f} = 0$ ,  $x_{2f} = 0$ ,  $k^2 = 1$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = 1$ ,  $t_1 = 2$  с,  $\tau = 1,24$  с,  $x_{1f} = 0,008$  м,  $x_{2f} = -0,008$  м/с. Значения параметров  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $k$  критерия вначале определялись согласно принципу равных вкладов максимальных отклонений [4], затем уточнялись в процессе моделирования.

Ввиду трудности практической реализации алгоритмов максимального быстродействия с переключением управления целесообразно использовать другие критерии качества.

**3.** Рассмотрим критерий плавности хода с минимизацией затрат на ускорение кузова

$$I = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \frac{u^2}{k^2} dt \quad \text{при обеспечении заданных граничных условий } x(t_f) = x_f(t_f).$$

Уравнения, определяющие решение по принципу максимума, имеют следующий вид:

$$H = p_1 x_2 + p_2 u + \frac{1}{2} \frac{u^2}{k^2}, \quad \dot{p}_1 = 0, \quad \dot{p}_2 = -p_1; \quad u = -k^2 p_2,$$

где  $H$  — гамильтониан системы.

Численным моделированием при  $\Delta t = 0,01$  с,  $t_f = 2$  с,  $x_{10} = 1$  м,  $x_{20} = 1$  м/с,  $x_{1f} = 0$ ,  $x_{2f} = 0$  получено:  $x_{1f} = 0,48 \cdot 10^{-11}$  м,  $x_{2f} = -0,38 \cdot 10^{-5}$  м/с.

**4.** Алгоритм с использованием прогнозирующей модели [4] для данной задачи с критерием Красовского

$$I = V_g(x, t_2) + \int_{t_0}^{t_f} Q(x, t) dt + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \frac{u^2 + u_0^2}{k^2} dt,$$

$$V_g = \frac{1}{2} \Delta x_f^T \rho \Delta x_f, \quad \Delta x = x - x_g, \quad \rho = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \rho_3), \quad x = (x_1, x_2, x_3)^T, \quad Q = \frac{1}{2} \alpha x_3$$

имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \quad \dot{x}_2 = x_3, \quad \dot{x}_3 = 0; \\ \dot{p}_1 &= 0, \quad \dot{p}_2 = -p_1, \quad \dot{p}_3 = -p_2 - \alpha x_3; \\ p_i(t_f) &= \rho_i \Delta x_i(t_f), \quad i = \overline{1, 3}, \quad u = -k^2 p_3, \end{aligned}$$

здесь  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \alpha, k$  — заданные коэффициенты.

Численным моделированием для  $\Delta t = 0,01$  с,  $t_f = 2$  с,  $x_{10} = 1$  м,  $x_{20} = 1$  м/с,  $x_{1f} = 0$ ,  $x_{2f} = 0$  при  $\alpha = 1$ ,  $\rho_1 = 10$ ,  $\rho_2 = 3$  получено:  $x_{1f} = 0,79$  м,  $x_{2f} = -1,18$  м/с.

**5.** Для управления подвеской автомобиля с использованием прогнозирующей модели при ограничениях терминального типа можно применить алгоритм последовательной оптимизации по иерархии критериев Красовского [6]:

$$I_1 = V_{g_1}(x, t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \left[ (u_1 + u_2)^2 + (u_1^0 + u_2)^2 \right] k_1^{-2} dt;$$

$$I_2 = V_{g_2}(x, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} \left( u_2^2 + (u_2^0)^2 \right) k_2^{-2} dt;$$

$$V_{g_1} = \frac{1}{2} \rho_2 [x_2(t_f) - x_{2g}]^2, \quad V_{g_2} = \frac{1}{2} \rho_1 [x_1(t_f) - x_{1g}]^2,$$

где  $x = (x_1, x_2, x_3)^T$ ;  $x_{1g}, x_{2g}$  — заданные конечные значения переменных  $x_1, x_2$ ;  $u_i, i=1, 2$ , — управление на  $i$ -м уровне значимости, соответствующее приведенным выше критериям;  $u_i^0$  — оптимальное значение  $u_i$ ;  $\rho_1, \rho_2, k_1, k_2$  — заданные коэффициенты.

Система представляется в следующем виде:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = x_3, \quad \dot{x}_3 = u_1 + u_2.$$

В данном случае [6] на первом уровне алгоритм включает прогнозирующую модель

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = x_3, \quad \dot{x}_3 = 0$$

и систему для сопряженных переменных  $p_1 = (p_{1x_1}, p_{1x_2}, p_{1x_3})^T$ :

$$\dot{p}_{1x_1} = 0, \quad \dot{p}_{1x_2} = -p_{1x_1}, \quad \dot{p}_{1x_3} = -p_{1x_2},$$

решаемые при граничных условиях  $p_{1x_1}(t_f) = 0, p_{1x_2}(t_f) = \rho_2 [x_2(t_f) - x_{2g}], p_{1x_3}(t_f) = 0$ .

Из выражения  $\partial H_1 / \partial u_1 = 0$ , где

$$H_1 = p_{1x_1} x_2 + p_{1x_2} x_3 + p_{1x_3} (u_1 + u_2) + \frac{1}{2} [(u_1 + u_2)^2 + (u_1^0 + u_2)^2] k_1^{-2},$$

находим управление  $u_1 = -k_1^2 p_{1x_3}$  ( $u_2 = 0$ ).

Для второго уровня имеем:

— систему  $\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = x_3, \dot{x}_3 = u_1$ ;

— систему для  $p_2 = (p_{2x_1}, p_{2x_2}, p_{2x_3})^T$  в виде  $\dot{p}_{2x_1} = 0, \dot{p}_{2x_2} = -p_{2x_1}, \dot{p}_{2x_3} = -p_{2x_2}$  с гра-

ничными условиями  $p_{2x_1}(t_f) = \rho_1 [x_1(t_f) - x_{1g}], p_{2x_2}(t_f) = -\eta_{1x_2}(t_f) \frac{\partial^2 V_{g_1}}{\partial x_2^2}, p_{2x_3}(t_f) = 0$ ;

— систему для  $\eta_1 = (\eta_{1x_1}, \eta_{1x_2}, \eta_{1x_3})^T$ :  $\dot{\eta}_{1x_1} = \eta_{1x_2}, \dot{\eta}_{1x_2} = \eta_{1x_1}, \dot{\eta}_{1x_3} = -\varepsilon_1$  с граничными условиями  $\eta_1 = 0$ ;

— соотношения  $p_{2x_3} + k_1^{-2} \varepsilon_1 = 0, p_{2x_3} + k_2^{-2} u_2 = 0$  (из выражений  $\partial H_2 / \partial u_1 = 0$  и  $\partial H_2 / \partial u_2 = 0$ ), из которых следует  $\varepsilon_1 = -k_1^2 p_{2x_3}(t), u_2 = -k_2^2 p_{2x_3}(t)$ .

При этом

$$H_2 = p_{2x_1} x_2 + p_{2x_2} x_3 + p_{2x_3} (u_1 + u_2) + \frac{1}{2} \left( u_2^2 + (u_2^0)^2 \right) k_2^{-2} - \\ - \eta_{1x_2} p_{1x_1} - \eta_{1x_3} p_{1x_2} + \varepsilon_1 \left( p_{1x_3} + k_1^{-2} u_1 \right).$$

В рассматриваемом примере краевая задача решается аналитически. В результате получаем

$$p_{2x_3}(t) = \rho_1 [x_1(t_f) - x_{1g}] \frac{(t_f - t)^2}{2} - \eta_{1x_2}(t_f) \rho_2 (t_f - t);$$

$$\eta_{1x_2}(t_f) = \frac{3k_1^2 \rho_1 (x_{1f} - x_{1g})(t_f - t_0)^4}{8[3 + k_1^2 \rho_2 (t_f - t_0)^3]},$$

$$p_{1x_3}(t) = p_{1x_3}(t_f) + p_{1x_2}(t_f - t) + p_{1x_1}(t_f) \frac{(t_f - t)^2}{2}.$$

Результаты моделирования при  $\Delta t = 0,01$  с,  $\rho_1 = 140$ ,  $\rho_2 = 500$ ,  $k_1^2 = 0,001$ ,  $k_2^2 = 0,1$  следующие:  $x_{1f} = -0,085$  м,  $x_{2f} = -0,083$  м/с.

В отличие от приведенного полного решения в упрощенном варианте алгоритма последовательной оптимизации [6] интегрированием модели первого уровня из условия  $x_2(t_f) \approx x_{2g}$  находим путем итераций модельное значение  $x_{3м}(t) = x_3(t) + \Delta x_3$  (это минимизирует гамильтониан  $H_1$  по параметру  $x_{3м}$ ). Таким образом, имеем  $p_{1x_3} \approx 0$  и  $u_1 \approx 0$  при выбранном значении  $x_{3м}$ . На втором уровне получаем  $H_{2м} = p_{2x_1} x_2 + p_{2x_2} x_3$ , и для определения управления следует найти  $p_{2x_3}$  из исходной системы при  $\dot{x}_{3м} = 0$  и  $x_3(t) + \Delta x_3$ , а также из системы для  $p_2$  с соответствующими граничными условиями при  $V_{g1} = 0$ . Управление реализуется в виде  $u = \delta(t) \Delta x_3 - k_2^2 p_{2g}$ .

При  $\rho_1 = 4000$ ,  $k_2^2 = 0,1$  результаты вычислений следующие:  $x_{1f} = 0,035$  м,  $x_{2f} = -0,1 \cdot 10^{-5}$  м/с (полагалось  $\delta(t) = 1/\Delta t$ ). При этом характер траекторий управляемого движения не изменяется по сравнению с предыдущим полным решением.

Применение рассмотренных выше для модельных условий (при постоянных значениях интервала оптимизации и компонент вектора состояния на правом конце траектории) алгоритмов управления к изменяющемуся профилю дороги показало [7], что наилучшие результаты дают алгоритм с использованием критерия минимума энергетических затрат и алгоритм последовательной оптимизации.

При реализации этих алгоритмов в активной системе демпфирования колебаний для выбранного профиля дороги и скользящего интервала оптимизации  $[t, t+T]$  расхождение между начальными условиями, определяющими компоненты вектора состояния, и текущим изменением профиля дороги гасится с установившейся погрешностью при отслеживании профиля, составляющей примерно 4 мм. При уменьшении скользящего интервала вдвое алгоритм с использованием критерия минимума энергетических затрат дает на порядок меньшую погрешность. С уменьшением скользящего интервала прогнозирования хорошую точность обеспечивает и алгоритм, минимизирующий один критерий Красовского (см. п. 4).

Таким образом, с помощью полученных алгоритмов определена оптимальная динамика кузова автомобиля как несложной системы. Для использования полученных результатов при управлении автомобилем в реальных условиях необходимо применить их в качестве входных воздействий в алгоритме активного демпфирования колебаний кузова с помощью СОРЭ [6]. СОРЭ использует информационную динамическую модель, которая строится в бортовом компьютере по текущей информации с датчиков автомобиля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Динамика системы „дорога — шина — автомобиль — водитель“ / Под ред. А. А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 1976.
2. Управляемость и устойчивость автомобиля: Сб. статей / Пер. с англ.; Под ред. А. С. Литвинова. М.: Машгиз, 1963.



3. *Roppenecker G.* Fahrzeugdynamik: Grundlagen der Modellierung und Regelung // Automatisationstechnik. 1994. N 10. S. 429—441.
4. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. *А. А. Красовского*. М.: Наука, 1987.
5. *Красовский А. А.* Адаптивный оптимальный регулятор с переменным порядком наблюдателя и временем экстраполяции // Автоматика и телемеханика. 1994. № 11. С. 97—112.
6. *Кабанов С. А.* Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997.
7. *Кабанов С. А., Крашенинников Б. А.* Оптимальное управление подвеской автомобиля. // Тр. XXIV Рос. школы по проблемам науки и технологий. Т. 2. Наука и технологии. М.: Изд-во РАН, 2004. С. 329—339.

Рекомендована кафедрой  
систем обработки информации  
и управления

Поступила в редакцию  
07.12.07 г.

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 621.396:681.323

С. И. ЗИАТДИНОВ, Н. В. ГИРИН

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

## АНАЛИЗ ОШИБОК ПРИ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ

Получено выражение для вычисления коэффициента линейных искажений, возникающих при использовании тригонометрической интерполяции. Оценено влияние объема выборки, периода дискретизации и количества членов интерполирующего полинома на ошибки интерполяции.

Для решения задачи восстановления непрерывной функции по ее дискретным отсчетам используются различные методы интерполяции. При этом неизбежно возникают ошибки, зависящие от объема выборки, периода следования отсчетов непрерывной функции и ее спектрально-корреляционных характеристик.

В настоящей статье рассматривается тригонометрический метод интерполяции, который сравнительно легко реализуется современными вычислительными средствами.

Пусть на интервале наблюдения  $T_H$  заданы  $N$  значений  $y[k]$  непрерывной функции  $y(t)$ , следующие с периодом  $T$ , при этом  $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$  — номера отсчетов функции  $y(t)$  в моменты времени  $t_k = kT$ .

Требуется аппроксимировать функцию  $y(t)$  на интервале  $T_H$  тригонометрическим полиномом [1]

$$y_H(t) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{j=1}^m \left( A_j \cos j \frac{2\pi t}{T_H} + C_j \sin j \frac{2\pi t}{T_H} \right) \text{ при } m < N/2, \quad (1)$$

так чтобы минимизировать сумму отклонений  $\sum_{k=0}^{N-1} (y[k] - y_H[k])^2$ , здесь  $y_H[k]$  — отсчеты интерполирующей функции  $y_H(t)$  в моменты времени  $t_k$ ; коэффициенты  $A_0$ ,  $A_j$  и  $C_j$  определяются по формулам

$$A_0 = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y[k]; \quad A_j = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y[k] \cos j \frac{2\pi k}{N-1}; \quad C_j = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y[k] \sin j \frac{2\pi k}{N-1}, \quad 1 \leq j < N/2.$$

Пусть функция  $y(t)$  представляет реализацию стационарного случайного процесса с нулевым математическим ожиданием.

Для оценки возникающих ошибок интерполяции воспользуемся коэффициентом линейных искажений [2—5]

$$K_{л.и}(\tau) = \sqrt{1 - R_{12}(\tau)},$$

где  $R_{12}(\tau)$  — коэффициент взаимной корреляции функций  $y(t)$  и  $y_{и}(t)$ ; очевидно, что коэффициент  $K_{л.и}(\tau)$  показывает степень отличия этих функций.

Коэффициент взаимной корреляции определяется как

$$R_{12}(\tau) = B_{12}(\tau) / \sigma \sigma_{и}.$$

В данном случае  $B_{12}(\tau) = \overline{y(t)y_{и}(t + \tau)}$  — взаимная корреляционная функция исходной и интерполирующей функций,  $\sigma$  и  $\sigma_{и}$  — их средние квадратические значения соответственно; черта сверху означает статистическое усреднение.

Соотношение (1) позволяет найти взаимную корреляционную функцию  $B_{12}(\tau)$  при  $\tau = 0$ :

$$B_{12}(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \overline{y[k]y_{и}(t)} + \sum_{j=1}^m \left( \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \overline{y[k]y_{и}(t)} \cos j \frac{2\pi k}{N-1} \right) \cos j \frac{2\pi t}{T_{и}} + \sum_{j=1}^m \left( \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \overline{y[k]y_{и}(t)} \sin j \frac{2\pi k}{N-1} \right) \sin j \frac{2\pi t}{T_{и}}. \quad (2)$$

В результате преобразований выражение (2) записывается следующим образом:

$$B_{12}(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} B(t - kT) \left[ 1 + \sum_{j=1}^m \cos j \left( \frac{2\pi k}{N-1} - \frac{2\pi t}{T_{и}} \right) \right],$$

где  $B(t - kT)$  — корреляционная функция исходной функции  $y(t)$ .

