

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Арсеньев В. Н., Булекбаев Д. А.** Метод уточнения модельных значений параметров атмосферы для прогнозирования районов падения отделяемых частей ракет-носителей 5
- Готюр И. А., Костромитинов А. В.** Технология описания и декодирования метеорологических данных на основе алгебраического подхода..... 11
- Востриков А. А., Балонин Ю. Н.** Матрицы Адамара — Мерсенна как базис ортогональных преобразований при маскировании видеоизображений 15

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Фуртат И. Б.** Управление объектами в условиях неопределенности и ограничений на амплитуду входного сигнала 20
- Шакирьянов М. М.** Система защиты турбокомпрессора от помпажа 26

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Жаринов О. О., Жаринов И. О.** Синтез и оптимизация вычислительных алгоритмов обработки сигнала на основе корреляционно-экстремального метода в электрокардиографии высокого разрешения 29
- Немолочнов О. Ф., Осовецкий Л. Г.** Кризис промышленной технологии программирования, недеklarированные возможности и *don't care* 39

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Афонин В. С., Кривобоков Д. Е.** Применение нейросетевых технологий для определения величины расхода сыпучего вещества..... 47

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Демин А. В., Менделеева Л. М.** Алгоритм юстировки составных зеркал высокоапертурных телескопов 51
- Кирилловский В. К., Голубев А. М.** Модернизация рефрактометра Аббе и теоретическое обоснование повышения его точности..... 56
- Антонов А. С., Ишанин Г. Г.** Оптико-электронный газоанализатор для контроля диоксида азота 61

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Хуинь Конг Ту, Скворцов А. М., Петров А. А. Формирование морфологии системы SiO ₂ /Si под действием излучения эксимерного лазера	65
Черных С. В. Возможная чувствительность магнитных датчиков на основе гранулированных сверхпроводников	70
ИНФОРМАЦИЯ	76
SUMMARY (<i>перевод Ю. И. Копилевича</i>)	78

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Arsenyev V. N., Bulekbaev D. A.** Method for Refinement of Atmospheric Model Parameters in Area Forecast of Carrier Rocket Separating Parts Fall..... 5
- Gotur I. A., Kostromitinov A. V.** Meteorological Data Description and Decoding Technology Based on Algebraic Approach..... 11
- Vostrikov A. A., Balonin Yu. N.** Hadamard — Mersenne Matrices as a Basis of Orthogonal Transformation for Video Masking Encoding..... 15

DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Furtat I. B.** Control over Objects under Uncertainty and Restriction to Input Signal Amplitude..... 20
- Shakirianov M. M.** System of Turbocompressor Protection Against Surging..... 26

COMPUTING TECHNIQUE

- Zharinov O. O., Zharinov I. O.** Synthesis and Optimization of Computational Algorithms for Signal Processing Based of Extreme Correlation Method in High-Resolution Electrocardiography..... 29
- Nemolochnov O. F., Osovetsky L. G.** Crisis of Industrial Programming Technology, Undeclared Capabilities, and *Don't Care*..... 39

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Afonin V. S., Krivobokov D. E.** Application of Neural Network Technologies for Evaluation of Granular Substance Flow..... 47

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Demin A. V., Mendeleeva L. M.** Algorithm for Adjustment of Compound Mirrors of Large-Aperture Telescopes..... 51
- Kirillovsky V. K., Golubev A. M.** Modernization of Abbe Refractometer and Theoretical Justification of Increase in Its Accuracy..... 56
- Antonov A. S., Ishanin G. G.** Optical-Electronic Gaz Analyzer of Nitrogen Dioxide Control..... 61

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

Huynh Cong Tu, Skvortsov A. M., Petrov A. A. Formation of SiO ₂ /Si System Morphology under the Action of Excimer Laser Radiation	65
Chernykh S. V. On Potential Sensitivity of Magnetic Sensors Based on Granular Superconductors.....	70
INFORMATION	76
SUMMARY	78

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

В. Н. АРСЕНЬЕВ, Д. А. БУЛЕКБАЕВ

МЕТОД УТОЧНЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЙОНОВ ПАДЕНИЯ ОТДЕЛЯЕМЫХ ЧАСТЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Рассматривается задача уточнения модели атмосферы в заданном диапазоне высот по результатам зондирования. Вертикальные профили термодинамических параметров атмосферы и ветра представлены в виде канонических разложений с известными математическими ожиданиями, среднеквадратическими отклонениями и координатными функциями в узловых точках высоты. Предложен подход, позволяющий вычислить поправки к характеристикам параметров атмосферы на высотах, превосходящих верхнюю границу области зондирования.

Ключевые слова: ракета-носитель, отделяемая часть, район падения, эллипс рассеивания, параметры атмосферы, зондирование.

Важным требованием при обеспечении безопасности космической деятельности является безопасность вдоль трасс запусков космических аппаратов (КА) и в районах падения (РП) отделяемых частей ракет-носителей (ОЧРН) и их фрагментов. Новые политические реалии, развитие экономической инфраструктуры регионов, расширение разрабатываемых площадей, необходимость обеспечения безопасности жизнедеятельности человека обуславливают более жесткие требования к сложившейся десятилетиями системе использования зон отчуждения при запусках КА. В результате серьезные проблемы стали возникать не только при открытии новых трасс, но и при эксплуатации штатных районов падения.

При пусках ракет-носителей удовлетворение требований к безопасности и экологической чистоте может быть обеспечено путем использования при формировании полетных заданий РН моделей движения ОЧ, адекватных реальным условиям пусков [1]. Для этого необходимо учитывать все возмущающие факторы, которые в конечном счете и влияют на определение границ районов падения ОЧРН. Наиболее существенное влияние на рассеивание отделяемых частей и их фрагментов оказывают отклонения термодинамических параметров атмосферы от расчетных значений, а также ветровые возмущения в районах падения. Поэтому при проведении предстартовых баллистических расчетов используются оперативные данные зондирования атмосферы в районах падения ОЧРН. В настоящее время эти данные могут быть получены лишь для ограниченного диапазона высот. Однако их использование для уточнения характеристик атмосферных возмущений на высотах за пределами области зондирования позволит приблизить модели движения ОЧ к реальным условиям и уточнить границы областей рассеивания точек падения.

При модельном исследовании влияния случайных отклонений параметров атмосферы от стандартных значений на рассеивание точек падения ОЧРН целесообразно использовать их канонические или неканонические разложения [2—6].

Пусть вертикальный профиль возмущения \hat{u} некоторого параметра атмосферы до высоты H задан в виде

$$\hat{u}_i = m_{u_i} + \sigma_{u_i} \sum_{j=1}^q \eta_{ij} \hat{\alpha}_j, \quad (1)$$

где \hat{u}_i — случайное отклонение параметра \hat{u} на высоте H_i ; m_{u_i}, σ_{u_i} — математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение величины \hat{u}_i на высоте H_i ; η_{ij} — известные координатные функции; $\hat{\alpha}_j$ — независимые случайные величины, распределенные по нормальному закону $N(0,1)$; $j = \overline{1, q}$ (q — количество случайных величин); $i = \overline{1, p}$ (p — число узловых значений высоты); $\hat{}$ — знак, используемый для обозначения случайной величины.

Значения m_{u_i}, σ_{u_i} и координатные функции η_{ij} заданы таблично. Значения координатных функций давления и ветра приведены, например, в работе [5] и являются общими для всех районов падения ОЧ.

Параметры m_{u_i}, σ_{u_i} — переменные и зависят от географического расположения района падения. Они определяются на основе обработки многолетних данных аэрологического и ракетного зондирования атмосферы на близлежащих к РП метеостанциях. В случае отсутствия таких метеостанций эти параметры могут быть рассчитаны на основе глобальных сезонных моделей атмосферы по координатам РП. В момент пуска ракеты-носителя параметры локальной сезонной модели на соответствующих высотах могут уточняться по оперативным данным зондирования атмосферы в районах падения. В качестве параметра σ_{u_i} в таких случаях используются характеристики точности применяемых методов зондирования.