На основании выражения (1) дисперсию интерполирующей функции  $y_{и}(t)$  можно представить соотношением

$$\sigma_{и}^2 = \overline{y_{и}^2(t)} = \frac{1}{4} \overline{A_0^2} + \left[ \sum_{j=1}^m \left( A_j \cos j \frac{2\pi t}{T_{и}} + C_j \sin j \frac{2\pi t}{T_{и}} \right) \right]^2,$$

которое преобразуется к виду

$$\sigma_{и}^2 = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{p=0}^{N-1} B[k - p] + \frac{4}{N^2} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{p=0}^{N-1} B[k - p] \left\{ \cos j \frac{2\pi k}{N-1} \cos j \frac{2\pi t}{T_{и}} \times \right. \\ \left. \times \cos \left[ i2\pi \left( \frac{t}{T_{и}} - \frac{p}{N-1} \right) \right] + \sin i \frac{2\pi p}{N-1} \sin i \frac{2\pi t}{T_{и}} \sin \left[ j2\pi \left( \frac{t}{T_{и}} - \frac{k}{N-1} \right) \right] \right\}.$$

Пусть корреляционная функция случайного процесса описывается соотношением

$$B(\tau) = \sigma^2 \exp(-|\tau| \Delta f),$$

где  $\Delta f$  — параметр, определяющий ширину спектральной плотности процесса  $y(t)$ .

Функции  $B(\tau)$  соответствует медленно затухающая спектральная плотность.

Результаты расчетов коэффициента  $K_{л.и}(\tau)$  при  $\tau = 0$ , объеме выборки  $N = 17$ , количестве членов интерполирующего полинома  $m = 8$  в крайних точках интервала наблюдения для различных значений произведения  $\Delta f T$  приведены ниже.

$\Delta f T$	0,25	0,15	0,05	0,02	0,005	0,002	0,001
$K_{л.и}(0)$ , %	55,6	52,5	38,7	26,6	14,2	9,5	7,2

Полученные данные показывают, что увеличение произведения  $\Delta f T$  приводит к росту коэффициента линейных искажений и тем самым к увеличению ошибок интерполяции.

Ниже приведены результаты расчетов коэффициента  $K_{л.и}(0)$  для тех же исходных данных, что и в предыдущем случае, но в середине интервала наблюдения при  $t = 8T$ .

$\Delta fT$	0,25	0,15	0,05	0,02	0,005	0,002	0,001
$K_{л.и}(0), \%$	21,9	19,3	13,1	9,2	6,1	5,2	4,9

Сопоставление приведенных результатов показывает, что ошибки интерполяции в середине интервала наблюдения практически в 2—3 раза меньше ошибок интерполяции на границах интервала.

В табл. 1 представлены результаты расчетов коэффициента  $K_{л.и}(0)$  в середине интервала наблюдения ( $t = 8T$ ) при  $N = 17$  в зависимости от количества членов интерполирующего полинома для различных значений произведения  $\Delta fT$ .

Таблица 1

$m$		8	7	6	5	4	3	2	1
$K_{л.и}(0), \%$	$\Delta fT = 0,002$	5,20	5,22	5,28	5,31	5,40	5,45	5,63	5,84
	$\Delta fT = 0,005$	6,09	6,15	6,29	6,31	6,58	6,85	7,05	7,35
	$\Delta fT = 0,15$	19,28	19,73	21,01	21,49	23,72	24,20	27,81	31,20

Как следует из анализа полученных результатов, для узкополосного случайного процесса  $y(t)$  (при  $\Delta fT < 0,05$ ) уменьшение количества членов интерполирующего полинома с восьми до одного не приводит к заметному росту ошибок интерполяции, тогда как для достаточно широкополосного случайного процесса  $y(t)$  (при  $\Delta fT < 0,15$ ) такое изменение приводит к увеличению коэффициента линейных искажений с 19,28 до 31,20 %.

Рассмотрим случай, когда корреляционная функция случайного процесса  $y(t)$  имеет вид

$$B(\tau) = \sigma^2 \exp(-\tau^2 \Delta f^2),$$

чему соответствует резко падающая спектральная плотность.

Результаты расчетов коэффициента  $K_{л.и}(\tau)$  при  $\tau = 0$ ,  $N = 17$ ,  $m = 8$  в крайних точках и в середине интервала наблюдения приведены ниже.

$\Delta fT$	0,25	0,15	0,05	0,02	0,005
$K_{л.и}(0), \%$	56,6	55,9	34,1	15,2	5,2

$\Delta fT$	0,25	0,15	0,05	0,02	0,005
$K_{л.и}(0), \%$	21,7	15,1	5,3	4,6	4,5

В табл. 2 приведены результаты расчетов коэффициента  $K_{л.и}(0)$  в середине интервала наблюдения при  $N = 17$  в зависимости от количества членов интерполирующего полинома для различных значений  $\Delta fT$ .

Таблица 2

$m$		8	7	6	5	4	3	2	1
$K_{л.и}(0), \%$	$\Delta fT = 0,02$	4,54	4,54	4,54	4,55	4,55	4,56	4,56	4,57
	$\Delta fT = 0,15$	15,6	15,41	15,76	15,78	16,23	16,61	17	17,20

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для случайного процесса с резко падающей спектральной плотностью ошибки, вносимые тригонометрическим интерполятором, значительно меньше, чем в случае медленно затухающей спектральной плотности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968.
2. Зиятдинов С. И., Жуков А. Д. Искажение сигнала в узкополосных фильтрах // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 12. С. 44—47.
3. Зиятдинов С. И. Линейные искажения сигнала фильтром Баттерворта // Там же. 2007. Т. 50, № 1. С. 35—39.
4. Зиятдинов С. И. Линейные искажения сигнала экстраполяторами // Там же. 2007. Т. 50, № 5. С. 57—60.
5. Зиятдинов С. И. Линейные искажения сигнала интерполятором // Там же. 2007. Т. 50, № 10. С. 50—53.

Рекомендована кафедрой  
информационно-сетевых технологий

Поступила в редакцию  
22.05.07 г.

УДК 358.421:623.98

Ю. П. МЕЛЬНИКОВ, С. В. ПОПОВ

*Санкт-Петербург*

## **КОМБИНАТОРНОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ И КОДИРОВАНИЕ НОМЕРОВ КАНАЛОВ В АНАЛИЗАТОРАХ ИМПУЛЬСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ**

Рассматривается возможность сокращения количества приемно-усилительных трактов в многоканальных анализаторах путем объединения выходов избирательных каналов в относительно небольшое число групп.

Многоканальные анализаторы радиосигналов (пеленгаторы и приемники-частотомеры) применяются преимущественно в условиях, когда требуется осуществить обнаружение и пеленгование радиотехнических средств, излучения которых имеют кратковременный характер и связаны с непосредственной угрозой применения средств поражения. Типичным примером такой ситуации является налет средств воздушного нападения (например, самолетов, противокорабельных ракет с радиолокационными головками самонаведения) на надводные корабли, когда время обнаружения не должно превышать нескольких секунд [1].

Многоканальные пеленгационные системы представляют собой совокупность пространственно-избирательных каналов, образуемых несколькими диаграммами направленности (ДН) антенных устройств (набором отдельных направленных антенн или многолучевой антенной системой), совместно перекрывающими подлежащий наблюдению сектор пространства. Определение направления приемного сигнала производится по номеру канала (одного или двух соседних), в котором зарегистрирован факт приема. В многоканальных пеленгаторах с использованием функционального метода обработки направление приема уточняется по данным амплитудного или/и фазового мгновенного сравнения сигналов на выходах каналов [2, 3]. Однако применение такой обработки сопряжено с усложнением аппаратуры пеленгатора.

Для обеспечения точности пеленгования в ряде известных конструкций многоканальных круговых пеленгаторов [4, 5] используется большое число направленных антенн (15—20 и более), совместно перекрывающих весь диапазон в 360°. Конструкции самих направленных антенн достаточно просты и надежны, однако наличие в составе пеленгатора большого количества приемных трактов приводит к усложнению устройства и ограничению надежности.

Принципиально возможно значительно сократить количество приемных трактов по отношению к числу антенн путем объединения сгруппированных выходов антенн с несмежными

диаграммами направленности. В результате можно использовать некоторые общие приемные тракты для усиления несовпадающих во времени импульсных сигналов, поступающих с разных направлений. Определение пеленга (номера пространственного канала приема, соответствующего ДН какой-либо антенны или зоне пересечения пары смежных ДН) при этом будет производиться путем дешифрирования сочетания номеров приемных трактов, на выходах которых был зафиксирован прием сигнала.

Однозначность определения пеленга сигнала при дешифрировании обеспечивается построением схемы соединений выходов антенн, с помощью которой осуществляется объединение их в группы таким образом, чтобы каждой антенне и каждой паре соседних антенн кругового пеленгатора соответствовала единственная комбинация номеров приемных трактов.

Одним из вариантов такого построения может быть подключение к выходу каждой антенны делителя на два тракта (например, в виде СВЧ мостовой схемы) и последующее объединение выходов трактов в несколько групп. При этом сочетания номеров групп, образующие коды направлений приема и соответствующие отдельным антеннам или зонам одновременного приема по соседним антеннам, не должны повторяться. Объединенные в группы выходы антенн через групповые соединители подключаются к приемно-усилительным трактам.

Например, в 15-антенном круговом пеленгаторе с делением выхода каждой антенны на два тракта и с использованием шести групп (и соответственно шести приемных трактов), объединяющих различные выходы антенн, порядок их подключения к соединителям и последующим приемным трактам (обозначаемым далее как А, В, С, D, E, F) в последовательности их кругового расположения будет следующим:

BC, AE, CD, AB, DF, AC, BF, CE, AF, BE, AD, EF, BD, CF, DE.

Количество сочетаний по четыре, соответствующих приему в зонах пересечения соседних ДН кругового пеленгатора, очевидно, должно быть не менее числа таких зон, равного числу самих антенн, что точно выполняется в данном случае, т.е. при использовании шести приемно-усилительных трактов. При большем числе групп и приемно-усилительных трактов и разветвлении выходов всех антенн на одинаковое число направлений (трактов) — два, три и т.д. — возможное количество антенн кругового пеленгатора с комбинаторным объединением групп каналов и последующим определением номера пространственного канала приема будет определяться числом сочетаний (по два, три и т.д.).

Так, при разделении выходов антенн на два направления применение семи трактов позволяет использовать 21 антенну, восьми трактов — 28 антенн, а девяти трактов — 36 антенн. При разделении выходов антенн на три направления и использовании девяти и более общих трактов возможное число антенн кругового пеленгатора с комбинаторным кодированием резко возрастает.

В изложенном варианте кодирования номеров направлений приема (единичных антенн и зон пересечения ДН соседних антенн) осуществлялось разветвление выходов всех антенн на одинаковое число направлений и последующее объединение в общие приемные тракты равного числа вводов, что ограничивает количество требуемых при кодировании сочетаний. При использовании сочетаний с разным числом элементов и делении выходов антенн на разное число направлений возможно дополнительное сокращение количества приемно-усилительных трактов или, при постоянном количестве трактов, увеличение числа антенн кругового пеленгатора. Так, в 15-антенном круговом пеленгаторе применение кодирования направлений приема с использованием сочетаний с разным числом элементов позволяет ограничиться всего пятью приемными трактами, что в три раза меньше числа антенн.

Вариант кодообразующей схемы соединений антенных трактов 15-антенного кругового пеленгатора с пятью приемными трактами показан на рис. 1. Соответствующий этому вари-

анту порядок подключения приемных трактов к выходам антенн можно представить в виде последовательности

AE, C, AB, CD, E, AD, BE, A, BD, CE, B, DE, AC, D, BC.

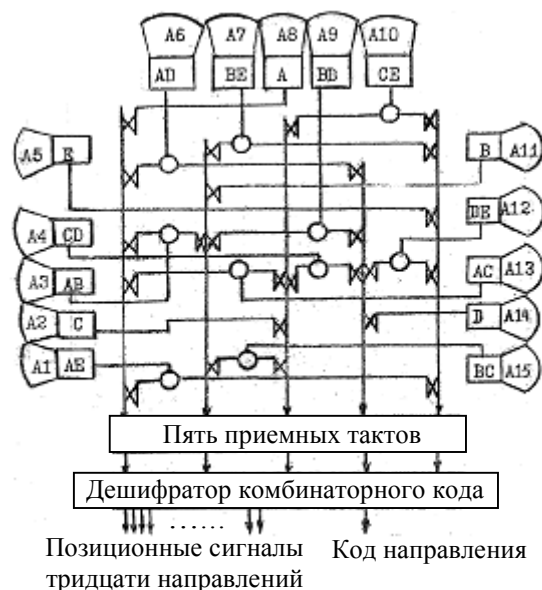


Рис. 1

Приведенная схема обеспечивает формирование максимально возможного в данных условиях числа неповторяющихся кодовых сочетаний (30 из 31), соответствующих 15 антеннам и 15 зонам приема по двум смежным антеннам с пересекающимися диафрагмами направленности.

Зависимость числа кодируемых позиций антенн ( $N$ ) кругового пеленгатора от числа приемных каналов ( $n$ ) при разных вариантах кодирования представлена на рис. 2, где кривая 1 соответствует использованию для кодирования различных сочетаний номеров трактов, кривая 2 — использованию сочетаний одинаковой длины при разделении выходов антенн на два направления, кривая 3 показывает зависимость без применения комбинаторного кодирования позиций антенн.

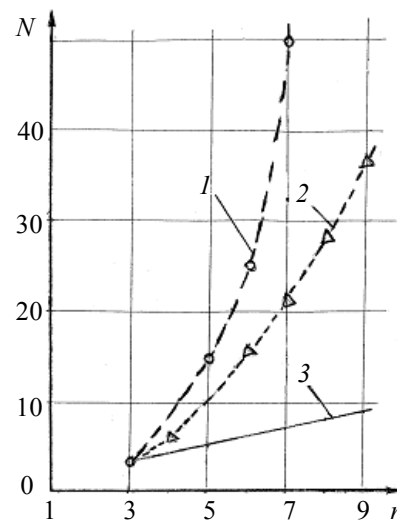


Рис. 2

Следует, однако, заметить, что разветвление выходов антенн на разное число ветвей (трактов) технически более сложно и может приводить к неравномерности потерь сигнала при разделении его на различное число направлений в разных антеннах, т.е. к неравномерности эффективной чувствительности. При этом сама по себе процедура объединения выходов нескольких антенн приводит к снижению эффективной чувствительности пеленгатора по отношению к структуре с полным числом приемных трактов, равным числу антенн.

В заключение приведем пример разводки выходов многолучевой двумерной структуры, содержащей 45 пространственно-избирательных каналов, расширение которых в динамическом диапазоне не превышает их полуширины в любом направлении, на 10 приемных трактов (A, B, C, D, E, F, G, H, K, L):

DH, EG, HK, BF, EH,  
 CL, B, AF, C, AG, D, BL,  
 AH, DG, HL, DE, BH, F, AE,

CF, E, BC, A, CK, GL, CH,  
G, AK, DL, FH, BD, EF, DK,  
BE, H, CE, K, CG, L, AC,  
GK, AB, FL, AD, EK.

Составление схем разводки выходов антенн при использовании для кодирования соединений с различным числом элементов (т.е. при использовании различного числа выходов у разных антенн) производилось путем выбора методики нахождения оптимизированных схем. При этом учитывались ограничения, обусловленные необходимостью подавления интерференции сигналов в зонах совместного приема соседних антенн (т.е. использование разных трактов для усиления сигналов от соседних антенн).

Комбинаторное кодирование номеров каналов многоканальных измерителей несущей частоты радиосигналов принципиально возможно производить аналогичным образом, в том числе, с использованием приведенных вариантов разводки. Составление схем разводки в этом случае несколько упрощается ввиду отсутствия необходимости обеспечить замкнутость кодовой последовательности комбинаций номеров, как в круговом пеленгаторе. Однако применение такого кодирования как средства сокращения количества канальных трактов усиления и обработки радиочастотных сигналов на выходах частотно-избирательных элементов не представляется целесообразным вследствие чрезмерной технической сложности реализации кодообразующей схемы.

Использование комбинаторного группирования и объединения трактов усиления и передачи сигналов с выходов канальных детекторов позволяет сократить число видеотрактов. Однако уменьшение их количества по сравнению с числом частотных каналов при таком кодировании номеров видеовыходов будет практически таким же, как при представлении этих номеров в двоичном параллельном коде. Таким образом, выбор способа кодирования в этом случае следует производить исходя из конкретных технических преимуществ устройств обработки и кодирования параметров сигналов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Перунов Ю. М., Фомичев К. И., Юдин Л. М.* Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием. М.: Радиотехника, 2003.
2. *Мельников Ю. П., Попов С. В., Усков Н. В.* Методы обоснования необходимых технических характеристик аппаратуры воздушной радиотехнической разведки и возможностей их технической реализации // Тр. ЦНИИ № 30 МО. 1969. Вып. 210 (286).
3. *Атражесв М. П., Ильин В. А., Марьин Н. П.* Борьба с радиоэлектронными средствами. М.: Воениздат, 1972.
4. Пат. США № 3787864. Система мгновенного разрешения сигнала. 1974.
5. Пат. США № 3886556. Многоканальный приемник пеленгационной системы. 1975.

Поступила в редакцию  
21.05.07 г.



---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 535.317

В. А. ЗВЕРЕВ, Г. Э. РОМАНОВА

*Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики*

## ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ТЕЛЕСКОПА С ДИАМЕТРОМ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА 10 М

Рассматривается оптическая схема телескопа с диаметром главного зеркала 10 м, построенная на основе афокальной двухзеркальной системы. Приведены параметры и характеристики системы, построенной только из вогнутых поверхностей.

Более 30 лет назад был создан и введен в эксплуатацию телескоп БТА (Большой телескоп азимутальный) с диаметром главного зеркала 6,5 м. В течение многих лет он оставался крупнейшим в мире, но в настоящее время построены более крупные телескопы, такие как телескоп Кека, VLT, телескоп Джемини и др. Телескоп БТА оказывается лишь во втором десятке по величине [1]; см. также <<http://astro.nineplanets.org/bigeyes.html>>. Обсуждаются проблемы построения гигантских телескопов с диаметром главного зеркала от 16,4 до 100 м [2, 3]; см. также <<http://www.eso.org/projects/>>.

Сферическая поверхность главного зеркала обладает существенными преимуществами по сравнению с несферической, и использование такого зеркала может значительно уменьшить стоимость проекта большого телескопа. Поэтому для построения гигантских телескопов выбирается схема со сферическим главным зеркалом [4, 5].

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к таким телескопам, при расчете оптической схемы возникают трудности, обусловленные компенсацией сферической аберрации, вносимой светосильным сферическим главным зеркалом.

Оптическая схема высокоапертурного телескопа (диаметр главного зеркала 10—100 м) может быть построена на основе афокальной двухзеркальной системы со сферическим главным зеркалом. При исправленной сферической аберрации в такой системе вторая поверхность оказывается эквидистантной параболоиду [6, 7], что позволяет использовать для ее контроля методы, разработанные для зеркальных параболоидов

Приведем параметры афокальной двухзеркальной системы:

$$r_1 = -30 \cdot 10^3, \quad r_2^* = 7,5 \cdot 10^3, \\ d_1 = -18,75 \cdot 10^3.$$

Здесь (и далее)  $r_i$  — радиус кривизны при вершине поверхности, мм;  $d_i$  — расстояние между зеркалами, мм; символ „\*“ обозначает несферическую поверхность.

Форма второй поверхности определяется уравнением

$$x^2 + y^2 = 2r_2^* z + 3,999779z^2 - 0,002653z^3 + 0,335144 \cdot 10^{-5} z^4 - 0,365802 \cdot 10^{-8} z^5.$$

При диаметре главного зеркала 10 м максимальная волновая сферическая aberrация не превышает  $0,13\lambda$  (длина волны  $\lambda = 0,546$  мкм).

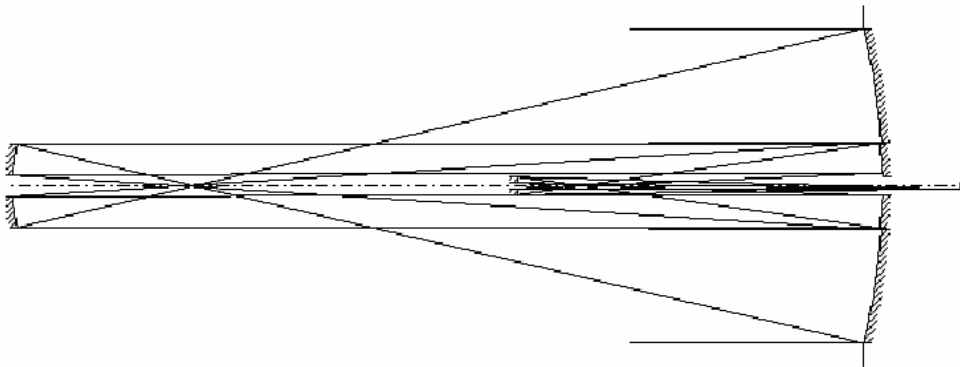
Если такую систему дополнить зеркальным объективом, можно получить оптическую схему высокоапертурного телескопа. В простейшем случае это параболическая поверхность. Для систем с вогнутым вторичным зеркалом можно подобрать радиус параболы таким образом, чтобы в трехзеркальной системе была выполнена апланатическая коррекция для некоторой зоны зрачка. Если вместо параболической отражающей поверхности использовать двухзеркальный объектив, то можно добиться исправления не только сферической aberrации, но и комы в пределах всего зрачка.

Были проанализированы возможности коррекции астигматизма и кривизны поверхности изображения, образованного четырехзеркальным объективом на основе афокальной системы. При практически совершенной коррекции сферической aberrации и исправленной комы по всему полю можно исправить также астигматизм или кривизну поля [7]. В трех из возможных четырех типов систем получается примерно одинаковое качество изображения. Не удастся исправить кривизну изображения и астигматизм при приемлемых конструктивных параметрах системы только в системе с выпуклыми вторичным и четвертым зеркалами.

Наибольший интерес представляют схемы, в которых второе зеркало является вогнутым, — такую поверхность легче контролировать.

Параметры схемы с диаметром главного зеркала 10 м, в которой афокальная двухзеркальная система скомбинирована с объективом Грегори (см. рисунок), приведены в таблице.

Номер поверхности	Радиус кривизны при вершине поверхности $r_i$ , мм	Воздушное расстояние $d_i$ , мм
Первая	$-30 \cdot 10^3$	$-18,75 \cdot 10^3$
Вторая*	$7,5 \cdot 10^3$	$-18,75 \cdot 10^3$
Третья*	$-12,6 \cdot 10^3$	$-7,87 \cdot 10^3$
Четвертая*	$2,696 \cdot 10^3$	—



Фокусное расстояние системы  $f' = 1,53 \cdot 10^5$  мм. Форма второй, третьей и четвертой поверхностей определяется следующими уравнениями:

$$x^2 + y^2 = 2r_2^* z + 3,999779z^2 - 0,002653z^3 + 0,335144 \cdot 10^{-5} z^4 - 0,365802 \cdot 10^{-8} z^5;$$

$$x^2 + y^2 = 2r_3^* z + 2,801002z^2 + 0,004877z^3 + 0,11052 \cdot 10^{-4} z^4 + 0,183638 \cdot 10^{-7} z^5,$$

$$x^2 + y^2 = 2r_4^* z - 7,601237z^2 + 0,012587z^3.$$

Первая поверхность в схеме является сферической (диаметр  $10 \cdot 10^4$  мм), вторая (диаметр  $2,65 \cdot 10^3$  мм) и третья (диаметр  $2,72 \cdot 10^3$  мм) представляют собой вогнутые гиперboloиды

вращения высшего порядка, а четвертая (диаметр 640 мм) — вогнутый сплюснутый эллипсоид высшего порядка.

При линейном поле в пространстве изображения 150 мм (угловое поле в пространстве предметов  $2\omega = 3'30''$ ) максимальная волновая aberrация в пределах всего поля составляет примерно  $1\lambda$ . Коэффициент передачи контраста на частоте 8,5 линий/мм равен 0,2, что соответствует разрешению в пространстве предметов 0,15". Экранирование в схеме не превышает 0,3 по диаметру.

Рассчитанную схему телескопа необходимо проанализировать с точки зрения технологичности, также следует предусмотреть схемы контроля несферических поверхностей. Наиболее предпочтительным является компенсационный метод, позволяющий контролировать крупногабаритные асферические поверхности как второго, так и высшего порядка.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Санкт-Петербурга (грант PD06-2.0-27 „Разработка и расчет оптической системы телескопа с диаметром главного зеркала 10—100 метров и систем контроля несферических поверхностей“).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шустов Б. М. Большие оптические телескопы будущего // Земля и Вселенная. 2004. № 2.
2. Sasian J. M. Flat-field, anastigmatic, four-mirror optical system for large telescopes // Opt. Eng. 1987. Vol. 26, N. 12.
3. Owner-Petersen M. Optical design and performance analysis of a 25 m class telescope with a segmented spherical primary // SPIE. 1997. Vol. 2871. P. 607—612.
4. Dierickx P., Beletic J., Delasbre B. et al. The Optics of the OWL 100-m adaptive telescope // Workshop on Extremely Large Telescopes, Backaskog, Sweden, June 1—2, 1999.
5. Puryayev D. T. Afocal two-mirror system // Opt. Eng. 1993. Vol. 32, N. 6.
6. Зверев В. А., Бахолдин А. В., Гаврилюк А. В. Оптическая система высокоапертурного телескопа // Оптич. журн. 2001. Т. 68, № 6. С. 6—14.
7. Бахолдин А. В., Зверев В. А., Романова Г. Э. Оптическая система высокоапертурного телескопа // Там же. 2005. Т. 72, № 2. С. 24—28.

Рекомендована кафедрой  
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию  
21.05.07 г.

А. Н. БЫЧКОВ

*Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики*

## О ВЛИЯНИИ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТИВА И СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ДАТЧИКА

Проанализировано влияние частотно-контрастной характеристики объектива при различных относительных отверстиях на разрешающую способность телевизионного датчика. На примере объектива с относительным отверстием 1:2 рассмотрено влияние изменения длины волны источника излучения на разрешающую способность системы объектив — матрица приборов с зарядовой связью.

На этапе проектирования телевизионных систем правильный выбор объектива для передающей камеры особенно важен, поскольку установка несоответствующей оптики может существенно понизить эффективность всей системы видеонаблюдения. До появления матричных и линейных приборов с зарядовой связью (ПЗС) объективы для телевизионных датчиков, как правило, обеспечивали высокое качество изображения. Это объясняется тем, что размеры фоточувствительных элементов передающих трубок (суперортикон, видикон и др.) были относительно велики (30 — 50 мкм). Современные матричные ПЗС формата 1/2" и 1/3" характеризуются размерами чувствительных элементов примерно в десять раз меньшими. Естественно, что требования к разрешающей способности оптических систем должны возрасти.

Как известно, наибольшее распространение для оценки качества изображения оптических систем получил метод частотно-контрастных характеристик (ЧКХ) (или функций передачи модуляции), которые представляют собой зависимости коэффициента передачи модуляции (КПМ) яркости воспроизводимого изображения от пространственной частоты штриховой миры [1]. ЧКХ дифракционно-ограниченной оптической системы (объектива) со зрачком круглой формы представляется следующей формулой [2, 3]:

$$K_{об}(N) = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \frac{\lambda N}{2 \sin \sigma'} - \frac{\lambda N}{2 \sin \sigma'} \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda N}{2 \sin \sigma'} \right)^2} \right], \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны оптического излучения, мм;  $N$  — пространственная частота штриховой миры, линий/мм;  $\sigma'$  — апертурный угол оптической системы, причем

$$\operatorname{tg} \sigma' = \frac{1}{2} \frac{D}{f'},$$

где  $D$  — диаметр входного зрачка,  $f'$  — фокусное расстояние оптической системы; отношение  $D/f'$  чаще называют относительным отверстием объектива.

Пространственные частоты  $N$  в оптике измеряют числом периодов гармонической составляющей изображения, приходящихся на один миллиметр. В телевидении пространственную частоту выражают числом полупериодов  $m$  гармонической составляющей изображения, которое „укладывается“ в величину  $h$ , характеризующую высоту раstra. Единицей измерения

пространственной частоты при этом является телевизионная линия (твл). Соотношение, характеризующее преобразование оптических линий в телевизионные, определяется как [4]

$$m = 2Nh_{\phi}, \quad (2)$$

где  $h_{\phi}$  — высота секции накопления фотопреобразователя, мм, в данном случае матрицы ПЗС.

С учетом соотношения (2) формула (1) примет вид

$$K_{об}(m) = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \frac{\lambda m}{4h_{\phi} \sin \sigma'} - \frac{\lambda m}{4h_{\phi} \sin \sigma'} \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda m}{4h_{\phi} \sin \sigma'} \right)^2} \right]. \quad (3)$$

Проанализируем влияние ЧКХ объектива на разрешающую способность телевизионного датчика. Необходимо рассмотреть эквивалентную ЧКХ, определяющую свойства системы объектив — матричный ПЗС.

Для анализа используется полноформатная матрица с кадровым переносом типа ФППЗР31, разработанная в ЦНИИ „Электрон“ (Санкт-Петербург), с числом фоточувствительных элементов в строке, равным 768, и размерами секции накопления  $4,9 \times 6,6$  мм (оптический формат матрицы  $1/2''$ ) [5]. Результирующая ЧКХ матрицы ПЗС имеет вид произведения [4]:

$$K_{ПЗС}(m) = K_{\Pi}(m)K_{\Gamma}(m)K_{д}(m),$$

где

$K_{\Pi}(m) = \exp[-n\varepsilon(1 - \cos \pi m / m_3)]$  — составляющая ЧКХ матричного ПЗС, учитывающая неэффективность переносов, здесь  $m_3$  — количество элементов матрицы вдоль строки, приведенное к высоте раstra;  $\varepsilon$  — неэффективность трехфазного переноса;  $n$  — количество трехфазных переносов;

$$K_{\Gamma}(m) = \frac{\sin[\pi a_3 m / (b p m_3)]}{\pi a_3 m / (b p m_3)} \quad \text{— составляющая ЧКХ матричного ПЗС, учитывающая (геометрические) размеры и шаг фоточувствительных элементов,}$$

здесь  $a_3$  — размер фоточувствительного элемента в направлении переноса зарядов;  $b$  — коэффициент, характеризующий фазовый сдвиг между осями электродов и осями штрихов оптической миры;  $p$  — расстояние (шаг) между центрами фоточувствительных элементов;

$$K_{д}(N) = \left( 1 - \frac{e^{-\alpha d}}{1 + \alpha L} \right) / \left( 1 - \frac{e^{-\alpha d}}{1 + \alpha L_0} \right) \quad \text{— составляющая ЧКХ матричного ПЗС, связанная с}$$

диффузией носителей в подложке, здесь  $\alpha$  — коэффициент поглощения излучения в подложке;  $d$  — глубина пространственного заряда;  $L = L_0 \sqrt{1 / [1 + L_0^2 (2\pi N)^2]}$ , где  $L_0$  — диффузионная длина носителей в подложке.

Более подробно составляющие ЧКХ матричных ПЗС рассмотрены в работе [4].

Расчет частотно-контрастной характеристики объектива и матричного ПЗС произведен для  $\lambda = 0,550 \cdot 10^{-3}$  мм. При определении составляющих  $K_{\Gamma}(m)$  и  $K_{\Pi}(m)$  коэффициент  $b = 1,5$ , значение  $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-4}$  при  $n = 770$ . Расчет составляющей  $K_{д}(m)$  выполнен с учетом  $d = 5$  мкм и  $L_0 = 100$  мкм. Значения коэффициента  $\alpha$  для различных длин волн приведены в работе [4]. Расчет ЧКХ объектива производился по формуле (3) для центра поля зрения.

Эквивалентная ЧКХ объектива и матричного ПЗС определяется как

$$K(m) = K_{об}(m)K_{ПЗС}(m).$$

На рис. 1 графически представлены результаты расчетов эквивалентной ЧКХ системы объектив — матрица типа ФППЗР31 при  $\lambda = 0,550$  мкм. Если предположить, что величина относительного отверстия объектива не влияет на получаемое изображение (не вносит искажений), т.е.  $K_{об} = 1$  на всех пространственных частотах при любом значении  $D/f'$ , то в качестве результирующей ЧКХ системы идеальный объектив — матричный ПЗС берется ЧКХ матрицы ФППЗР31.