Совокупность уравнений (1), описывающих вертикальный профиль возмущения \hat{u} , целесообразно представить в векторно-матричной форме:

$$\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{m}_u + \sigma_u \eta \hat{\mathbf{\alpha}}, \quad (2)$$

где

$$\hat{\mathbf{u}} = [\hat{u}_1 \hat{u}_2 \dots \hat{u}_p]^T; \quad \mathbf{m}_u = [m_{u_1} m_{u_2} \dots m_{u_p}]^T; \quad \sigma_u = \text{diag} \{ \sigma_{u_1}, \sigma_{u_2}, \dots, \sigma_{u_p} \};$$

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} & \dots & \eta_{1q} \\ \eta_{21} & \eta_{22} & \dots & \eta_{2q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \eta_{p1} & \eta_{p2} & \dots & \eta_{pq} \end{bmatrix}.$$

Поскольку на практике зондирование атмосферы осуществляется лишь до некоторой определенной высоты $H_3 < H$, то весь диапазон высот можно разбить на два участка: первый участок — от нуля до H_3 , для которого имеются оперативные данные зондирования, и второй участок — от H_3 до H , для которого такие данные отсутствуют. Если векторы $\hat{\mathbf{u}}$, \mathbf{m}_u и матрицы η , σ_u представить в блочном виде:

$$\hat{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{u}}_1 \\ \hat{\mathbf{u}}_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{m}_u = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{u_1} \\ \mathbf{m}_{u_2} \end{bmatrix}; \quad \eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix}; \quad \sigma_u = \begin{bmatrix} \sigma_{u_1} & 0 \\ 0 & \sigma_{u_2} \end{bmatrix},$$

то выражение (2) можно записать в виде двух уравнений:

$$\hat{\mathbf{u}}_1 = \mathbf{m}_{u_1} + \sigma_{u_1} \eta_1 \hat{\mathbf{a}}, \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_2 = \mathbf{m}_{u_2} + \sigma_{u_2} \eta_2 \hat{\mathbf{a}}. \quad (4)$$

Уравнение (3) описывает диапазон высот, на которых зондируются параметры атмосферы, а уравнение (4) — остальные высоты.

Пусть результаты зондирования атмосферы представлены p_3 -мерным вектором математических ожиданий (или оценок математических ожиданий) $\mathbf{m}_{u_{13}} = [m_{u_{13}} \ m_{u_{123}} \ \dots \ m_{u_{1p_3}}]^T$ и соответствующей диагональной матрицей $\sigma_{u_{13}} = \text{diag} \{ \sigma_{u_{13}}, \sigma_{u_{123}}, \dots, \sigma_{u_{1p_3}} \}$ размерностью $p_3 \times p_3$, состоящей из величин среднеквадратических отклонений (или оценок среднеквадратических отклонений), причем $p_3 \geq q$. Тогда модель (3) вертикального профиля в области зондирования определяется выражением

$$\hat{\mathbf{u}}_1 = \mathbf{m}_{u_{13}} + \sigma_{u_{13}} \eta_1 \hat{\mathbf{a}}. \quad (5)$$

На основе данных зондирования может быть уточнена и модель (4) вертикального профиля возмущения атмосферы, описывающая его на высотах за пределами области зондирования.

Поскольку координатные функции, входящие в матрицу η_2 , отражают физическую зависимость между значениями параметра \hat{u} на различных высотах, то их изменять нежелательно. Повышения точности модели (4) можно добиться путем коррекции параметров \mathbf{m}_{u_2} и σ_{u_2} с использованием вероятностных характеристик (математических ожиданий M_{α_j} и дисперсий D_{α_j}) величин $\hat{\alpha}_j$, $j = \overline{1, q}$. Для этого к обеим частям уравнения (3) применяется операция математического ожидания

$$M[\hat{\mathbf{u}}_1] = \mathbf{m}_{u_1} + \sigma_{u_1} \eta_1 M_{\mathbf{a}}$$

и вводится функция, характеризующая рассогласование между модельным значением $M[\hat{\mathbf{u}}_1]$ и значением $\mathbf{m}_{u_{13}}$ математического ожидания, полученным в процессе зондирования атмосферы:

$$J_m = (\mathbf{m}_{u_1} + \sigma_{u_1} \eta_1 M_{\mathbf{a}} - \mathbf{m}_{u_{13}})^T (\mathbf{m}_{u_1} + \sigma_{u_1} \eta_1 M_{\mathbf{a}} - \mathbf{m}_{u_{13}}) + M_{\mathbf{a}}^T M_{\mathbf{a}}. \quad (6)$$

Математическое ожидание $M_{\mathbf{a}3} = \min_{M_{\mathbf{a}}} J_m$ вектора $\hat{\mathbf{a}}$ определяется из необходимого условия минимума функции J_m :

$$\left. \frac{\partial J_m}{\partial M_{\mathbf{a}}} \right|_{M_{\mathbf{a}}=M_{\mathbf{a}3}} = 2\eta_1^T \sigma_{u_1}^T \mathbf{m}_{u_1} + 2\eta_1^T \sigma_{u_1}^T \sigma_{u_1} \eta_1 M_{\mathbf{a}3} - 2\eta_1^T \sigma_{u_1}^T \mathbf{m}_{u_{13}} + 2M_{\mathbf{a}3} = 0$$

и имеет вид

$$M_{\mathbf{a}3} = (I + \eta_1^T \sigma_{u_1}^2 \eta_1)^{-1} \eta_1^T \sigma_{u_1} (\mathbf{m}_{u_{13}} - \mathbf{m}_{u_1}), \quad (7)$$

где I — единичная матрица.

Для определения характеристик рассеивания элементов вектора $\hat{\mathbf{a}}$ относительно их математических ожиданий уравнение (3) представляется совокупностью скалярных уравнений

$$\hat{u}_{1i} = \mathbf{m}_{u_{1i}} + \sigma_{u_{1i}} \sum_{j=1}^q \eta_{ij} \hat{\alpha}_j, \quad i = \overline{1, p_3}, \quad (8)$$

из которых следует зависимость между дисперсиями входящих в них случайных величин

$$D_{\hat{u}_i} = \sigma_{u_i}^2 \sum_{j=1}^q \eta_{ij}^2 D_{\alpha_j}. \quad (9)$$

Введение обозначений

$$\mathbf{D}_{u_1} = \left[D_{\hat{u}_{11}} \quad D_{\hat{u}_{12}} \quad \dots \quad D_{\hat{u}_{1p_3}} \right]^T, \quad \mathbf{D}_{\alpha} = \left[D_{\hat{\alpha}_1} \quad D_{\hat{\alpha}_2} \quad \dots \quad D_{\hat{\alpha}_q} \right]^T,$$

$$\eta_{1\text{KB}} = \begin{bmatrix} \eta_{11}^2 & \eta_{12}^2 & \dots & \eta_{1q}^2 \\ \eta_{21}^2 & \eta_{22}^2 & \dots & \eta_{2q}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \eta_{p_3 1}^2 & \eta_{p_3 2}^2 & \dots & \eta_{p_3 q}^2 \end{bmatrix}$$

позволяет перейти к векторно-матричной форме записи системы уравнений (9):

$$\mathbf{D}_{u_1} = \sigma_{u_1}^2 \eta_{1\text{KB}} \mathbf{D}_{\alpha}.$$

В качестве скалярной функции, характеризующей близость модельных значений дисперсий \mathbf{D}_{u_1} к данным, полученным на основе зондирования и представленным в виде вектора

$$\mathbf{D}_{u_{13}} = \left[\sigma_{u_{113}}^2 \quad \sigma_{u_{123}}^2 \quad \dots \quad \sigma_{u_{1p_3}}^2 \right]^T, \text{ выбирается функция}$$

$$J_D = \left(\sigma_{u_1}^2 \eta_{1\text{KB}} \mathbf{D}_{\alpha} - \mathbf{D}_{u_{13}} \right)^T \left(\sigma_{u_1}^2 \eta_{1\text{KB}} \mathbf{D}_{\alpha} - \mathbf{D}_{u_{13}} \right) + (\mathbf{D}_{\alpha} - \mathbf{1})^T (\mathbf{D}_{\alpha} - \mathbf{1}),$$

где $\mathbf{1}$ — вектор размерностью q , состоящий из единиц.