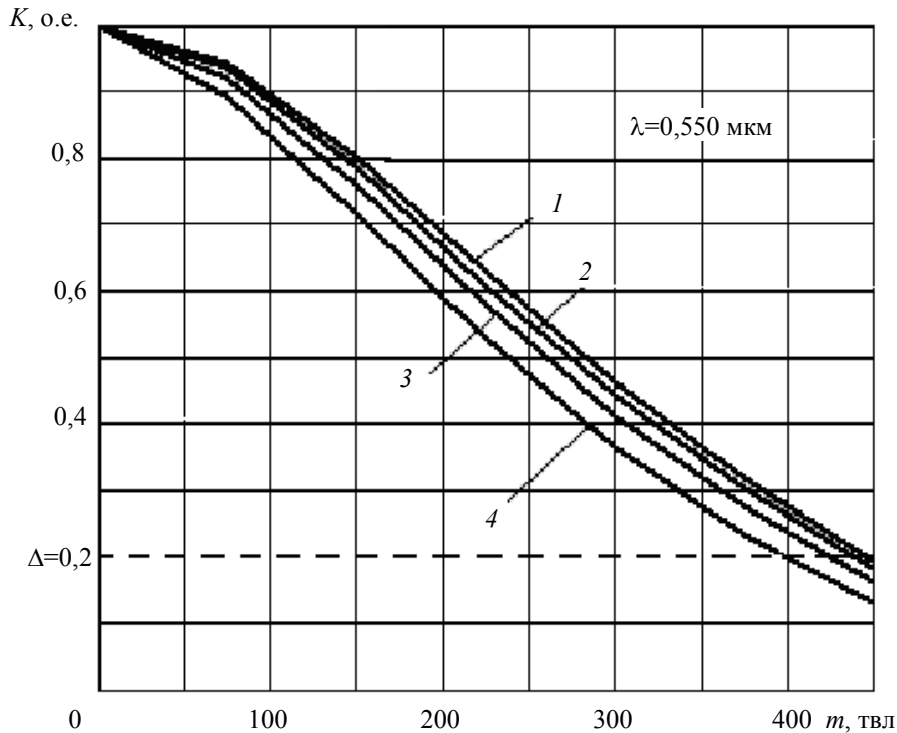


Рис. 1

При уровне отсчета  $\Delta = 0,2$  такая система имеет разрешающую способность  $m_p = 450$  твл (см. рис. 1, кривая 1). При рассмотрении систем с различными дифракционно-ограниченными объективами наивысшее разрешение  $m_p = 440$  твл имеет система, в которой используется объектив с относительным отверстием 1:2 (кривая 2); при использовании объектива с  $D/f' = 1:5$  разрешение падает до 420 твл (кривая 3), а при  $D/f' = 1:10$  — до 395 твл (кривая 4).

Результаты расчетов частотно-контрастной характеристики матрицы показали, что форма ЧКХ в значительной степени зависит от спектрального состава источника излучения, используемого в качестве подсветки объекта. Вследствие диффузии носителей в подложке часть носителей, генерированных вне обедненных областей электродов, попадает в ближайшие потенциальные ямы. В результате значение функции пространственного распределения чувствительности электрода выходит за пределы его геометрических размеров, причем эта функция оказывается зависящей от длины волны  $\lambda$ . С увеличением  $\lambda$  возрастает глубина проникновения излучения в подложку, что приводит к ухудшению частотных свойств ПЗС [5].

В подтверждение вышеизложенного на рис. 2 приведены в виде графиков результаты расчетов ЧКХ системы объектив, имеющий относительное отверстие 1:2, — матрица типа ФППЗР31. Расчет выполнен для различных значений  $\lambda$ . Как видно из рисунка, с увеличением длины волны разрешающая способность системы объектив — матричный ПЗС падает: для  $\lambda = 0,550$  мкм  $m_p = 440$  твл (кривая 1), для  $\lambda = 0,700$  мкм  $m_p = 415$  твл (кривая 2) и для  $\lambda = 0,81$  мкм  $m_p = 355$  твл (кривая 3). Изменение разрешающей способности системы в этом случае в большей степени обусловлено характеристиками матричного ПЗС.

Необходимо отметить, что при использовании высококачественного объектива с уменьшением его относительного отверстия изменение разрешающей способности можно с достаточной степенью точности (3—4 твл) считать линейным. Это позволяет оценить разрешающую способность системы объектив — матричный ПЗС при уже имеющихся данных и для объективов с другими параметрами.

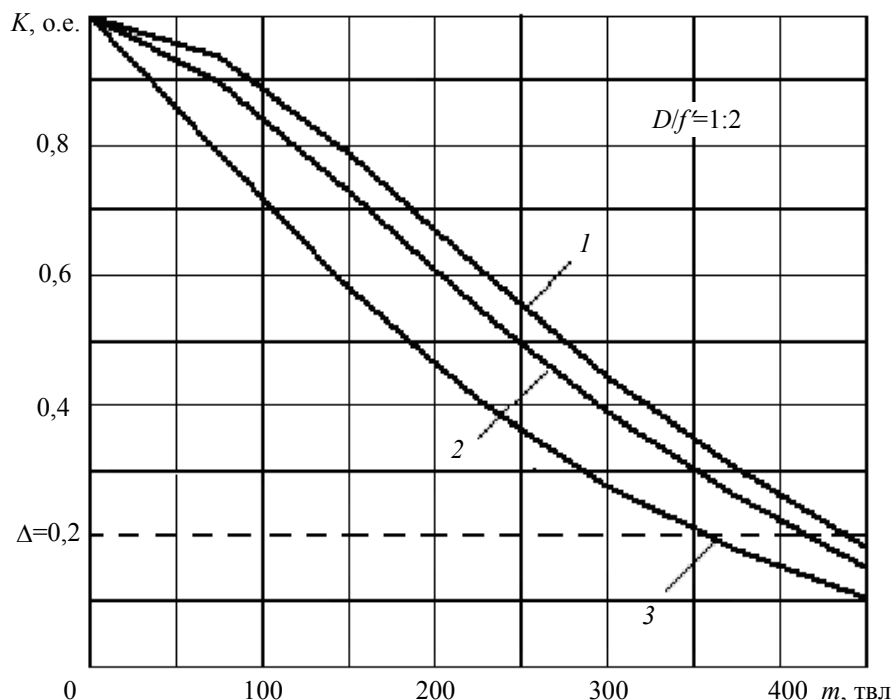


Рис. 2

Как следует из приведенных примеров, параметры объектива передающей камеры и спектральный состав источника излучения для подсветки объекта необходимо учитывать при проектировании телевизионных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабенко В. С.* Оптика телевизионных устройств. М.: Радио и связь, 1982. 256 с.
2. *Сокольский М. Н.* Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989. 221 с.
3. *Волосов Д. С.* Фотографическая оптика (Теория, основы проектирования, оптические характеристики): Учеб. пособие. М.: Искусство, 1978. 543 с.
4. *Грязин Г. Н.* Системы прикладного телевидения: Учеб. пособие. СПб.: Политехника, 2000. 277 с.
5. *Грязин Г. Н.* К расчету частотных характеристик приборов с зарядовой связью // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. Т. 44, № 3. С. 22—24.

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию  
06.07.07 г.

Н. Р. РАХИМОВ, А. Н. СЕРЬЕЗНОВ, С. Х. ШАМИРЗАЕВ

*Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина  
Новосибирск*

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПРИЕМНИКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АФН-ПЛЕНОК

Изложена технология изготовления матричного координатно-чувствительного приемника оптического излучения на основе полупроводниковых соединений в виде ступенчатообразной пленки с аномально высоким фотонапряжением.

Приемник оптического излучения (ПОИ) на основе АФН-пленок (подробнее о получении аномально фотонапряженных пленок см. работы [1,2]) представляет собой функциональный преобразователь, трансформирующий световой поток интенсивности в аномально высокое фотонапряжение. В соответствии с рассмотренной в работе [3] моделью процесс трансформации включает три этапа:

- создание фототока, обусловленного фотогенерацией и пространственным разделением неравновесных носителей на каждом микро- $p$ — $n$ -переходе;
- возникновение элементарных напряжений на микро- $p$ — $n$ -переходах в результате накопления объемных зарядов, создаваемых фототоком;
- формирование аномально большого фотонапряжения путем суммирования элементарных фотонапряжений на  $p$ — $n$ -переходах.

Технология изготовления АФН-пленок из различных полупроводниковых материалов (CdTe, Si, Ge, GaAs, GaP, Se, PbS) в виде халькогенидных сплавов, полученных методом вакуумного испарения, описана в работах [1—12]. Следует отметить, что технологический режим получения АФН-пленок зависит от большого числа параметров, таких как температура подложки и испарения, угол напыления, толщина стенки, состав и давление остаточных газов в вакуумной камере, условия термической обработки пленок после напыления и т.д.

Одним из перспективных оптических методов неразрушающего контроля является оптоэлектронный способ на основе использования излучателя и АФН-приемника, что позволяет исключить внешний источник питания для ПОИ, снизить вес и размеры, обеспечить полную электрическую развязку между цепями „светоизлучающий диод — ПОИ“.

В зависимости от функциональных возможностей ПОИ подразделяют на амплитудные (интегральные), реагирующие только на среднее значение освещенности фоточувствительной поверхности, и координатно-чувствительные (информационные), реагирующие на пространственное распределение оптического сигнала. Координатно-чувствительные ПОИ, в свою очередь, подразделяются на селективно-преобразовательные, позиционно-чувствительные и двухмерные координатно-чувствительные.

*Селективно-преобразовательные ПОИ* служат для анализа изображения и сканирования, обеспечивающего преобразование пространственно распределенного оптического сигнала в электрический видеосигнал. Сканирование осуществляется с использованием, как правило, линейно-построчной развертки изображения [3].

Матричный АФН-приемник представляет собой стеклометаллическую пластину с дискретной анизотропной проводимостью, состоящую из стеклянной основы 1 и пронизывающих ее тонких коваровых волокон 2 (рис. 1: *a* — внешний вид, *b* — вид в разрезе). На одну из



сторон стеклометаллической пластины катодным распылением наносится тонкий слой платины 3, после чего с помощью коварового травителя создаются лунки 4. На поверхность подготовленной таким образом пластины термическим испарением в вакууме наносится фоточувствительная полупроводниковая пленка, генерирующая при освещении аномальное фотонапряжение. Напыление производится под углом к нормали (5 — направление молекулярного пучка), в результате чего на боковой поверхности каждой лунки образуется дискретный фотовольтаический элемент б в виде АФН-пленки, контактирующий одним концом с коваровым волокном (вывод элементарной фотоячейки), а другим — с общим платиновым электродом, расположенным на поверхности пластины. Система таких микрофотоэлементов образует фотоприемную матрицу, представляющую собой автономный датчик многоэлементной оптической информации.

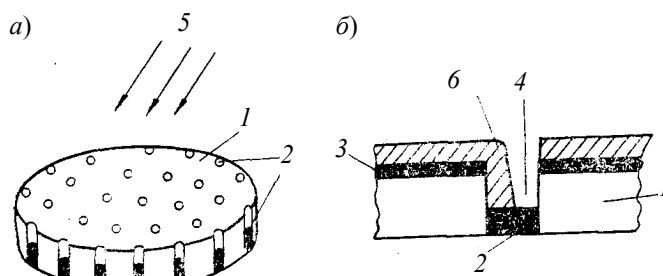


Рис. 1

При подаче оптического изображения на активную поверхность стеклометаллической пластины матричный датчик создает на выходах коваровых волокон сложный электрический сигнал, соответствующий пространственному распределению интенсивности падающего светового потока.

В отличие от известных матричных фотоприемников описываемая структура работает при отсутствии внешних источников электрического питания. Отметим также, что эта структура представляет собой фоточувствительную матрицу с высокой пространственной разрешающей способностью, изготовление которой не требует применения сложной и прецизионной масочной техники.

Позиционно-чувствительные ПОИ позволяют выделить информацию только о координате одного точечного источника излучения, значительно превышающего по интенсивности фоновую засветку.

На основе приведенной технологии были получены позиционно-чувствительные АФН-пленки и изготовлен позиционно-чувствительный автономный приемник оптического излучения КЧП-1М, состоящий из стеклянной подложки и фоточувствительной АФН-пленки из полупроводникового материала [9, 10]. Однако этот приемник имеет низкую чувствительность к оптическому излучению вследствие неоднородной структуры полученного АФН-слоя.

В работах [11, 12] приведены методика и результаты экспериментального исследования по изготовлению эффективного позиционно-чувствительного ПОИ из полупроводниковых соединений в виде ступенчатообразной АФН-пленки.

Для получения пленок различной толщины использовалась вакуумная установка ВУП-2к. В рабочей камере давление вакуума достигало значения порядка  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  мм рт. ст., температура подложки составляла  $310 \dots 480$  °С, подложку располагали под углом  $45^\circ$  к направлению молекулярного пучка напыляемого материала.

В качестве подложки использовалось стекло толщиной 2 мм. Подготовленная подложка помещалась в специальный держатель, где накрывалась подвижной маской из изоляционного материала (гетинакс). В рабочую камеру устанавливался микроэлектродвигатель (2 об/мин), при вращении которого с помощью термостойкого шнура, связанного с маской, постепенно открывалась поверхность подложки. В результате на подложке размером  $2 \times 20$  мм получались ступенчатообразные пленки. Толщина каждой ступени определялась при использовании интерференционного микроскопа МИИ-4.

Нанесение пленки возможно при различных режимах. Например, фоточувствительный слой наносят термическим испарением кристаллического теллурида кадмия при температуре  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$  в вакууме при давлении  $10^{-4}$  мм рт. ст. на стеклянную подложку, расположенную под углом  $45^{\circ}$  к направлению молекулярного пучка, при изначально закрытой маске. Маска открывается постепенно, обеспечивая ступенчатое изменение толщины пленки, составляющее 1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8 мкм. Значение АФН также ступенчато изменяется: 150, 96, 85, 43, 22 В соответственно при освещенности  $I = 104$  лк.

Структура аномально фотонапряженной пленки приведена на рис. 2, где 1 — ступенчатообразный фоточувствительный слой кристаллического теллурида кадмия, 2 — стеклянная подложка, 3 — металлические контакты. При перемещении потока падающего направленного монохроматического излучения  $\Phi_0$  от ступени с толщиной пленки 1 мкм до ступени с толщиной пленки 1,8 мкм пропорционально уменьшается генерируемое фотонапряжение  $U_{\text{АФН}}$ .

Анализ графиков зависимости фотонапряжения  $U_{\text{АФН}}$  от толщины  $d$  пленки (рис. 3) показывает, что АФН-эффект в пленках типа теллурида кадмия связан с суммированием напряжений  $p$ — $n$ -переходов. Согласно опытным данным [1—7] для пленок теллурида кадмия эффективная толщина чувствительного слоя составляет 1 мкм. В исследованных термически обработанных пленках фотонапряжение сначала возрастало, а потом с увеличением толщины уменьшалось. Монохроматическая освещенность при всех измерениях поддерживалась постоянной.

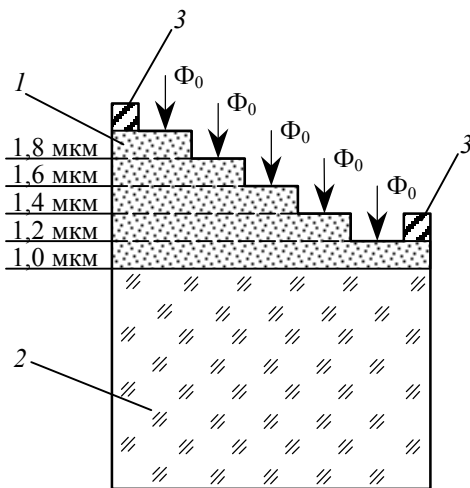


Рис. 2

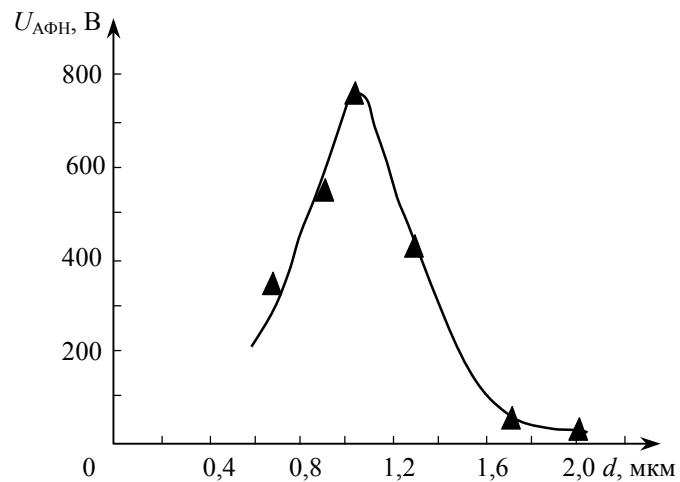


Рис. 3

На основе описанного устройства был разработан позиционно-чувствительный автономный приемник оптического излучения, выходной сигнал которого содержит информацию о направлении и величине смещения потока излучения.