Вектор дисперсий \mathbf{D}_{α_3} случайных величин $\hat{\alpha}_j, j = \overline{1, q}$, обеспечивающий минимум функции J_D , определяется из условия $\left. \frac{\partial J_D}{\partial \mathbf{D}_{\alpha}} \right|_{\mathbf{D}_{\alpha} = \mathbf{D}_{\alpha_3}} = 0$ или $\eta_{1\text{KB}}^T \sigma_{u_1}^4 \eta_{1\text{KB}} \mathbf{D}_{\alpha_3} - \eta_{1\text{KB}}^T \sigma_{u_1}^2 \mathbf{D}_{u_{13}} + \mathbf{D}_{\alpha} - \mathbf{1} = 0$ и имеет вид

$$\mathbf{D}_{\alpha_3} = \left(I + \eta_{1\text{KB}}^T \sigma_{u_1}^4 \eta_{1\text{KB}} \right)^{-1} \left(\mathbf{1} + \eta_{1\text{KB}}^T \sigma_{u_1}^2 \mathbf{D}_{u_{13}} \right). \quad (10)$$

Новые значения характеристик вектора $\hat{\mathbf{a}}$, найденные с учетом результатов зондирования атмосферы по формулам (7) и (10), позволяют произвести коррекцию модели на высотах, превышающих высоту зондирования. Поскольку вектор случайных величин $\hat{\mathbf{a}}$ в правой части уравнения (4) распределен по нормальному закону с математическим ожиданием $M_{\hat{\mathbf{a}}_3}$ и диагональной ковариационной матрицей $\sigma_{\hat{\mathbf{a}}_3}^2$, элементы которой совпадают с соответствующими элементами вектора \mathbf{D}_{α_3} , то для вектора $\hat{\mathbf{a}}$ вводится обозначение $\hat{\mathbf{a}}_3$, а уточненная модель вертикального профиля возмущения \hat{u} на высотах от H_3 до H принимает следующий вид:

$$\hat{\mathbf{u}}_2 = \mathbf{m}_{u_2} + \sigma_{u_2} \eta_2 \hat{\mathbf{a}}_3. \quad (11)$$

Поскольку справедливо представление [7]

$$\hat{\mathbf{a}}_3 = M_{\hat{\mathbf{a}}_3} + \sigma_{\hat{\mathbf{a}}_3} \hat{\mathbf{a}},$$

где элементы вектора $\hat{\mathbf{a}}$ имеют нулевые математические ожидания и единичные дисперсии, т.е. $\hat{\mathbf{a}} \in N(0, I)$, то уравнение (11) может быть преобразовано к виду

$$\hat{\mathbf{u}}_2 = \mathbf{m}_{u_2} + \sigma_{u_2} \eta_2 \left(M_{\hat{\mathbf{a}}_3} + \sigma_{\hat{\mathbf{a}}_3} \hat{\mathbf{a}} \right)$$

или

$$\hat{u}_2 = (\mathbf{m}_{u_2} + \sigma_{u_2} \eta_2 M \hat{a}_3) + \sigma_{u_2} \eta_2 \sigma_{\hat{a}_3} \hat{a}.$$

Тогда уточненная модель вертикального профиля возмущения \hat{u} на всем рассматриваемом диапазоне высот от нуля до H описывается системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \hat{u}_1 &= \mathbf{m}_{u_1} + \sigma_{u_1} \eta_1 \hat{a}; \\ \hat{u}_2 &= (\mathbf{m}_{u_2} + \sigma_{u_2} \eta_2 M \hat{a}_3) + \sigma_{u_2} \eta_2 \sigma_{\hat{a}_3} \hat{a}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $\hat{a} \in N(0, I)$.

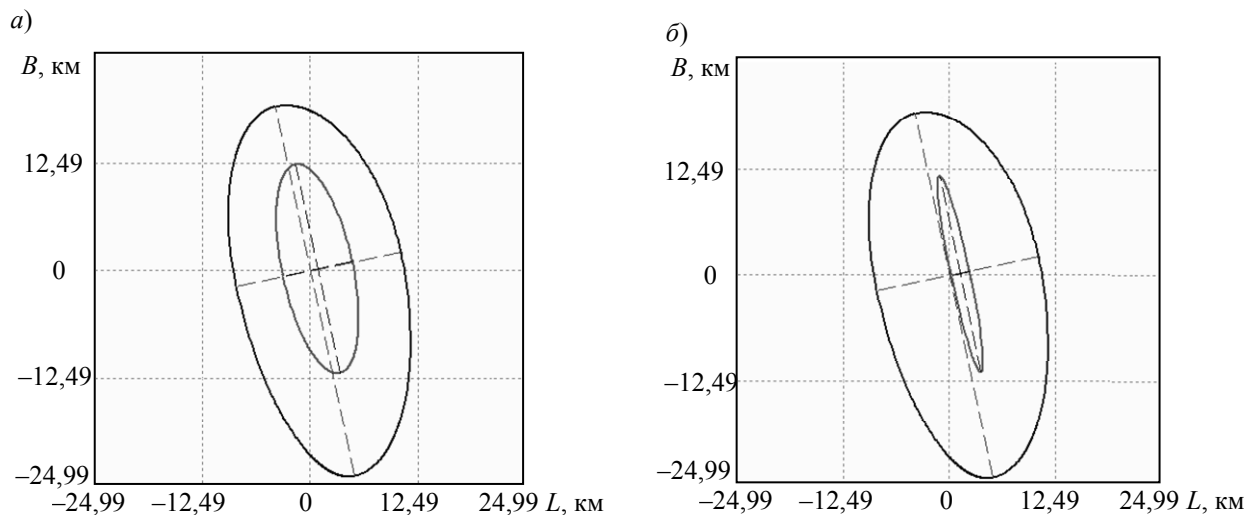
Первое уравнение системы (12) позволяет синтезировать возмущения на высотах в пределах области зондирования, а второе — на остальных высотах. И если статистические характеристики параметра \hat{u} для участка зондирования определяются точностью технических средств зондирования атмосферы, то для высот $H > H_3$ они принимают следующие значения:

$$\mathbf{m}_u = \mathbf{m}_{u_2} + \sigma_{u_2} \eta_2 M \hat{a}_3; \quad \mathbf{D}_u = \mathbf{D}_{u_2},$$

где \mathbf{D}_{u_2} — вектор, состоящий из диагональных элементов ковариационной матрицы

$$K = \sigma_{u_2} \eta_2 \sigma_{\hat{a}_3} \sigma_{\hat{a}_3}^T \eta_2^T \sigma_{u_2}.$$

На рисунке на примере параметра \hat{u} , представляющего зональную составляющую скорости ветра, приведены результаты численных расчетов эллипса рассеивания (по дальности B и в боковом направлении L) точек падения бокового блока для ракеты-носителя „Союз-2“ при отсутствии оперативных данных зондирования (а) и при их наличии (б). При этом внешним эллипсом обозначен штатный район падения, используемый по заданной трассе полета ракеты-носителя. Расчеты проведены при следующих исходных данных: координаты центра масс и проекций вектора скорости (в абсолютной геоцентрической системе координат) $x = 1947,847$ км, $y = 3983,718$ км, $z = 4629,410$ км, $V_x = -239,627$ м/с, $V_y = -460,120$ м/с, $V_z = 1670,540$ м/с; площадь мишени $S_{\text{мид}} = 5,641$ м², масса $m = 4871,55$ кг ($\Delta m = 9,3$ %); аэродинамический коэффициент $C_x = 2,99$ ($\Delta C_x = 20$ %).