Ниже приведены основные параметры позиционно-чувствительного ПОИ на основе АФН-пленки из CdTe.

Чувствительность, В/мм .....	2—5
Освещенность, лк .....	10
Внутреннее сопротивление, Ом .....	$10^{12}$ — $10^{14}$
Постоянная времени, с .....	0,8—1,0
Спектр излучения, мкм .....	0,5—0,83
Размеры чувствительной области, мм .....	$2 \times 15$
Размеры, мм .....	$2 \times 2 \times 20$
Масса, г, не более .....	3,0

Двухмерный координатно-чувствительный ПОИ относится к наиболее универсальным, так как позволяет преобразовывать в электрический сигнал всю информацию о пространственном распределении интенсивности оптического сигнала. Большинство таких приемников

используют принцип прибора с зарядовой связью (ПЗС). В работе [13] описан двухмерный координатно-чувствительный датчик для регистрации параметров оптического излучения, состоящий из фотодетектора, например ПЗС-матрицы, перед которым установлен оптический элемент, коэффициент пропускания которого изменяется в зависимости от его местонахождения. Недостатками этого датчика являются сложность оптической системы, низкая чувствительность и обязательное применение электропитания.

Исходя из этого была поставлена задача создания двухмерного координатно-чувствительного автономного приемника оптического излучения повышенной чувствительности [14]. Указанная цель достигается тем, что создается двухмерная ступенчатообразная полупроводниковая АФН-пленка с постепенным увеличением толщины ступеней по оси  $X$ , с продолжением увеличения на каждой следующей ступени по оси  $Y$  или наоборот. Технология изготовления пленки аналогична описанной выше для одномерного координатно-чувствительного фотоприемника. Пленки, получаемые на подложке размером  $20 \times 20$  мм, двухмерно ступенчатообразны по осям  $X$  и  $Y$ . Толщина каждой ступени определяется при помощи интерференционного микроскопа МИИ-4.

На рис. 4 приведена структура такой АФН-пленки, где 1 — двухмерный ступенчатообразный фоточувствительный слой кристаллического теллурида кадмия, 2 — стеклянная подложка, 3 — металлические контакты. Как и в случае с одномерной пленкой возможны различные режимы нанесения.

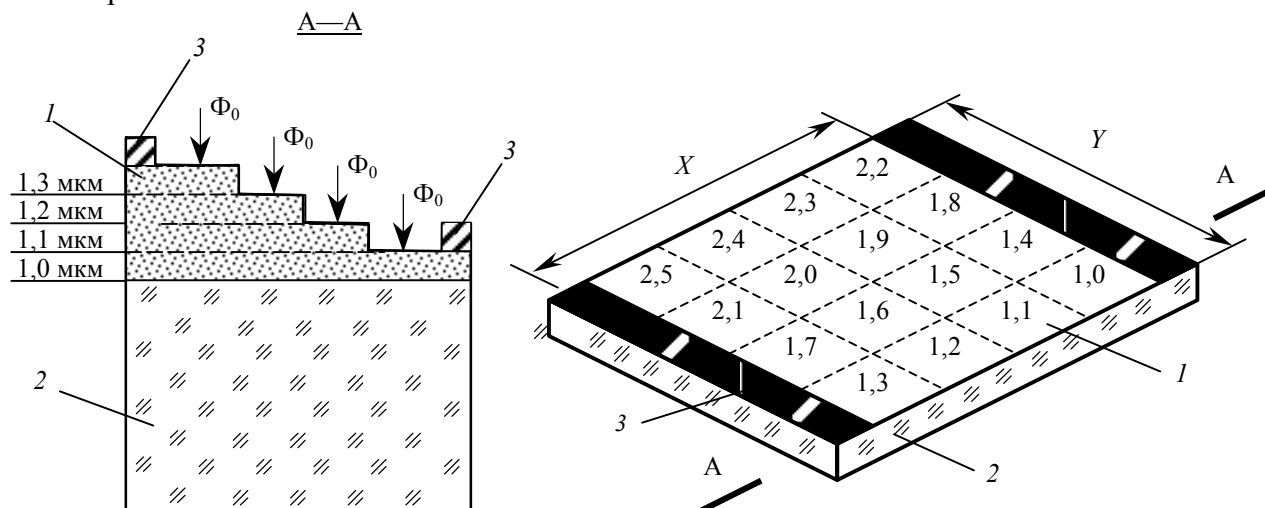


Рис. 4

**Пример 1.** Фоточувствительный слой наносится термическим испарением кристаллического теллурида кадмия при температуре  $420^\circ\text{C}$  в вакууме при давлении  $10^{-5}$  мм рт. ст. на стеклянную подложку, расположенную под углом  $45^\circ$  к направлению молекулярного пучка, при начально *закрытых* шторках маски. Сначала на один шаг открывается шторка по оси  $Y$  при последующем пошаговом открывании второй шторки по оси  $X$ . После полного открытия шторки по оси  $X$  она возвращается в исходное положение, а шторка по оси  $Y$  открывается еще на шаг, и так до полного открытия всей маски. Толщина ступеней при размере матрицы  $3 \times 3$  составляет: 0,8, 1,0, 1,2, 1,3, 1,5, 1,8, 2,0, 2,3, 2,6 мкм; значения АФН соответственно 45, 60, 51, 45, 34, 31, 17, 6, 2 В при освещенности  $I = 104$  лк.

**Пример 2.** Фоточувствительный слой наносится термическим испарением кристаллического теллурида кадмия при температуре  $420^\circ\text{C}$  в вакууме при давлении  $10^{-5}$  мм рт. ст. на стеклянную подложку, расположенную под углом  $45^\circ$  к направлению молекулярного пучка, при начально *открытых* шторках маски. Сначала на один шаг закрывается шторка по оси  $Y$  при последующем пошаговом закрывании второй шторки по оси  $X$ . После полного закрытия шторки по оси  $X$  она возвращается в исходное положение, а шторка по оси  $Y$  закрывается еще

на шаг, и так до полного закрытия всей маски. Толщина ступеней при размере матрицы  $3 \times 3$  составляет: 1,0, 1,3, 1,4, 1,5, 1,7, 1,8, 2,0, 2,1, 2,3 мкм; значения АФН соответственно 68, 52, 44, 41, 34, 27, 23, 15, 8 В при освещенности  $I = 104$  лк.

На основе устройства, полученного описанным способом, выходной сигнал которого содержит информацию о направлении и величине смещения потока излучения по осям  $X$  и  $Y$ , построен двухмерный координатно-чувствительный автономный ПОИ, предназначенный для определения координат источника светового излучения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рахимов Н. Р., Серьезнов А. Н. АФН-пленки и их применение. Новосибирск: СибНИИ, 2005. 64 с.
2. Рахимов Н. Р., Мамадалиева Л. К. Приемники оптического излучения на основе АФН-пленок // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 8. С. 53—56.
3. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектронике / Под ред. Э. И. Адировича. Ташкент: ФАН, 1972. С. 177.
4. Рахимов Н. Р., Хатамов С. О., Газиев Б. Технология изготовления АФН-пленок теллурида кадмия с серебром // Взаимодействия ионов с поверхностью. М., 2003. Т. 2. С. 196—199.
5. Рахимов Н. Р., Хатамов С. О. Получение отражающих серебряных покрытий ионной бомбардировкой для увеличения АФН-эффекта // Взаимодействие ионов с поверхностью. М., 2001. Т. 2. С. 191—194.
6. Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Сб. статей. Киев, 2000. С. 59—63.
7. Пат. РУз IAP 02610. Способ получения фотогенераторов / Н. Р. Рахимов, А. М. Касымахунова, Ш. Ю. Усманов. 2003.
8. Мاستов Э. М. Исследование аномально большого фотоманнитного эффекта в пленках теллурида кадмия: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ташкент, 1972. 125 с.
9. Rahimov N. R., Dzhurakhalov A. A. Investigation of APV-CdTe-films and development of optoelectronic devices on their basis // The European Material Research Conf. EMRS 2002. Spring meeting. Strasbourg, France, 2002. P. 242.
10. Mirzamatkhudov T. M., Rahimov N. R., Gafurov U. A. Coordinate and Sensitive Self-Contained Optical Radiation Detector КЧП-1М. Moscow: Vneshtorgizdat, 1991.
11. Пат. РФ № 2246779. Координатно-чувствительный автономный приемник оптического излучения / Н. Р. Рахимов, А. Н. Серьезнов // Б. И. 2005. № 5.
12. Рахимов Н. Р., Серьезнов А. Н. Координатно-чувствительный приемник оптического излучения на основе пленок с аномальным фотонапряжением // ПТЭ. 2005. № 4. С. 125—126.
13. Optischer positionsauflösender Sensor. Заявка № 19714820 Германия, МПК<sup>6</sup> G 01 J 1/22, В 64 G 1/36. Оpub. 15.10.98.
14. Двухмерный координатно-чувствительный приемник оптического излучения / Н. Р. Рахимов, А. Н. Серьезнов, П. М. Петров. Пол. решение по заявке 2005 113383/28.

Рекомендована Институтом

Поступила в редакцию  
18.09.06 г.

О. Ю. ПИКУЛЬ, В. И. СТРОГАНОВ, Ю. М. КАРПЕЦ

Дальневосточный государственный университет путей сообщения  
Хабаровск

## КОНОСКОПИЧЕСКИЕ КАРТИНЫ В ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ

Описывается влияние естественной оптической активности на формирование коноскопических картин в кварцевых кристаллических пластинах различной толщины.

В оптическом приборостроении при создании систем записи и обработки информации, систем оптической связи и систем неразрушающего контроля используются элементы, изготовленные из кристаллов. Для этой цели применяются кристаллы, обладающие естественной оптической активностью, что вносит дополнительные особенности в протекание оптических процессов. В этом случае учет влияния естественной оптической активности необходим.

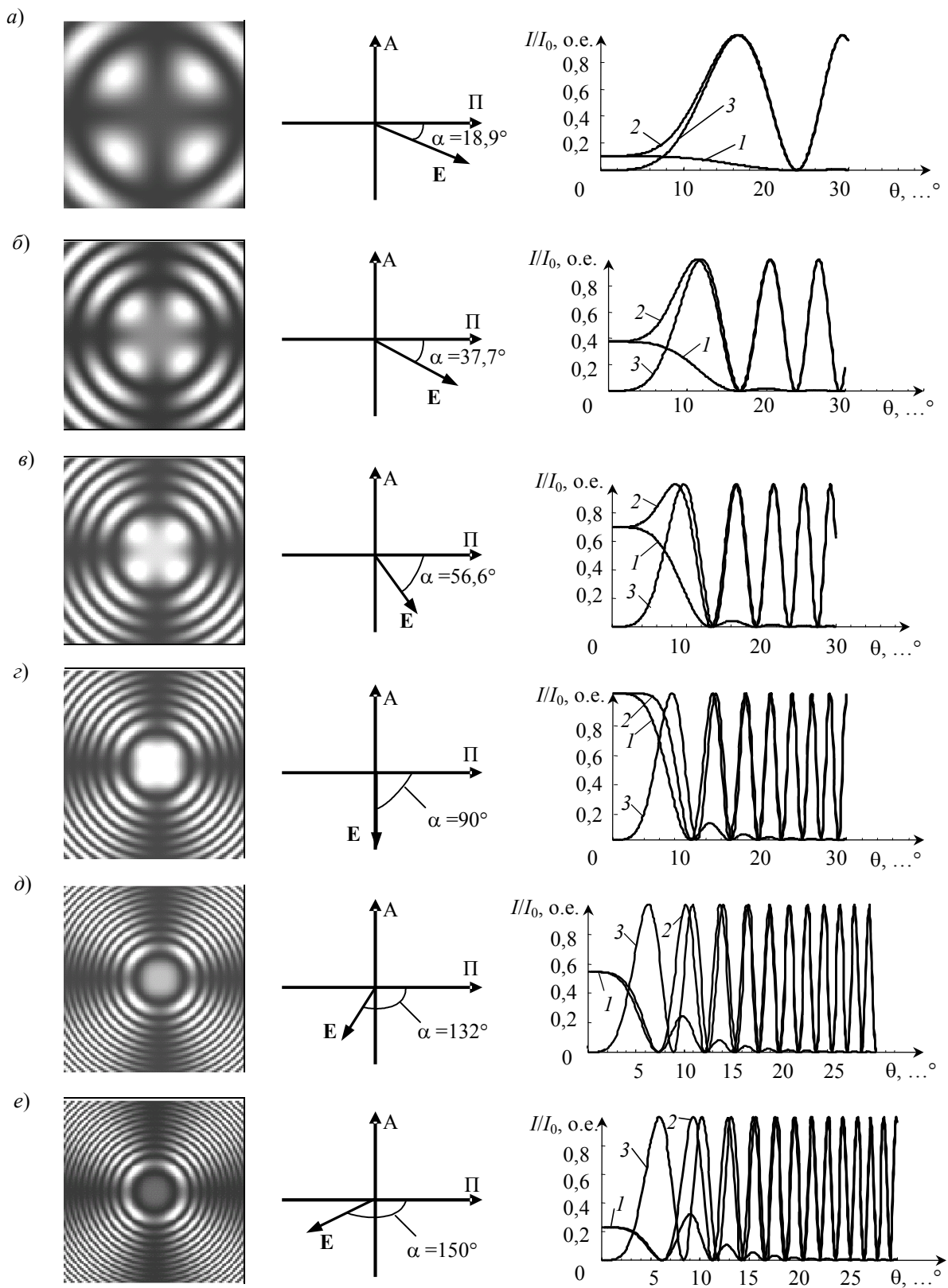
В настоящей статье на примере плоскопараллельных пластин, изготовленных из кристалла кварца, исследуется влияние естественной оптической активности на формирование интерференционных (коноскопических) картин, наблюдаемых на экране. Анализ коноскопических картин в оптически активных кристаллах приведен в работах [1—6].

С использованием пакета компьютерной математики „Maple-6“ [6] был выполнен расчет коноскопических картин в кристаллических пластинах различной толщины, изготовленных из кварца. Расчет произведен по формулам для интенсивности излучения, прошедшего через пластину, находящуюся между скрещенными поляризатором и анализатором [4, 5].

На рисунке, *a—e* приведены коноскопические картины в кварцевых плоскопараллельных пластинах; показаны направления осей пропускания поляризатора (П), анализатора (А) и вектора напряженности  $\mathbf{E}$  электрического поля световой волны, а также графики, характеризующие коноскопические картины; здесь  $I/I_0$  — относительная интенсивность излучения, прошедшего через систему поляризатор — пластину — анализатор излучения;  $I_0$  — интенсивность света, выходящего из системы при отсутствии пластины (направления осей пропускания поляризатора и анализатора параллельны);  $\theta$  — угол поворота пластины. Оптические оси пластин перпендикулярны входной и выходной граням.

При различной настройке оптической системы поляризатор — кристаллическая пластинка — анализатор получены следующие результаты.