Таким образом, применение оперативных данных зондирования позволяет уточнить вертикальные профили термодинамических параметров атмосферы, а также зональную и меридиональную составляющие скорости ветра при проведении баллистических расчетов. Это обеспечивает повышение достоверности информации об эллипсах рассеивания ОЧРН и позволяет в результате сократить площадь районов падения для приема отделяемых частей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверкиев Н. Ф., Булекбаев Д. А.* Метод поиска оптимальной программы движения ракет-носителей для минимизации площади рассеивания отделяемых частей // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 10—12.
2. *Школьный Е. П., Майборода Л. А.* Атмосфера и управление движением летательных аппаратов. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 308 с.
3. ОСТ 92-5165-92. Методика задания горизонтальной скорости ветра и термодинамических параметров атмосферы в районе полигона Байконур в диапазоне высот 0—120 км. Введ. с 01.01.94. М., 1992.
4. ОСТ 92-9704-95. Методика задания горизонтальной скорости ветра и термодинамических параметров атмосферы в диапазоне высот 0—120 км в районе космодрома Плесецк. Введ. с 01.01.95. М., 1995.
5. Разработка локальных моделей возмущенной атмосферы для баллистического обеспечения пусков ракет-носителей. М.: Изд-во ФГУП ЦЭНКИ, 2010. 67 с.
6. *Арсеньев В. Н., Казаков Р. Р., Фадеев А. С.* Обеспечение падения отработавших частей ракеты-носителя в заданные районы при пусках с новых стартовых площадок // Тр. МАИ. 2012. № 58. [Электронный ресурс]: <<http://www.mai.ru/science/trudy>>.
7. *Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д.* Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных: справ. изд. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.

Сведения об авторах**Владимир Николаевич Арсеньев**

— д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов, Санкт-Петербург;
E-mail: vladar56@mail.ru

Дастанбек Абдыкалыкович Булекбаев

— канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра высшей математики, Санкт-Петербург; E-mail: atiman@mail.ru

Рекомендована кафедрой
автоматики и электроники

Поступила в редакцию
30.09.13 г.

И. А. ГОТЮР, А. В. КОСТРОМИТИНОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОПИСАНИЯ И РАСКОДИРОВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ АЛГЕБРАИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Предложен алгоритм описания и обработки метеорологических данных, основанный на алгебраическом подходе. Разработанный алгоритм позволяет ускорить обработку метеорологических данных и сократить затраты вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: алгебраический подход, формальные языки, абстрактные типы данных, метеорология, буквенно-цифровые метеорологические коды, раскодирование.

Введение. Развитие гидрометеорологии в настоящее время невозможно без международного сотрудничества в глобальном масштабе. Международное сотрудничество, помимо всего прочего, заключается в осуществлении свободного и неограниченного обмена метеорологическими данными в реальном или близком к реальному масштабе времени. При этом необходимо, с одной стороны, по возможности сокращать объем передаваемых данных, а с другой — исключать неоднозначность их трактования при получении. Для решения этих задач используются буквенно-цифровые метеорологические коды (БЦМК) или традиционные коды. При разработке БЦМК прежде всего учитывалось, что для передачи метеорологических данных широко применяются телеграфные аппараты. Реализуемый в настоящее время обмен данными с помощью компьютерных сетей обусловил появление более совершенных алгоритмов сжатия данных. Это привело к созданию таблично-ориентированных кодов, которые должны со временем заменить традиционные коды. Тем не менее, в Глобальной сети телесвязи Всемирной метеорологической организации (ВМО) продолжают циркулировать сообщения, закодированные с помощью буквенно-цифровых кодовых форм.

Алгебраический подход к описанию и раскодированию метеорологических данных. Существующие алгоритмы раскодирования сообщений, представленных в виде БЦМК, являются более сложными по сравнению с алгоритмами обработки таблично-ориентированных кодов и требуют учитывать актуальную кодовую форму, а также факт наличия или отсутствия определенных групп данных и содержащихся в них значений метеорологических величин.

Традиционные коды составлены из набора кодовых форм и двоичных кодов, состоящих из букв (или групп букв), обозначающих метеорологические или, в определенных случаях, другие геофизические величины или явления. В сводках эти буквы (или группы букв) заменяются цифрами, обозначающими значение величины или состояние описываемых явлений. Для различных букв были выработаны спецификации, в соответствии с которыми эти буквы заменяются цифрами. В некоторых случаях спецификации букв позволяют непосредственно осуществлять их замену цифрами. В иных случаях необходимо использовать кодовые цифры, спецификации которых приводятся в кодовых таблицах. Кроме того, разработано определенное количество символических слов и символических цифровых групп для использования их в качестве названий кодов, кодовых слов, символических приставок или отличительных групп [1].

Правила, касающиеся выбора кодовых форм, используемых при международном обмене информацией, и выбора соответствующих символических слов, цифровых групп и букв, изложены в техническом регламенте (ВМО-№ 49) [1].

Анализ схем раскодирования БЦМК позволил составить общую схему раскодирования, которая заключается в выполнении следующих этапов:

- чтение закодированного метеорологического сообщения;
- определение кодовой формы;
- поиск в исходном сообщении информации о значениях гидрометеорологических величин или о служебных данных (индексе станции, времени наблюдения и пр.);
- преобразование по определенному для кодовой формы правилу (спецификации) информации о кодовом значении метеорологической величины в ее реальное значение.

Проведенное обобщение позволяет выделить две основные задачи раскодирования БЦМК:

- предварительный этап: синтаксический и лексический анализ;
- заключительный этап: непосредственно определение значений метеорологических величин.

Для автоматизации синтаксического и лексического анализа широко используется язык регулярных выражений, основу которого составляют теории автоматов и формальных языков [2, 3].

Регулярные выражения представляют собой формальный язык поиска и осуществления манипуляций с подстроками в тексте, основанный на использовании метасимволов. Метасимволом называется символ, обработка которого осуществляется по алгоритму, определяющему правило обработки символов, предшествующих данному или следующих после него, либо его замещающих. Иными словами, регулярное выражение — это строка-шаблон, состоящая из символов и метасимволов, задающая правила поиска.

Для непосредственного определения значений гидрометеорологических величин на заключительном этапе раскодирования необходимо задать правила (спецификации) преобразования информации о кодовом значении метеорологической величины в ее реальное значение. В общем виде правилами являются следующие таблицы соответствия:

- для кодирования данных об облачности, о явлениях и пр.: кодовое значение величины \rightarrow ее реальное значение;
- для кодирования данных об атмосферном давлении, температуре и пр.: метеорологическая величина \rightarrow арифметические действия по преобразованию кодового значения в реальное.

Исходя из этого значение v метеорологической величины целесообразно ассоциировать с правилами r синтаксического и лексического анализа и спецификациями s . Таковую ассоциативную конструкцию можно объединить в структуру $M = (r, s, v)$. В связи с тем, что в структуре M могут храниться данные о любой метеорологической величине, для однозначной ее идентификации предлагается использовать множество уникальных числовых дескрипторов $D = \{d_i\}, i = \overline{1(1), N}$, где N — количество раскодируемых метеорологических величин.

Для хранения произвольного количества пар $\langle d_i; M \rangle, d_i \in D, i = \overline{1(1), N}$, в современных методах обработки данных применяются абстрактные типы данных — словари. Словари обладают широкими возможностями доступа к произвольным элементам (словарным единицам) и характеризуются незначительными затратами вычислительных ресурсов на операции поиска и добавления нового элемента, которые наиболее часто выполняются при раскодировании метеорологических данных.

На множестве структур определяются нуль-арные операции получения регулярного выражения $g_1 : 0 \rightarrow r$, получения спецификации $g_2 : 0 \rightarrow s$ и определения значения метеорологической величины $g_3 : 0 \rightarrow v$. Тогда операцию раскодирования метеорологических данных можно определить как последовательно выполняемые операции поиска в исходном сообще-

нии закодированной информации о значении f_1 данных и определении их непосредственно-го значения f_2 . Сигнатура операции f_1 имеет следующий вид:

$$f_1 : b \times r \rightarrow k,$$

где b задается на множестве БЦМК, r — на множестве регулярных выражений, k — на множестве закодированных значений метеорологической величины.

Сигнатура операции f_2 имеет вид

$$f_2 : s \times k \rightarrow v,$$

где v задается на множестве значений метеорологической величины.

Алгоритм раскодирования метеорологических данных. На рис. 1 представлена схема алгоритма раскодирования метеорологических данных, закодированных с помощью буквенно-цифровых форм.

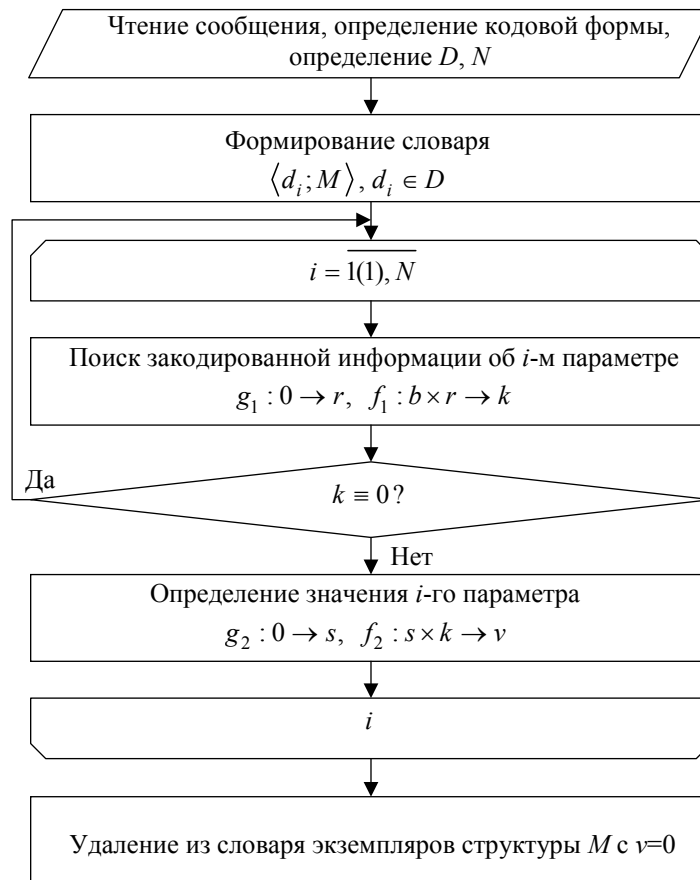


Рис. 1

Рассмотрим алгоритм более подробно.

Шаг 1. Производится чтение метеорологического сообщения b и по заголовку определяется кодовая форма, в которой оно закодировано. По кодовой форме определяется множество дескрипторов $D = \{d_i\}$, $i = \overline{1(1), N}$, метеорологических величин, данные о которых могут содержаться в сообщении.

Шаг 2. Для каждого элемента d_i множества D создается структура $M = (r, s, v)$ с заданными элементами r и s . Далее формируется словарь $\langle d_i; M \rangle$, $d_i \in D, i = \overline{1(1), N}$.

Шаг 3. Для i -го экземпляра структуры M выполняется операция получения регулярного выражения $g_1 : 0 \rightarrow r$. Полученное регулярное выражение используется для поиска и извлечения закодированной информации об i -й метеорологической величине: $f_1 : b \times r \rightarrow k$.

Шаг 4. Если $k \equiv 0$ (данные об i -й метеорологической величине отсутствуют), полагается $i = i + 1$, и переход к шагу 3.

Шаг 5. Для i -го экземпляра структуры M выполняется операция получения спецификации $g_2 : 0 \rightarrow s$. Полученная спецификация используется для раскодирования i -й метеорологической величины: $f_2 : s \times k \rightarrow v$, значение которой сохраняется в i -м экземпляре структуры M .

Шаги 3—5 выполняются в цикле для всех $i = \overline{1(1), N}$.

Шаг 3 ($N+1$). Из словаря удаляются элементы, для которых на шаге 3 не была найдена информация о метеорологической величине.

Отметим, что реализация операции f_1 (работа с регулярными выражениями) имеется практически во всех современных языках программирования. Для реализации операции f_2 — определения значения v метеорологической величины — предлагается алгоритм, схема которого представлена на рис. 2.

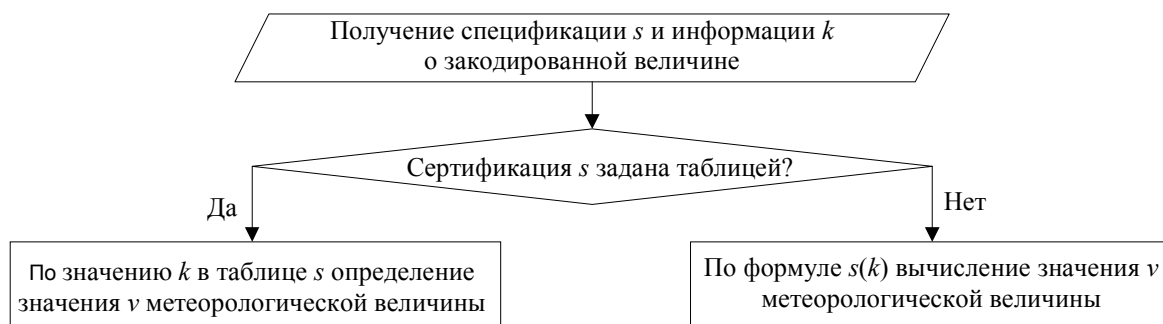


Рис. 2

Заключение. Представленная технология реализована в программном обеспечении автоматизированного рабочего места военного метеоролога, которое позволяет производить обработку метеорологических сообщений, циркулирующих в Глобальной сети телесвязи ВМО, а также их визуализацию. Результаты эксплуатации свидетельствуют о том, что использование таких современных способов представления данных и их обработки, как абстрактные типы данных и регулярные выражения позволяет значительно упростить алгоритмы обработки метеорологической информации, а также сократить затраты вычислительных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наставление по кодам: Международные коды. Т. I.1; Ч. А — Буквенно-цифровые коды [Электронный ресурс]: <http://fip.rshu.ru/2/doc/WMO306_Vol_I.1_2011_ru.pdf>.
2. Хопкрофт Дж., Мотвани Р., Ульман Дж. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2002.
3. Пентус А. Е., Пентус М. Р. Математическая теория формальных языков: Учеб. пособие. М.: Интернет-университет информ. технологий; Бинум, Лаборатория знаний, 2006.

Сведения об авторах

Иван Алексеевич Готюр

— канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра технологий и средств геофизического обеспечения войск, Санкт-Петербург; E-mail: gotur@newmail.ru

Алексей Валерьевич Костромитинов

— Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра технологий и средств геофизического обеспечения войск, Санкт-Петербург; инженер; E-mail: alexakos@yandex.ru

Рекомендована кафедрой технологий и средств геофизического обеспечения войск

Поступила в редакцию 21.10.13 г.

А. А. ВОСТРИКОВ, Ю. Н. БАЛОНИН

МАТРИЦЫ АДАМАРА — МЕРСЕННА КАК БАЗИС ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИ МАСКИРОВАНИИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассматривается процедура маскирования изображений с использованием M -матриц как ортогонального базиса. Предлагается на этапе спектрального разложения изображения использовать оригинальные двухуровневые ортогональные симметричные M -матрицы порядков, соответствующих последовательности Мерсенна, для которой не существует матриц Адамара.

Ключевые слова: ортогональные матрицы, M -матрицы, матрицы Адамара, матрицы Адамара — Мерсенна, числа Мерсенна, обработка видеоизображений.