*Вариант 1.* Для исследования влияния только оптической активности кристалла на интенсивность излучения, прошедшего через пластину, использовалась настройка оптической системы, исключая влияние двулучепреломления. Ось пропускания поляризатора (П) ориентирована горизонтально, а вращение пластины осуществляется вокруг вертикальной оси, перпендикулярной оси П. На пластину падает только один луч, в данном случае необыкновенный. Из кристалла выходят два луча: частично ослабленный необыкновенный луч и обусловленный им обыкновенный. Из системы поляризатор — кристалл — анализатор выходит только обыкновенный луч, называемый волной гирации (см. рисунок, кривая 1). При этом полученная зависимость  $I/I_0$ , характеризующая коноскопическую картину в области горизонтальной ветви „мальтийского креста“, обусловлена только присутствием в пластине естественной оптической активности.



*Вариант 2.* При вращении исследуемой кристаллической пластины вокруг вертикальной оси, составляющей угол  $45^\circ$  с осями пропускания поляризатора и анализатора, зависимость интенсивности прошедшего через систему излучения от угла поворота пластины характеризует коноскопическую картину под углом  $45^\circ$  относительно ветвей „мальтийского креста“.

Особенность данной зависимости (см. рисунок, кривая 2) заключается в одновременном проявлении влияния двулучепреломления (интерференция между обыкновенным и необыкновенным лучами) и влияния оптической активности. При распространении излучения вблизи и вдоль оптической оси наиболее заметно влияние оптической активности, а в направлениях, отличных от оптической оси, эффект двулучепреломления значительно превышает влияние оптической активности.

*Вариант 3.* Рассчитана зависимость интенсивности прошедшего через систему излучения от угла поворота пластины без учета влияния оптической активности (см. рисунок, кривая 3), т.е. в предположении наличия только двулучепреломления (с ориентацией системы, соответствующей варианту 2).

Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными.

При использовании пластины толщиной 1 мм (см. рисунок, а) в центре картины отчетливо виден „мальтийский крест“. Вектор  $\mathbf{E}$  излучения при распространении вдоль оптической оси кристалла поворачивается на угол  $\alpha = 18,9^\circ$  от первоначального горизонтального положения. При этом интенсивность прошедшего излучения составляет примерно 10 % от максимального значения (расчет всех зависимостей произведен без учета отражения). Оптическая активность проявляется крайне слабо, коноскопическая картина практически не отличается от картины неактивного кристалла. Волна гирации  $I$  приобретает нулевое значение приблизительно при величине угла  $\theta = 25^\circ$ . Зависимость 2, характеризующая совместное действие оптической активности и двулучепреломления, и зависимость 3, характеризующая только двулучепреломление, начинают совпадать при  $\theta = 10 \dots 12^\circ$ .

При использовании пластины толщиной 2 мм (см. рисунок, б) вектор  $\mathbf{E}$  излучения при распространении вдоль оптической оси кристалла поворачивается на угол  $\alpha = 37,7^\circ$ . Черный крест в центральной части картины светлеет, пропускание в центре картины составляет около 40 %. Волна гирации  $I$  становится более отчетливой, появляются небольшие колебания. Минимумы, равные нулю (черные кольца), совпадают для всех зависимостей.

При использовании пластины толщиной 3 мм (см. рисунок, в) вектор  $\mathbf{E}$  излучения при распространении вдоль оптической оси кристалла поворачивается на угол  $\alpha = 56,6^\circ$ . „Мальтийский крест“ в центральной части картины проступает светло-серым цветом. Пропускание излучения в центре картины составляет около 70 %. Заметные колебания волны гирации  $I$  затухают при  $\theta = 25^\circ$ , зависимости 2 и 3 начинают совпадать при  $\theta = 10 \dots 12^\circ$ .

При использовании пластины толщиной 4,8 мм (см. рисунок, г) вектор  $\mathbf{E}$  излучения при распространении вдоль оптической оси кристалла поворачивается на угол  $\alpha = 90^\circ$  и совпадает с осью пропускания анализатора. „Мальтийский крест“ в центральной части отсутствует. Пропускание излучения в центре картины составляет 100 %. Волна гирации  $I$  и зависимость 2 отличаются незначительно. Для волны гирации  $I$  пропускание в первом боковом максимуме составляет около 10 %.

При использовании пластин толщиной 7 и 8 мм (см. рисунок, д, е) угол  $\alpha > 90^\circ$ , что приводит к уменьшению интенсивности излучения при распространении лучей вдоль оптической оси пластины.

Коноскопические картины и зависимости  $I/I_0$ , наблюдаемые в ходе эксперимента, достаточно хорошо совпадают с рассчитанными.

Таким образом, по данным результатам можно сделать вывод о том, что влияние оптической активности в кристалле кварца достаточно велико при значениях  $\theta = 0 \dots 20^\circ$ . При

небольшой толщине пластин и малой величине оптической активности оптически активные кристаллы проявляют свойства, аналогичны кристаллам с двулучепреломлением. При увеличении толщины пластины влияние естественной оптической активности кристалла на формирование коноскопической картины возрастает, что проявляется в исчезновении „мальтийского креста“ в центре картины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
2. Меланхолин Н. М. Методы исследования оптических свойств кристаллов. М.: Наука, 1970.
3. Сиротин Ю. И. Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1979.
4. Константинова А. Ф., Гречушников Б. И., Бокуть Б. В., Валяшко Е. Г. Оптические свойства кристаллов. Минск.: Наука и техника, 1995.
5. Рудой К. А., Набатов Б. В., Строганов В. И. и др. Коноскопические картины в оптически активных одноосных кристаллах // Кристаллография. 2003. Т. 48, № 2. С. 334—339.
6. Рудой К. А. Коноскопические картины оптически активных кристаллов парателлуриата и иодата лития: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Хабаровск, 2003.

Рекомендована кафедрой  
физики

Поступила в редакцию  
27.03.06 г.

УДК 621.397.6

А. А. МАКАРЕНКО

*Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики*

Л. С. ТУРНЕЦКИЙ

*Научно-производственное предприятие „Радар ММС“  
Санкт-Петербург*

### **КОРРЕКЦИЯ ПРОЕКТИВНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ МАЛОВЫСОТНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АЭРОСЪЕМКЕ**

Представлено описание алгоритма коррекции проективных искажений оптико-электронного аэроснимка, формируемого установленной на борту летательного аппарата аппаратурой при полете на малой высоте. Приведена математическая модель алгоритма.

Оптико-электронная (телевизионная, тепловизионная или лазерная) аэросъемка выполняется обычно при составлении планов или карт местности. Аэросъемка ведется с помощью оптико-электронной камеры, жестко закрепленной на борту летательного аппарата (ЛА), выполняющего горизонтальный полет. В отличие от прецизионной аэросъемки, осуществляемой с высоты от нескольких до десятков километров, маловысотная оптико-электронная аэросъемка ведется с высоты, не превышающей 500 м. При съемке с таких высот искажениями, вызванными кривизной земной поверхности, можно пренебречь. Поэтому будем считать, что объект съемки — плоская поверхность. Оптическая ось оптико-электронной камеры, как правило, ориентирована вниз перпендикулярно направлению полета (продольной оси ЛА) и поперечной оси ЛА (в надиру). При



идеальных условиях полета оптическая ось перпендикулярна также и поверхности объекта съемки, т.е. ориентирована вертикально по отношению к направлению полета.

Однако вследствие пространственных эволюций ЛА оптическая ось телевизионной камеры меняет свое направление, и на фоточувствительной поверхности оптико-электронного преобразователя формируется искаженный аэроснимок. Методы коррекции [1, 2] искажений недостаточно исследованы, а результаты проведенных исследований не нашли требуемого отражения.

Коррекция проективных искажений оптико-электронного аэроснимка может быть рассмотрена как результат геометрического преобразования искаженного изображения, что приводит к восстановлению формы и истинного взаимного расположения объектов на аэроснимке. Геометрические преобразования реализуются созданием нового изображения путем пересчета значений координат элементов исходного (реального) изображения к координатам тех же элементов в преобразованном (синтезированном) изображении. В результате обработанное изображение, полученное при пространственных эволюциях носителя камеры, будет адекватным изображению объекта съемки, которое было бы получено при строго перпендикулярной ориентации оптической оси камеры по отношению к плоскости объекта.

Будем считать, что структура дискретизации полученного в результате телевизионной аэросъемки изображения — ортогональная [3].

Рассмотрим задачу разработки алгоритма коррекции проективных искажений формы объектов и восстановления их истинного взаимного расположения. Исходные данные для расчетов — оценки углов крена и тангажа ЛА, а также высота полета над объектом съемки. В качестве геометрического преобразования, которое следует использовать для коррекции, выберем проективное преобразование [4, 5].

Определим аналитические зависимости, связывающие координаты элементов полученного оптико-электронного аэроснимка с координатами соответствующих им элементов в обработанном по алгоритму проективного преобразования изображении.

Для решения задачи предварительно необходимо аналитически описать плоскость проекции (картинную плоскость)  $P$  и плоскость объекта съемки  $L$  в нормальной системе координат (СК)  $OZ_g X_g Y_g$  (рис. 1). Плоскости проекции  $P$  соответствует связанная СК  $OZ X Y$ . Уравнение плоскости  $P$  в этой СК имеет вид  $y = 0$ . Отметим, что обе системы координат являются прямоугольными и правыми.

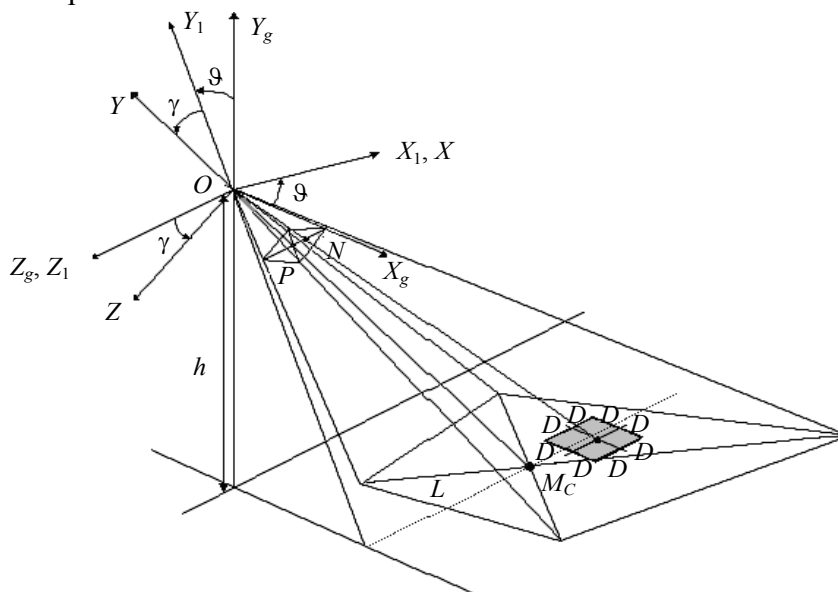


Рис. 1

Так как оси  $OX_g$  и  $OX$  находятся в одной плоскости, то в рассматриваемом случае важны только углы крена ( $\gamma$ ) и тангажа ( $\theta$ ), соответствующие повороту ЛА вокруг продольной и поперечной осей.

Вектор  $\mathbf{n}$  единичной длины, нормальный к плоскости  $P$ , имеет следующие координаты в СК  $OZXY$ :  $\{0,0,1\}$ . Этот же вектор может быть описан и в СК  $OZ_gX_gY_g$ . Поэтому пространственное расположение плоскости  $P$  в нормальной СК может характеризоваться формулами преобразования ее координат из связанной системы в нормальную.

Взаимное положение двух СК (см. рис. 1) определяется углом тангажа и углом крена. Ось  $OX_1$  — это продольная ось ЛА, повернутая в пространстве на угол  $\vartheta$  относительно оси  $OX$  и принадлежащая плоскости  $Y_gOX_g$ . Таким образом, при известных значениях углов  $\vartheta$  и  $\gamma$  преобразование нормальной СК в связанную можно представить в виде последовательного выполнения двух поворотов:

1) поворота СК  $OZ_gX_gY_g$  на угол  $\vartheta$  вокруг поперечной оси  $OZ_g$ , совпадающей с осью  $OZ_1$ , переводящего эту систему в промежуточную СК  $OZ_1X_1Y_1$ ;

2) поворота системы  $OZ_1X_1Y_1$  на угол  $\gamma$  вокруг продольной оси  $OX_1$ , совпадающей с осью  $OX$ , переводящего эту систему в СК  $OZXY$ .

Каждый из указанных поворотов производится только в одной из координатных плоскостей [4]. В матричном виде аналитическое описание рассматриваемого преобразования может быть представлено как

$$\begin{bmatrix} z_g \\ x_g \\ y_g \end{bmatrix} = [z, x, y] \mathbf{T}, \quad (1)$$

где матрица преобразования координат

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\vartheta \cdot \sin\gamma & -\cos\vartheta \cdot \sin\gamma \\ 0 & \cos\vartheta & \sin\vartheta \\ \sin\gamma & -\sin\vartheta \cdot \cos\gamma & \cos\vartheta \cdot \cos\gamma \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Используя выражение (2), получим аналитическое описание плоскости проекции  $P$  в нормальной СК  $OZ_gX_gY_g$ . Для этого вектор  $\mathbf{n}$  умножим на матрицу преобразований, в результате

$$z_g \sin\gamma - x_g \sin\vartheta \cdot \cos\gamma + y_g \cos\vartheta \cdot \cos\gamma = 0. \quad (3)$$

Поскольку  $(\sin\gamma)^2 + (\sin\vartheta \cdot \cos\gamma)^2 + (\cos\vartheta \cdot \cos\gamma)^2 \equiv 1$ , коэффициенты при переменных  $z_g, x_g, y_g$  равны направляющим косинусам вектора  $\mathbf{n}$  в системе  $OZ_gX_gY_g$  [4]. Таким образом,  $\mathbf{n} = \sin\gamma \cdot \mathbf{k} - \sin\vartheta \cdot \cos\gamma \cdot \mathbf{i} + \cos\vartheta \cdot \cos\gamma \cdot \mathbf{j}$ , где  $\mathbf{k}, \mathbf{i}, \mathbf{j}$  — орты системы координат  $OZ_gX_gY_g$ .

Следовательно, выражение (3) может считаться нормированным уравнением плоскости проекции  $P$  [6], которое в общем случае содержит постоянную величину, равную расстоянию от начала координат до этой плоскости. Если же в начало координат поместить центр проекции, а плоскость проекции  $P$  отнести на расстояние  $f$  от начала координат, то вместо выражения (3) получим

$$z_g \sin\gamma - x_g \sin\vartheta \cdot \cos\gamma + y_g \cos\vartheta \cdot \cos\gamma - f = 0, \quad (4)$$

где  $f$  — фокусное расстояние объектива камеры, ведущей съемку.

Получив нормированное уравнение плоскости проекции  $P$ , рассмотрим процедуру коррекции проективных искажений оптико-электронного аэроснимка, выполняемую на основе предложенного алгоритма преобразования координат.

В нормальной СК  $OZ_gX_gY_g$  рассмотрим две плоскости:

— плоскость объекта съемки  $L$ , заданную в нормированном виде уравнением  $y_g - h = 0$ ,

где  $h$  — высота полета ЛА;

— плоскость проекции  $P$ , заданную в нормированном виде уравнением (4).

На проекции объекта съемки выделим интересующий объект. На плоскости  $P$  в связанной СК  $OZXY$  зададим координаты точки  $N(z_N, x_N, y_N)$ , находящейся в центре выделенного объекта.

Координаты точки  $N(z_{N,g}, x_{N,g}, y_{N,g})$  в нормальной СК  $OZ_g X_g Y_g$  определяются путем умножения вектор-строки  $N(z_N, x_N, y_N)$  на полученную в выражении (2) матрицу преобразования координат  $\mathbf{T}$ :

$$\left. \begin{aligned} z_{N,g} &= z_N \cos \gamma + y_N \sin \gamma; \\ x_{N,g} &= z_N \sin \vartheta \cdot \sin \gamma + x_N \cos \vartheta - y_N \sin \vartheta \cdot \cos \gamma, \\ y_{N,g} &= -z_N \cos \vartheta \cdot \sin \gamma + x_N \sin \vartheta + y_N \cos \vartheta \cdot \cos \gamma. \end{aligned} \right\}$$

Запишем уравнение для проецирующей прямой  $ON$ , проходящей через начало координат  $O$  и точку  $N(z_{N,g}, x_{N,g}, y_{N,g})$ , принадлежащую плоскости проекции  $P$  (используя условия параллельности прямых):

$$\frac{z}{z_{N,g}} = \frac{x}{x_{N,g}} = \frac{y}{y_{N,g}}.$$

Зная координаты точки  $N$  в СК  $OZ_g X_g Y_g$ , определим в той же системе координаты точки пересечения проецирующей прямой  $ON$  с плоскостью объекта съемки  $L$  —  $N(z_{L,g}, x_{L,g}, y_{L,g})$ .

Используя метод, описанный в работах [6, 7], введем вспомогательную переменную

$$t = \frac{-h}{-z_N \cos \vartheta \cdot \sin \gamma + x_N \sin \vartheta + y_N \cos \vartheta \cdot \cos \gamma},$$

тогда

$$\left. \begin{aligned} z_{L,g} &= tz_{N,g} = \frac{-h(z_N \cos \gamma + y_N \sin \gamma)}{-z_N \cos \vartheta \cdot \sin \gamma + x_N \sin \vartheta + y_N \cos \vartheta \cdot \cos \gamma}; \\ x_{L,g} &= tx_{N,g} = \frac{-h(z_N \sin \vartheta \cdot \sin \gamma + x_N \cos \vartheta - y_N \sin \vartheta \cdot \cos \gamma)}{-z_N \cos \vartheta \cdot \sin \gamma + x_N \sin \vartheta + y_N \cos \vartheta \cdot \cos \gamma}, \\ y_{L,g} &= ty_{N,g} = \frac{-h(-z_N \cos \vartheta \cdot \sin \gamma + x_N \sin \vartheta + y_N \cos \vartheta \cdot \cos \gamma)}{-z_N \cos \vartheta \cdot \sin \gamma + x_N \sin \vartheta + y_N \cos \vartheta \cdot \cos \gamma} = -h. \end{aligned} \right\}$$

Затем точку  $N(z_{L,g}, x_{L,g}, y_{L,g})$  примем за центр интересующего объекта на плоскости  $L$  и определим границы  $x_{L,g,0}, x_{L,g,1}, y_{L,g,0}, y_{L,g,1}$  области объекта съемки, проективные искажения которой требуется скорректировать (см. рис. 1):

$$x_{L,g,0} = x_{L,g} - D, \quad x_{L,g,1} = x_{L,g} + D, \quad y_{L,g,0} = y_{L,g} - D, \quad y_{L,g,1} = y_{L,g} + D,$$

где  $D$  — величина, определяемая размерами выделенного объекта.

Далее, зададим шаги изменения значений координат по осям  $OX (S_x)$  и  $OZ (S_z)$ , исходя из условия формирования массива элементов скорректированного изображения в формате  $r$  строк по  $m$  элементов в строке:

$$S_x = 2D/r, \quad S_z = 2D/m, \tag{5}$$

где  $m$  и  $r$  — нечетные числа.

Теперь следует вычислить координаты элементов плоскости проекции  $P$ , соответствующих элементам выделенной области плоскости объекта съемки  $L$ . Выполним это следующим образом:

1) сформируем на обрабатываемой области плоскости  $L$  растр путем разбиения ее на  $r$  строк по  $m$  элементов в строке при условии размещения определенной ранее точки  $N$  в центре рассматриваемой области;

2) получим выражения для проецирующих прямых, проходящих через начало координат и точки области плоскости  $L$ , координаты которых задаются путем сканирования этой

области (т. е. путем перебора номеров строк ( $Q_x$ ) и номеров элементов в строке ( $Q_z$ ) в пределах  $[-(r-1)/2 \leq Q_x \leq (r-1)/2]$  и  $[-(m-1)/2 \leq Q_z \leq (m-1)/2]$  с последующим вычислением соответствующих им координат в СК  $OZ_g X_g Y_g$ );

3) в системе координат  $OZXY$  определим координаты точек пересечения  $M$  проецирующей прямой и плоскости проекции  $P$ .

Далее, определим координаты некоторой точки  $M_C$  плоскости проекции  $P$  (остальные могут быть определены аналогично).

Итак, в пространстве заданы:

— нормальная СК  $OZ_g X_g Y_g$ ;

— плоскость проекции  $P$ , определяемая выражением (4);

— точка  $M_{C,g}(z_{C,g}, x_{C,g}, y_{C,g})$  плоскости объекта съемки  $L$  в СК  $OZ_g X_g Y_g$ , для которой требуется определить соответствующую точку  $M_P(z_P, x_P, y_P)$  на плоскости проекции  $P$  в СК  $OZXY$ .

Отметим, что с учетом выражений (5) координаты каждой точки  $M_C$  плоскости  $L$ , заданные в виде: [номер элемента в строке  $Q_z$  массива], [номер строки  $Q_x$  массива], связаны с координатами этой же точки  $M_{C,g}(z_{C,g}, x_{C,g}, y_{C,g})$  в нормальной СК следующими расчетными соотношениями:

$$z_{C,g} = z_{L,g} + Q_z S_z, \quad x_{C,g} = x_{L,g} + Q_x S_x.$$

Из определения плоскости объекта съемки  $L$  следует, что координаты каждой точки этой плоскости могут быть представлены как  $M_{C,g}(z_{C,g}, x_{C,g}, -h)$ .

Запишем уравнение для проецирующей прямой  $OM_C$ , проходящей через начало координат  $O$  и точку  $M_C$ :

$$\frac{z}{z_{C,g}} = \frac{x}{x_{C,g}} = \frac{y}{-h}.$$

Зная координаты точки  $M_C$  в нормальной СК  $OZ_g X_g Y_g$ , определим в этой же системе координаты точки пересечения проецирующей прямой  $OM_C$  с плоскостью проекции  $P$  —  $M_C(z_{C,P,g}, x_{C,P,g}, y_{C,P,g})$ .

Повторно используя метод, описанный в работах [6, 7], введем вспомогательную переменную

$$u = \frac{-f}{z_{C,g} \sin \gamma - x_{C,g} \sin \vartheta \cdot \cos \gamma - h \cos \vartheta \cdot \cos \gamma},$$

тогда

$$\left. \begin{aligned} z_{C,P,g} = uz_{C,g} &= \frac{-fz_{C,g}}{z_{C,g} \sin \gamma - x_{C,g} \sin \vartheta \cdot \cos \gamma - h \cos \vartheta \cdot \cos \gamma}, \\ x_{C,P,g} = ux_{C,g} &= \frac{-fx_{C,g}}{z_{C,g} \sin \gamma - x_{C,g} \sin \vartheta \cdot \cos \gamma - h \cos \vartheta \cdot \cos \gamma}, \\ y_{C,P,g} = uy_{C,g} &= \frac{-f(-h)}{z_{C,g} \sin \gamma - x_{C,g} \sin \vartheta \cdot \cos \gamma - h \cos \vartheta \cdot \cos \gamma}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Полученные значения координат преобразуем в связанную СК  $OZXY$  плоскости проекции  $P$ . Для этого первоначально определим матрицу преобразования координат из нормальной системы в связанную, используя равенство (1) и матрицу преобразования  $\mathbf{T}$  в формуле (2).

Поскольку преобразование координат из СК  $OZXY$  в СК  $OZ_gX_gY_g$  определяет переход из одной декартовой системы в другую, то матрица  $T$  в формуле (1) является ортогональной, и матрица  $T^{-1}$ , обратная ортогональной матрице  $T$ , совпадает с транспонированной матрицей  $T^T$ , получаемой из матрицы  $T$  переменной местами ее строк и столбцов [8].

Далее, произведем преобразование координат точки пересечения  $M_C(z_{C,P,g}, x_{C,P,g}, y_{C,P,g})$  проецирующей прямой  $OM_C$  с плоскостью проекции  $P$  из нормальной СК в связанную путем умножения вектор-строки  $M_C(z_{C,P,g}, x_{C,P,g}, y_{C,P,g})$  на полученную обратную матрицу. С учетом уравнений (6) получаем искомые координаты точки  $M_P(z_P, x_P, y_P)$  плоскости проекции  $P$  в СК  $OZXY$ :

$$\left. \begin{aligned} z_P &= \frac{-f(z_{C,g} \cos \gamma + x_{C,g} \sin \vartheta \cdot \sin \gamma + h \cos \vartheta \cdot \sin \gamma)}{z_{C,g} \sin \gamma - x_{C,g} \sin \vartheta \cdot \cos \gamma - h \cos \vartheta \cdot \cos \gamma}; \\ x_P &= \frac{-f(x_{C,g} \cos \vartheta - h \sin \vartheta)}{z_{C,g} \sin \gamma - x_{C,g} \sin \vartheta \cdot \cos \gamma - h \cos \vartheta \cdot \cos \gamma}, \\ y_P &= \frac{-f(z_{C,g} \sin \gamma - x_{C,g} \sin \vartheta \cdot \cos \gamma - h \cos \vartheta \cdot \cos \gamma)}{z_{C,g} \sin \gamma - x_{C,g} \sin \vartheta \cdot \cos \gamma - h \cos \vartheta \cdot \cos \gamma} = -f. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Значение яркости точки  $M_P(z_P, x_P, y_P)$  изображения, имеющей вычисленные по формулам (7) координаты  $[z_P, x_P, -f]$ , присваивается элементу скорректированного изображения, номер строки и номер элемента в строке массива которого совпадают с номером строки и номером в строке элемента  $M_C(z_{C,g}, x_{C,g}, y_{C,g})$  раstra, сформированного на обрабатываемой области плоскости объекта съемки  $L$ .

Далее, с использованием формул (7) определяются координаты элементов плоскости проекции, соответствующих всем элементам  $Q_z$  раstra каждой строки  $Q_x$  обрабатываемой области на плоскости  $L$ .

На рис. 2 представлен результат (б) коррекции проективных искажений области исходного (а) изображения (выделена рамкой).

а)



б)



Рис. 2

Компьютерная обработка реального искаженного изображения, выполненная по разработанному алгоритму, подтвердила эффективность рассмотренного метода решения задачи коррекции проективных искажений оптико-электронных аэроснимков [9], выполненных с высоты до 500 м.

Предложенный алгоритм может быть реализован как компьютерная программа коррекции проективных искажений изображений, выполненных телевизионной аппаратурой ЛА, так и аппаратурно для реализации корректирующей процедуры в реальном времени при передаче изображения по радиолинии связи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков Ф. И., Величкин А. И., Сухарев А. Д. Телевизионные системы летательных аппаратов: Учеб. пособие / Под ред. А. И. Величкина. М.: Сов. радио, 1979.
2. Пуятин Е. П., Аверин С. И. Обработка изображений в робототехнике. М.: Машиностроение, 1990.
3. Игнатъев Н. К. Дискретизация и ее приложения. М.: Связь, 1980.
4. Александров П. С. Лекции по аналитической геометрии. М.: Наука, 1968.
5. Ефимов Н. В. Высшая геометрия. М.: Наука, 1971.
6. Привалов И. И. Аналитическая геометрия. М.: Наука, 1966.
7. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М.: Наука, 1964.
8. Мышкис А. Д. Лекции по высшей математике. М.: Наука, 1973.
9. Макаренко А. А., Турнецкий Л. С. Моделирование метода коррекции геометрических искажений теплового изображения // Математическое моделирование в образовании, науке и производстве: Материалы IV Междунар. НПК, Тирасполь, 5—9 июня 2005 г. Тирасполь: ПГУ, 2005. С. 198.

Рекомендована кафедрой  
математики СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию  
09.11.07 г.

Е. В. ГОРБУНОВА, В. В. КОРОТАЕВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ

*Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики*

А. И. ЛЕВИТИН, А. Н. ЧЕРТОВ

*Научно-производственное предприятие „Буревестник“, ОАО  
Санкт-Петербург*

## **ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАТРИЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ В ФОТОМЕТРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО СЕПАРАТОРА АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ**

Рассматриваются особенности построения фотометрического канала рентгенолюминесцентного сепаратора алмазосодержащего сырья. Предлагается использовать в фотометрическом канале матричный фотоприемник с зарядовой связью. Исследуется влияние условий процесса сепарации материала на выбор параметров оптической системы.

В автоматизированных комплексах рентгенолюминесцентных сепараторов алмазосодержащего сырья предложено использовать в фотометрическом канале матричный приемник с зарядовой связью для повышения эффективности обогащения руды путем локализации зон регистрации свечения [1].

Принцип действия сепаратора заключается в следующем. Поток руды, движущийся по транспортеру или наклонному лотку, подвергается рентгеновскому излучению, под действием которого алмазы и некоторые сопутствующие им минералы начинают светиться. Импульсы люминесценции попадают в поле зрения оптической системы фотометрического канала сепаратора и регистрируются фотоприемным устройством на основе матрицы ФПЗС. В ходе анализа полученного изображения определяется вид и местоположение частиц минералов: алмазы, попадая в область отсечки, „выдуваются“ струями сжатого воздуха в концентратный отсек, а „пустая“ порода выводится из сепаратора.

При использовании матрицы ФПЗС в качестве приемника излучения возникает проблема выбора параметров оптической системы: диаметра входного зрачка и требуемой разрешающей способности, достаточных для точного определения местоположения частиц руды в потоке. Необходимо также оценить влияние условий процесса сепарации руды на величину диаметра входного зрачка оптической системы.

Представленные в настоящей статье формулы выведены на основании методики расчета параметров телевизионной системы, приведенной в работах [2—4]. При расчете учитываются скорость движения материала и размер частиц руды, а в качестве ключевых исходных данных используются характеристики люминесценции объекта (сила излучения, спектральный диапазон и время свечения).

Диаметр входного зрачка оптической системы, при котором обеспечивается регистрация матрицей ФПЗС рентгенолюминесценции алмаза, определяется следующим образом:

$$D = f' \sqrt{\frac{4AH_0(1+V)^2}{\pi\tau_0 \cdot 0,86t_3 I_{\max} \cdot 683\kappa^{\text{II}}}}, \quad (1)$$

где  $f'$  — фокусное расстояние оптической системы,  $A$  — площадь излучения объекта,  $H_0$  — требуемая экспозиция матрицы,  $V$  — линейное увеличение оптической системы,  $\tau_0$  — интегральный коэффициент пропускания оптической системы,  $t_3$  — время экспонирования матрицы,  $I_{\max}$  — сила излучения объекта,  $\kappa^{\text{II}}$  — коэффициент использования матрицей ПЗС излучения заданного источника.

Как показали предварительные расчеты, такая оптическая система физически нереализуема (полученный диаметр входного зрачка приемного объектива равен 55 м), поскольку матрица ФПЗС в качестве приемника излучения не может зафиксировать рентгенолюминесценцию алмаза без применения дополнительного устройства повышения чувствительности.

В качестве такого дополнительного устройства могут быть использованы электронно-оптический преобразователь (ЭОП) или микроканальные пластины, которые увеличивают освещенность матрицы ФПЗС.

Особенности предлагаемого варианта построения фотометрического канала рентгенолюминесцентного сепаратора заключаются в следующем:

- высокая чувствительность сочлененного фотопреобразователя;
- возможность регулировки (изменения) энергетической чувствительности системы в широких пределах, т.е. создание адаптивной системы, работающей в широком диапазоне яркостей;
- возможность, в случае необходимости, использования ЭОП в качестве электрооптического затвора.

Характеристики и параметры сочлененного прибора во многом зависят от вида оптической связи между ЭОП и матрицей ФПЗС. Обычно применяются следующие виды оптической связи: проекционный объектив, цилиндрическая стекловолоконная планшайба или фокон.

Технологически наиболее простым видом оптической связи является проекционный объектив. Однако такая связь, помимо существенного увеличения размеров сочлененного прибора, приводит к большим потерям света, излучаемого люминофором ЭОП. С помощью цилиндрической планшайбы сочленяются обе части прибора, имеющие одинаковые по размеру рабочие поверхности люминофора и внутреннего фоточувствительного слоя. Если эти размеры разные, причем большей обычно является рабочая поверхность люминофора, то используется фокон. В рассматриваемой системе для сочленения матрицы ФПЗС с ЭОП предлагается применять фокон.