Стремительное развитие технологий, связанных с передачей видеопотоков по сетям общего пользования, привело к необходимости создания надежной защиты видеoinформации от несанкционированного доступа и подмены. Разработано множество безупречных систем защиты, которые успешно и широко применяются на практике [1]. Однако большинство традиционных систем не могут напрямую использоваться для защиты цифровой видеoinформации в системах реального времени, поскольку базируются на алгоритмах шифрации и требуют значительных вычислительных затрат.

В работах [2—4] представлена альтернативная технология маскирования видеоизображений, при которой разрушение кадров видеопоследовательности до уровня шума обеспечивается на передающей стороне распределенной системы, а восстановление кадров — на приемной стороне. При использовании данной технологии актуальность маскируемой информации сохраняется в течение непродолжительного времени; эта технология предполагает также упрощение схемы преобразования на основе криптографических примитивов [4].

В монографии [5] вводится понятие стрип-оператора, позволяющего применить матричные методы кодирования видеoinформации на основе базисов ортогональных преобразований. В отличие от традиционных базисов, здесь основное значение имеют качества, определяемые экстремальными свойствами базисных наборов. Таковы, например, матрицы Адамара, оптимальные в смысле нейтрализации последствий воздействия точечных помех при передаче данных по каналам связи [6].

Кроме дискретности значений элементов матрицы Адамара, удобной при выполнении процедуры маскирования изображений с использованием цифровых устройств, не менее важную роль играет оригинальность базиса, обеспечивающая „скрытность“ получаемых преобразованных данных. Современное состояние процессоров цифровой обработки сигналов, характеризующееся увеличением производительности и структурной ориентацией на выполнение операции свертки в формате вещественных чисел, позволяет использовать более полные базисы, включая n -уровневые M -матрицы [7, 8].

В работах [9, 10] предложены версии малоуровневых (двух- и трехуровневых — по количеству фиксированных значений элементов матрицы) ортогональных матриц. Эти матрицы имеют нечетные порядки, соответствующие последовательностям Мерсенна и Ферма. Последовательность Мерсенна, задаваемая формулой $n = 2^k - 1$, начинается с чисел 1, 3, 5, 15, 31, ... и принадлежит подмножеству чисел вида $4k - 1$. Последовательность Ферма, определяемая формулой $n = 2^{2^k} + 1$, начинается с чисел 3, 5, 17, 257, 65537, 4294967297, ... и принадлежит

подмножеству чисел вида $4k+1$. В работах [11, 12] эти понятия обобщены и дополнены матрицами смежных порядков.

В настоящей статье предлагается новый подход, заключающийся в замене используемых хорошо известных базисов при сжатии кадров видеоизображений (например, на основе дискретного преобразования Фурье) на базисы, основанные на недавно открытом классе вычисляемых ортогональных матриц Адамара — Мерсенна.

Матрицы порядков, соответствующих последовательности Мерсенна, вычисляются с помощью модифицированной процедуры Сильвестра

$$S_{2n} = \begin{pmatrix} M_n & M_n \\ M_n & M_n^* \end{pmatrix},$$

отличающейся от классической тем, что двухуровневая матрица M_n^* образована перестановкой местами ее уровней $a=1$ и $-b$, где $b=1/2$ при $n=3$, а в остальных случаях $b = \frac{q - \sqrt{4q}}{q - 4}$, где $q=n+1$ — порядок матрицы Адамара. Для матриц Адамара при $b=1$ это приводит лишь к смене знаков всех элементов. Здесь и далее индекс „ n “ соответствует порядку матрицы.

Матрицы Адамара — Мерсенна образованы дополнением к указанной основе строки и столбца:

$$M_{2n+1} = \begin{pmatrix} -\lambda & e^T \\ e & S_{2n} \end{pmatrix},$$

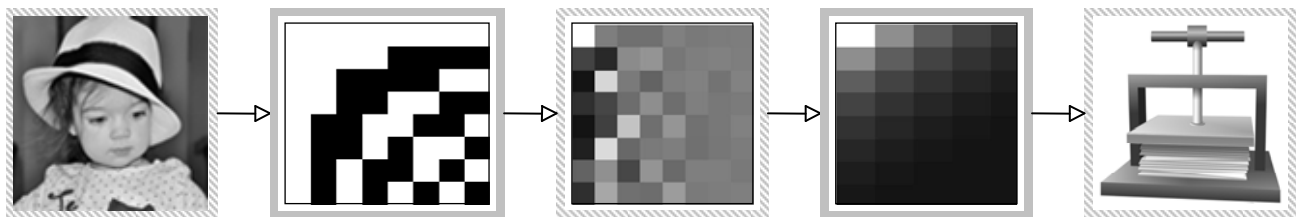
где $\lambda = -a$ — собственное число; e — собственный вектор матрицы S_{2n} , половину элементов которого составляют элементы $-b$, другую половину — элементы a ; таким образом, элементы собственного вектора находятся не численно, а аналитически.

Итерации начинаются с матрицы

$$M_3 = \begin{pmatrix} a & -b & a \\ -b & a & a \\ a & a & -b \end{pmatrix}.$$

Предложенная вычислительная схема компактна и позволяет находить матрицы, альтернативные матрицам Адамара, но на нечетных значениях порядков.

Типичная последовательность этапов обработки изображения на основе матричного преобразования приведена на рис. 1.



Изображение

Преобразование
ФурьеСпектральное
разложение

Фильтрация

Сжатие

Рис. 1

Использование дискретного преобразования Фурье обеспечивает получение спектра изображения с низкочастотной областью, сосредоточенной в левом верхнем углу преобразованной матрицы. Применение затем фильтра устраняет высокочастотную область спектра, а статистическая обработка по Хаффману устраняет избыточность.

В алгоритме маскирования все этапы, представленные на рис. 1, сохраняются, однако матрица дискретного преобразования Фурье заменяется оригинальной матрицей ортогональ-

ного базиса. Это позволяет, во-первых, сохранить принципиальную возможность сжатия маскируемой информации, например, адаптацией процедуры фильтрации к структурным особенностям базиса, что способствует неразличимости маскированного и немаскированного видеопотоков по каналу связи. Во-вторых, неизвестная матрица и ключ маскирования в виде вектора перестановки строк и столбцов, неизвестные третьей стороне, способствуют, как показало исследование программных реализаций маскиратора [13] и демаскиратора изображений [14], надежной защите видеоизображения от перехвата и подмены.

На рис. 2, *a*, *б* приведены портреты оригинальных ортогональных симметричных матриц Адамара — Мерсенна порядков 15 и 63 соответственно [9], найденные при помощи специального программного обеспечения — исследовательского программного комплекса MMatrix [15]. На рисунке белое поле соответствует элементу матрицы со значением уровня a ($a = 1$), черное поле — элементу со значением уровня $-b$ ($|b| < 1$). Эти матрицы отличаются, в общем, от матриц Адамара вещественным значением одного из уровней, зависящим от размерности, а также тем, что они существуют на нечетных порядках. Вместе эти отличия приводят к существенному усложнению задачи демаскирования видеопотока третьей стороной. Пример выполнения процедуры маскирования и демаскирования изображения представлен на рис. 3.