Коэффициент преобразования подобного сочлененного фотопреобразователя, достаточный для обеспечения регистрации матрицей ФПЗС рентгенолюминесценции алмаза, рассчитывается по формуле

$$K = \frac{4H_0(1+V)^2 A\kappa^{\text{II}}}{\kappa^{\text{I}}\pi\tau_0 (D/f')^2 I_{\max} \cdot 683\kappa_{\Gamma}^{\text{II}} \cdot 0,86t_3}, \quad (2)$$

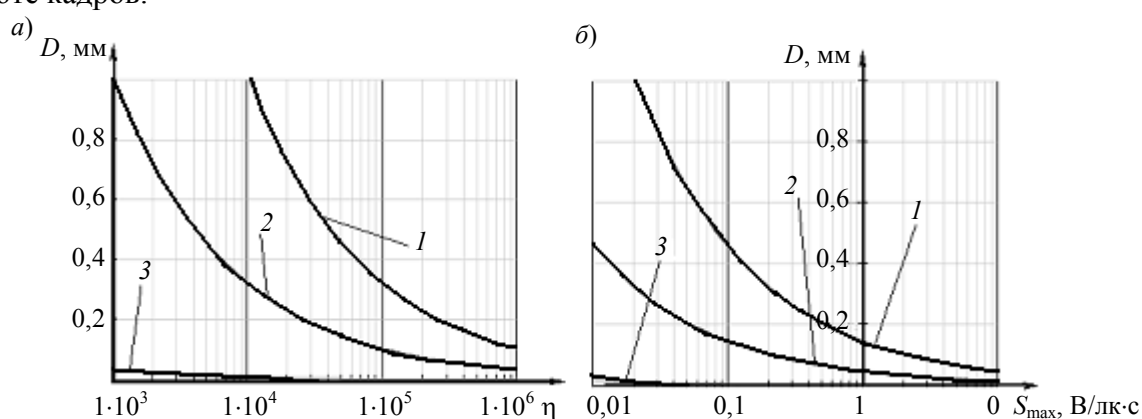
где  $D/f'$  — относительное отверстие оптической системы,  $\kappa^{\text{I}}$  — коэффициент использования матрицей ПЗС излучения эталонного источника,  $\kappa_{\Gamma}^{\text{II}}$  — КПД глаза при излучении заданного источника.

Для оценки работоспособности предлагаемого варианта построения фотометрического канала был выбран ЭОП типа „Квант-Э“ с затвором и микроканальной пластиной. Значение его коэффициента преобразования (усиления) для  $D/f' = 0,5$  близко к вычисленному по формуле (2).



В этом случае требования к сложности оптической системы снижаются, и для реализации схемы „оптическая система — ЭОП — матрица ФПЗС“ можно использовать серийный фотообъектив.

По результатам исследований математической модели системы составлены графики зависимости величины диаметра входного зрачка оптической системы от коэффициента преобразования ( $\eta$ ) ЭОП (см. рисунок, *а*) и от значения чувствительности ( $S_{\max}$ ) матрицы ФПЗС (см. рисунок, *б*) при различных значениях силы излучения рентгенолюминесценции алмаза (кривые 1—3): 1 —  $I_{\max} = 10^{-13}$  Вт/ср, 2 —  $I_{\max} = 10^{-12}$  Вт/ср, 3 —  $I_{\max} = 10^{-9}$  Вт/ср. Зависимость  $D(\eta)$  при определенных значениях  $I_{\max}$  имеет большую крутизну по сравнению с зависимостью  $D(S_{\max})$  при тех же значениях  $I_{\max}$ . Поэтому характеристики излучения объекта (яркость, спектральный диапазон, время свечения) необходимо учитывать, в первую очередь, при выборе ЭОП. Матрица ФПЗС должна выбираться с учетом параметров ЭОП, а также в зависимости от предъявляемых к фотометрическому блоку требований по быстродействию и частоте кадров.



Кроме того, следует учитывать, что схема фотометрического канала с использованием матрицы ФПЗС является синхронной, т.е. требует жесткой привязки скорости движения материала к частоте кадров. Таким образом, в системе должно быть предусмотрено устройство авторегулирования скорости (частоты) работы подающего устройства (что и реализовано в конструкции большинства серийно выпускаемых матриц зарубежного производства): это позволит применять матрицу в режиме электронного затвора.

Проведенные исследования показали, что при современном техническом уровне реализация фотометрического канала с матрицей ФПЗС возможна только при использовании сочлененного с ней ЭОП.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубырь Е. В., Казаков Л. В., Коротаев В. В. и др. Повышение технологической эффективности рентгенолюминесцентных сепараторов алмазосодержащего сырья // Сб. трудов VI Междунар. конф. „Прикладная оптика“, 18—21 окт. 2004., СПб. Т. 1. Оптическое приборостроение. СПб., 2004. С. 97—101.
2. Грязин Г. Н. Системы прикладного телевидения: Учеб. пособие. СПб.: Политехника, 2000.
3. Грязин Г. Н. Оптико-электронные системы для обзора пространства: Система телевидения. Л.: Машиностроение, 1988.
4. Грязин Г. Н. К расчету частотных характеристик приборов с зарядовой связью // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. Т. 44, № 3. С. 22—23.

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию  
04.07.07 г.

## РЕФЕРАТЫ

УДК 527.62:523.2+623.466.33

**СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ / В. И. КУЗНЕЦОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 3—9.**

Анализируется возможность создания объединенной системы автономного определения орбит космических аппаратов (КА) отечественных спутниковых радионавигационных систем (СРНС).

Методологической основой объединенной системы являются идеи взаимной навигации КА и последовательных наблюдений с КА низкоорбитальной системы ряда КА среднеорбитальной системы на фоне звездного поля. Такая объединенная система обеспечивает автономность аппаратов СРНС и создает единое по точности эфемерид навигационное поле. В результате сигналы КА низкоорбитальной системы могут быть использованы совместно с сигналами аппаратов системы „ГЛОНАСС“.

Приводятся результаты модельных экспериментов для ограниченного и полного составов космических навигационных систем.

Ил. 1, табл. 10, библиогр. 2.

УДК 681.51.001.57

**КОМБИНИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА СТРУКТУРЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ / Б. В. СОКОЛОВ, Е. М. ЗАЙЧИК, М. Ю. ОХТИЛЕВ, О. М. ТАРАСОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 10—15.**

Рассматривается оригинальный подход к решению задачи многокритериального выбора структуры сложной технической системы. С помощью разработанного прототипа программного обеспечения, реализующего предложенное модельно-алгоритмическое обеспечение, удалось решить ряд важных прикладных задач в различных предметных областях (космонавтика, электроэнергетика, бизнес). Приводятся результаты решения одной из таких задач.

Ил. 2, табл. 1, библиогр. 4.

УДК 004.728.8

**МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ МЕЖДУ ПРИКЛАДНЫМИ УРОВНЯМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ / С. С. БАГЛЮК // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 15—21.**

Рассматриваются основные протоколы передачи данных в современных информационных системах и предпосылки к разработке протокола передачи информации на основе прогнозирования трафика. Определяется методика выбора характера распределения для моделирования процесса передачи информации как объема в единицу времени. Приводятся математическое обоснование возможности прогнозирования объема нарушаемой целостности, модель процесса передачи данных и доказательства прогнозируемости объема трафика. Определяется направление использования прогнозируемых значений объема информации для управления процессом передачи информации в распределенной клиент-серверной системе.

Ил. 3, библиогр. 6.

УДК 004.056.53

**МОДЕЛЬ МНОГОШАГОВОГО ПРОЦЕССА ПОДАВЛЕНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ / О. Ю. ГАЦЕНКО, С. В. МАКСИМОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 22—26.**

Рассмотрен процесс подавления несанкционированных воздействий (НВ) на информационные системы. Предложен способ определения оптимальных моментов принятия решения по выбору способа применения средств защиты информации. Представленная модель многошагового процесса учитывает изменение временных потерь при подавлении несанкционированных воздействий и изменение количества информации о применяемом воздействии в процессе ее сбора.

Ил. 2, библиогр. 5.

УДК 681.3-002.51.6

**КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ / В. В. ИЗВОЗЧИКОВА, И. В. МАТВЕЙКИН, И. Ю. ГАТЧИН, Н. А. НЕСТЕРОВА, И. Б. ТРОННИКОВ, В. А. СЕМЕНОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 26—29.**

Рассматривается вопрос определения границ предметной области прогнозирования развития предприятия путем построения концептуальной схемы (информационной структуры) методом декомпозиции задач на подзадачи и выделения на каждом шаге декомпозиции имени объекта и имени атрибута посредством формальной модели. При этом имена объектов и имена атрибутов рассматриваются как идентификаторы задач и учитываемых факторов при выработке прогноза.

Предложенная методика построения концептуальной схемы предметной области описывает зависимости значений атрибутов одних объектов от значений атрибутов других, а построенная на ее основе модель дает возможность автоматизировать процесс формирования полной модели предметной области управления развитием предприятия.

Библиогр. 4.

УДК 629.7

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА / М. В. ЛЕВСКИЙ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 30—36.**

Рассмотрена и решена задача оптимального пространственного разворота космического аппарата (КА) из его начального углового положения в требуемое конечное в течение заданного времени с минимальным значением функционала, отражающего степень нагружения конструкции. Приводится аналитическое решение поставленной задачи. Показано, что оптимальное управление переориентацией КА может быть найдено в классе совершения КА регулярной прецессии. Момент начала торможения определяется исходя из принципов терминального управления по фактическим кинематическим параметрам движения аппарата, что существенно повышает точность приведения КА в заданное положение.

Приводятся данные математического моделирования, подтверждающие эффективность полученного способа управления пространственным разворотом КА.

Ил. 3, библиогр. 4.

УДК 62-50

**АКТИВНОЕ ОПТИМАЛЬНОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ / Б. А. КРАШЕНИННИКОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 36—41.**

Рассматривается задача автоматического управления динамикой колебаний кузова автомобиля. Представлены решения задачи оптимального управления силой воздействия на кузов с использованием различных критериев. Применение этих решений для модельных условий показало, что наилучшие результаты дают алгоритм с использованием критерия минимума энергетических затрат и алгоритм последовательной оптимизации по иерархии целевых функционалов.

Применение этих алгоритмов в активной системе демпфирования колебаний для выбранного профиля дороги и скользящего интервала оптимизации обеспечивает возможность формирования на борту в реальном времени оптимальных значений силового воздействия.

Библиогр. 7.

УДК 621.396:681.323

**АНАЛИЗ ОШИБОК ПРИ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ / С. И. ЗИАТДИНОВ, Н. В. ГИРИН // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 42—45.**

Получено выражение для определения коэффициента линейных искажений, возникающих при использовании тригонометрической интерполяции. Оценено влияние объема выборки, периода дискретизации и количества членов интерполирующего полинома на ошибки интерполяции. Приведены результаты расчетов коэффициента линейных искажений для различных корреляционных функций исходного случайного процесса.

Библиогр. 5.

УДК 358.421:623.98

**КОМБИНАТОРНОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ И КОДИРОВАНИЕ НОМЕРОВ КАНАЛОВ В АНАЛИЗАТОРАХ ИМПУЛЬСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ / Ю. П. МЕЛЬНИКОВ, С. В. ПОПОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 45—48.**

Рассматривается возможность сокращения количества приемно-усилительных трактов в многоканальных анализаторах путем объединения выходов избирательных каналов в относительно небольшое число групп, образуемых различными сочетаниями каналов, с последующим дешифрированием номера канала, по которому был принят сигнал. Приведены примеры комбинаторных соединений (кодообразующих схем).

Ил. 2, библиогр. 5.

УДК 535.317

**ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ТЕЛЕСКОПА С ДИАМЕТРОМ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА 10 м / В. А. ЗВЕРЕВ, Г. Э. РОМАНОВА // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 49—51.**

Рассмотрена оптическая схема телескопа с диаметром главного зеркала 10 м, построенная на основе афокальной двухзеркальной системы. В четырехзеркальной схеме удастся добиться хорошего качества изображения на линейном поле в пространстве изображений 150 мм. Для этой схемы вторая и третья поверхности представляют собой вогнутые гиперboloиды высшего порядка, а четвертая — сплюснутый эллипсоид высшего порядка.

Ил. 1, табл. 1, библиогр. 7.

УДК 621.39

**О ВЛИЯНИИ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТИВА И СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ДАТЧИКА / А. Н. БЫЧКОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 52—55.**

Приведен алгоритм расчета разрешающей способности телевизионного датчика. Проанализировано влияние частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) объектива при различных относительных отверстиях на разрешающую способность системы объектив — матрица приборов с зарядовой связью. На примере объектива с относительным отверстием 1:2 рассмотрено влияние спектрального состава источника излучения на разрешающую способность системы объектив — матрица ПЗС, а также приведены в виде графиков результаты расчетов ЧКХ такой системы.

Ил. 2, библиогр. 5.

УДК 621.382:530.93:365.2

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПРИЕМНИКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АФН-ПЛЕНОК / Н. Р. РАХИМОВ, А. Н. СЕРЬЕЗНОВ, С. Х. ШАМИРЗАЕВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 56—60.**

Приведены результаты исследований эффекта аномально высоких фотоэлектрических напряжений (АФН) в полупроводниковых пленочных системах. Изложена технология изготовления эффективного координатно-чувствительного приемника оптического излучения (ПОИ) из полупроводниковых соединений в виде ступенчатообразной АФН-пленки.

На основе этого устройства разработан двухмерный координатно-чувствительный автономный ПОИ, выходной сигнал которого содержит информацию о направлении и величине смещения потока излучения по осям  $X$  и  $Y$ .

Ил. 4, библиогр. 14.

УДК 535.2:548.0

**КОНОСКОПИЧЕСКИЕ КАРТИНЫ В ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ / О. Ю. ПИКУЛЬ, В. И. СТРОГАНОВ, Ю. М. КАРПЕЦ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 61—64.**

Проведен сравнительный анализ влияния естественной оптической активности на формирование интерференционных (коноскопических) картин, наблюдаемых на экране для сходящегося пучка лучей. Измерения выполнены на плоскопараллельных пластинах различной толщины, изготовленных из кристалла кварца. Коноскопические картины рассчитаны по формулам для интенсивности излучения, прошедшего через пластину, когда поляризатор и анализатор скрещены. По результатам расчетов, проведенных с использованием пакета компьютерной математики „Maple-6“, при увеличении толщины кристаллической пластины влияние оптической активности на формирование коноскопической картины возрастает.

Ил. 1, библиогр. 6.

УДК 621.397.6

**КОРРЕКЦИЯ ПРОЕКТИВНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ МАЛОВЫСОТНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АЭРОСЪЕМКЕ / А. А. МАКАРЕНКО, Л. С. ТУРНЕЦКИЙ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 64—70.**

Представлен алгоритм коррекции проективных искажений изображений при маловысотной оптико-электронной аэросъемке. Приведена математическая модель алгоритма. В результате проективного преобразования из исходного изображения формируется новое изображение, на котором наблюдаемый участок земной поверхности выглядит так, как он выглядел бы на ортофотоплане.

Ил. 2, библиогр. 9.

УДК 536.8: 621.384

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАТРИЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ В ФОТОМЕТРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО СЕПАРАТОРА АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ / Е. В. ГОРБУНОВА, В. В. КОРОТАЕВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ, А. И. ЛЕВИТИН, А. Н. ЧЕРТОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 71—73.**

Исследуется возможность применения матричных фотоприемников с зарядовой связью в фотометрическом канале рентгенолюминесцентного сепаратора алмазосодержащего сырья. Предложена методика выбора и расчета параметров оптической системы: диаметра входного зрачка и требуемой разрешающей способности, достаточных для точного определения местоположения частиц руды в потоке.

Показано, что реализация фотометрического блока с матрицей ФПЗС возможна только при использовании сочлененного с ней электронно-оптического преобразователя (ЭОП). При этом яркость, спектральный диапазон и время свечения объекта должны учитываться при выборе ЭОП, а матрица ФПЗС должна выбираться с учетом параметров ЭОП и параметров фотометрического блока по быстродействию и частоте кадров.

В качестве оценки работоспособности варианта построения фотометрического канала рассмотрено применение ЭОП типа „Квант-Э“ с затвором и микроканальной пластиной.

Ил. 1, библиогр. 4.