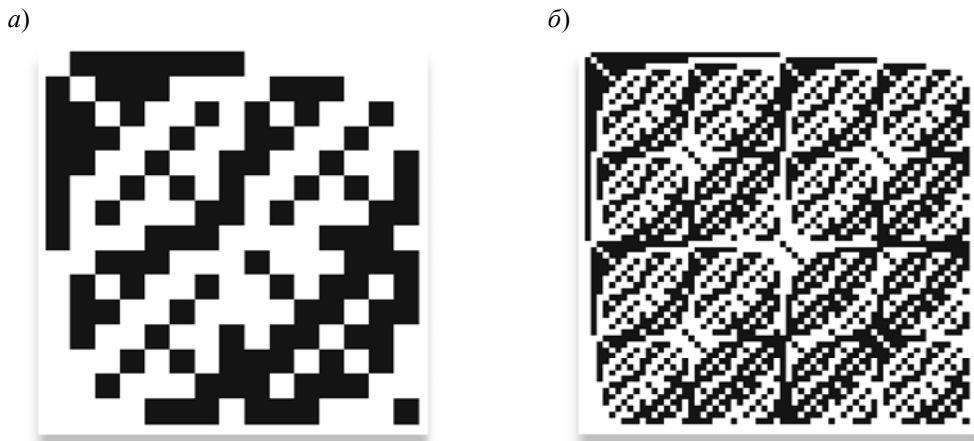


Рис. 2

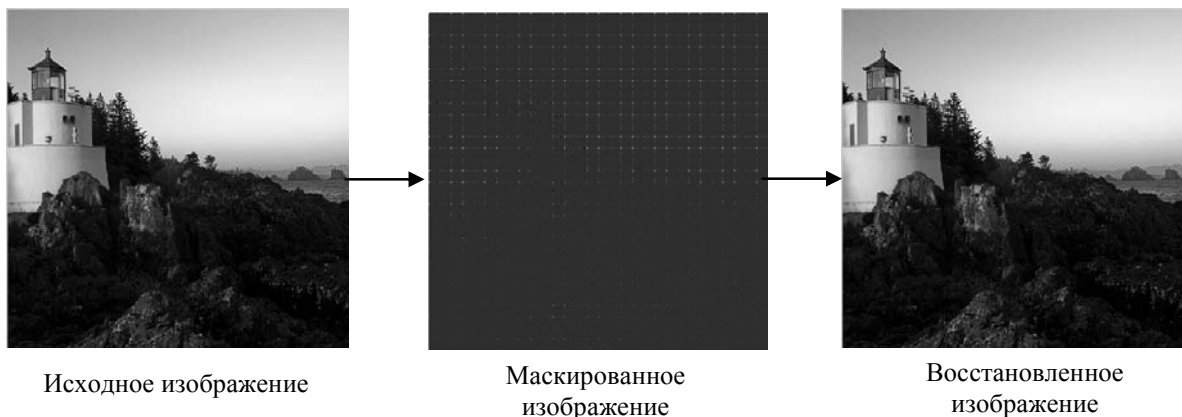


Рис. 3

Дополнительный аргумент рациональности использования базисов, построенных на последовательностях Мерсенна, Ферма, Эйлера [9—11], среди которых матрицы Адамара — Мерсенна отличает их близость к матрицам Адамара, состоит в том, что алгоритм их построения фрактален и матрицы, при определенной структуре алгоритма, обладают повышенной чувствительностью к изменению разрядной сетки процессора и начальным данным.

Усложнение задачи маскирования видеоизображений заключается в том, что матрица ортогонального преобразования не вычисляется заранее, а является результатом работы алгоритма, и по открытому каналу в качестве ключа передаются только настройки для ее вычисления. Не менее важны при этом и рекурсивные процедуры увеличения порядка матрицы.

Итак, в процессе поиска для алгоритмов маскирования изображений оригинальных базисов нечетных порядков, близких к матрицам Адамара по свойствам, выделен предпочтительный класс двухуровневых матриц, называемых матрицами Адамара — Мерсенна. Порядок этих матриц равен числам Мерсенна вида $2^k - 1$, а их элементы с ростом значений целочисленного аргумента k стремятся к значениям $\{1, -1\}$, как и у матриц Адамара.

Практическое применение таких матриц целесообразно в задачах повышения степени помехоустойчивости и защищенности при передаче видеоизображений. Использование для сжатия изображений алгоритма, устраняющего избыточность исходной информации (см. рис. 1), в этом случае одновременно приводит к формированию защищенного массива. При этом следует отметить, что матричные методы преобразования информации очень практичны, поскольку предполагают эффективную реализацию в современных микропроцессорных структурах, ориентированных на цифровую обработку сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ерош И. Л., Сергеев А. М., Филатов Г. П.* О защите цифровых изображений при передаче по каналам связи // Информационно-управляющие системы. 2007. № 5(30). С. 20—22.
2. *Литвинов М. Ю., Беззатеев С. В., Трояновский Б. К., Филатов Г. П.* Выбор алгоритма преобразования, обеспечивающего изменение структуры изображения // Информационно-управляющие системы. 2006. № 6(25). С. 2—6.
3. *Litvinov M. Y., Sergeev A. M.* Problems on formation protected digital images // Proc. of the XI Intern. Symp. on Problems of Redundancy in Information and Control Systems. St. Petersburg, 2007. P. 202.
4. *Литвинов М. Ю.* Алгоритмы маскирующих преобразований видеоинформации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2009.
5. *Мироновский Л. А., Слаев В. А.* Стрип-метод преобразования изображений и сигналов. СПб: Политехника, 2006. 163 с.
6. *Van Lint J. H., Seidel J. J.* Equilateral point sets in elliptic geometry // Indagationes Mathematicae. 1966. Vol. 28. P. 335—348.
7. *Балонин Н. А., Сергеев М. Б.* М-матрицы // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 14—21.
8. *Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б.* М-матрица 22-го порядка // Информационно-управляющие системы. 2011. № 5. С. 87—90.
9. *Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Мироновский Л. А.* Вычисление матриц Адамара — Мерсенна // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5. С. 92—94.
10. *Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Мироновский Л. А.* Вычисление матриц Адамара — Ферма // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6. С. 90—93.
11. *Балонин Н. А., Сергеев М. Б.* О двух способах построения матриц Адамара — Эйлера // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1. С. 7—10.
12. *Балонин Н. А.* О существовании матриц Мерсенна 11-го и 19-го порядков // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 90—91.
13. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 20126188124. Программа „Маскиратор изображений“/Software “Images masking” / *М. Б. Сергеев, Н. А. Балонин, Ю. Н. Балонин, А. А. Востриков.* 27.09.2012 г.
14. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012618700. Программа „Демаскиратор изображений“/Software “Images recovering” / *М. Б. Сергеев, Н. А. Балонин, Ю. Н. Балонин, А. А. Востриков.* 24.09.2012 г.

15. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012614356. Программа поиска М-матриц / М. Б. Сергеев, Н. А. Балонин, Ю. Н. Балонин. 16.05.2012 г.

Сведения об авторах

- Антон Александрович Востриков** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, НИИ информационно-управляющих систем; заместитель директора; E-mail: vostricov@mail.ru
- Юрий Николаевич Балонин** — Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра вычислительных систем и сетей; программист; E-mail: yuraball@mail.ru

Рекомендована
НИИ информационно-управляющих систем

Поступила в редакцию
01.07.13 г.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.7

И. Б. ФУРТАТ

УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЙ НА АМПЛИТУДУ ВХОДНОГО СИГНАЛА

Синтезирован алгоритм управления объектами в условиях параметрической неопределенности, возмущений и ограничений на амплитуду входного сигнала. Предложен способ формирования сигнала, позволяющий обеспечить ограниченность функции управления в заданной полосе. Определены ограничительные условия для параметров объекта управления, эталонной модели и регулятора, при выполнении которых система управления будет работоспособной. Приведены результаты моделирования для линейного объекта.

Ключевые слова: управление в условиях неопределенности, ограничение на амплитуду сигнала управления, компенсация возмущений.

Введение. Одной из ключевых проблем в теории управления является регулирование объектов в условиях неопределенности, о чем свидетельствует множество публикаций. Однако в большинстве работ при синтезе системы управления не учитываются ограничения на входной сигнал, что в реальных условиях может привести к неработоспособности системы в целом. Более того, практически отсутствуют публикации, посвященные аналитическому построению системы управления в условиях неопределенности.

Так, в работе [1] впервые приведены ограничения на динамику ошибки слежения и эталонной модели, не имеющие, однако, строгого доказательства. Аналогичные результаты описаны в работе [2], где представлена методика задания параметров регулятора на этапе моделирования системы с учетом множества возможных значений параметров объекта. В работе [3] для решения задачи предлагается функцию насыщения амплитуды сигнала управления заменить на гиперболический тангенс от входного сигнала. Возможно также адаптивное управление объектами в условиях неопределенности, при котором для частичной компенсации ограничений на сигнал управления параллельно контуру ошибки слежения подключается контур с настраиваемым параметром [4].

В настоящей статье представлено решение задачи управления объектами в условиях неопределенности и ограничений на амплитуду входного сигнала. Предложен новый способ формирования функции управления, позволяющий обеспечить ее нахождение в заданной полосе. Определены условия для параметров объекта управления, эталонной модели и регулятора, при выполнении которых система управления будет работоспособной. Для компенсации неопределенности использовался изложенный в работе [5] подход, обобщенный для управления структурно неопределенными объектами и мультиагентными системами [6, 7].

Отметим, что для простоты изложения рассматривается линейный объект управления, в котором доступен измерению вектор состояния и его первая производная.*

Постановка задачи. Рассмотрим объект управления, динамические процессы в котором описываются уравнением

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bg(u) + Df(t), \quad x(0) = x_0, \quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ — вектор состояния объекта; $u(t) \in R$ — управляющее воздействие; $f(t) \in R$ — неконтролируемое внешнее возмущение, причем $|f(t)| \leq \bar{f}$, \bar{f} — известное положительное число; элементы матрицы $A \in R^{n \times n}$ и коэффициенты векторов $B \in R^n$, $D \in R^n$ — неизвестные числа; x_0 — неизвестные начальные условия; $g(u) \in R$ — функция насыщения амплитуды сигнала управления $u(t)$, определяемая выражением

$$g(u) = \bar{u} \operatorname{sat} \left(\frac{u(t)}{\bar{u}} \right) = \begin{cases} u(t), & |u(t)| \leq \bar{u}; \\ \bar{u} \operatorname{sgn}(u(t)), & |u(t)| > \bar{u}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\bar{u} > 0$ — степень насыщения.

Зададим эталонную модель:

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r(t), \quad x_m(0) = 0, \quad (3)$$

здесь $x_m(t) \in R^n$ — вектор состояния; $r(t) \in R$ — задающее воздействие, причем $|r(t)| \leq \bar{r}$; мат-

рица $A_m = \begin{bmatrix} 0 & I_{n-1} \\ -a_0 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix}$ — гурвицева, где I_{n-1} — единичная матрица порядка $n-1$;

$B_m = [0, \dots, 0, b_m]^T$, $b_m > 0$.

Предположение 1. Неизвестные элементы матрицы A и векторов B и D зависят от вектора неизвестных параметров $\vartheta \in \Xi$, где Ξ — известное ограниченное множество. Пара (A, B) управляема.

Предположение 2. Выполнены условия: $A = A_m + B_m c_{01}^T$, $B = B_m + B_m c_{02}$, $D = B_m c_{03}$, где $c_{01} \in R^n$ — неизвестный вектор, $c_{02} \in R$ и $c_{02} > -1$, $c_{03} \in R$ — неизвестные числа.

Цель управления — синтез непрерывного закона регулирования, обеспечивающего выполнение условия

$$|x(t) - x_m(t)| < \delta \quad \text{при } t > T, \quad (4)$$

где $\delta > 0$ — заданное число; $T > 0$ — время, по истечении которого должно быть выполнено неравенство (4).

Структура закона управления. В условиях ограничений на входной сигнал сформируем закон управления

$$u(t) = \frac{1}{1 + \sigma} \left[u_c(t) + \sigma \tilde{u} \operatorname{sat} \left(\frac{u_c(t)}{\tilde{u}} \right) \right], \quad (5)$$

где $\sigma > 0$, $0 < \tilde{u} < \bar{u}$, $u_c(t)$ — дополнительный сигнал управления, необходимый для компенсации неопределенности модели объекта (1).

Синтез алгоритма управления. Принимая во внимание предположение 2, составим уравнение для ошибки $\varepsilon(t) = x(t) - x_m(t)$:

$$\dot{\varepsilon}(t) = A_m \varepsilon(t) + B_m u(t) + B_m \varphi(t), \quad (6)$$

где $\varphi(t) = g(u) - u(t) + c_{01}^T x(t) + c_{02} g(u) + c_{03} f(t) - r(t)$.

В соответствии с работой [5] для выделения возмущений, действующих на объект управления, введем вспомогательный контур

* Вариант реализации системы управления, в которой измерению доступен только выходной сигнал объекта управления, приведен в работах [5—7].

$$\dot{\varepsilon}_a(t) = A_m \varepsilon_a(t) + B_m u(t), \quad (7)$$

где $\varepsilon_a(t) \in R^n$.

С учетом выражений (6) и (7) составим уравнение для рассогласования $\zeta(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_a(t)$ в виде

$$\dot{\zeta}(t) = A_m \zeta(t) + B_m \varphi(t) \quad (8)$$

и выделим в системе (8) последнюю строку

$$\dot{\zeta}_n(t) = a_m \zeta(t) + b_m \varphi(t), \quad (9)$$

где $\zeta_n(t)$ — последняя компонента вектора $\zeta(t)$, $a_m = [-a_0, \dots, -a_{n-1}]$.

Тогда исходя из уравнения (9) сигнал управления $u_c(t)$ можно определить как

$$u_c(t) = -\varphi(t) = -b_m^{-1} (\dot{\zeta}_n(t) - a_m \zeta(t)). \quad (10)$$

Выразив $u(t)$ в выражении (5) в виде $u(t) = u_c(t) + \sigma [\tilde{u} \text{sat}(\tilde{u}^{-1} u_c(t)) - u(t)]$, с учетом формулы (10) перепишем уравнение (6) следующим образом:

$$\dot{\varepsilon}(t) = A_m \varepsilon(t) + \sigma B_m [\tilde{u} \text{sat}(\tilde{u}^{-1} u_c(t)) - u(t)]. \quad (11)$$

Введем, предваряя формулировку утверждения, следующие обозначения:

$$\bar{c}_{01} = \max(|c_{01}|), \quad \bar{c}_{02} = \max(|c_{02}|), \quad \bar{c}_{03} = \max(|c_{03}|), \quad \underline{c}_{02} = \min(|c_{02}|), \quad \bar{x}_m = \sup(|x_m(t)|),$$

$$R = Q - 2|PB_m| \bar{c}_{01} I - 2\mu^{-1} PB_m B_m^T P,$$

где матрица $P = P^T > 0$ является решением уравнения Ляпунова $A_m^T P + P A_m = -Q$, $Q = Q^T > 0$; I — единичная матрица соответствующего порядка; $\mu > 0$ — произвольное число.

Утверждение. Пусть выполнены условия предположений 1, 2. Тогда при

$$\bar{c}_{03} \bar{f} + \bar{c}_{01} \bar{x}_m + \bar{r} < (1 + \underline{c}_{02}) \bar{u}; \quad (12)$$

$$|x(0)| < \bar{c}_{01}^{-1} [(1 + \underline{c}_{02}) \bar{u} - \bar{c}_{03} \bar{f} - \bar{c}_{01} \bar{x}_m - \bar{r}], \quad (13)$$

$$\sigma > \frac{\tilde{u} + \sigma^{-1} (1 + \sigma) \left[(\sigma^{-1} (1 + \sigma) + 2 + \bar{c}_{02} + \underline{c}_{02}) \bar{u} + \bar{c}_{01} \bar{x}_m + 2\bar{c}_{03} \bar{f} + 2\bar{r} \right]}{\bar{u} - \tilde{u}} \quad (14)$$

система управления (5), (7), (10) обеспечивает выполнение целевого условия (4) и ограниченность входных сигналов в системе.

Доказательство утверждения приведено в Приложении.

Замечание 1. Из уравнения (5) очевидно, что при $|u(t)| \leq \tilde{u}$ величина $u(t) = u_c(t)$, при

$|u(t)| > \tilde{u}$ $u(t) = \frac{1}{1 + \sigma} [u_c(t) + \sigma \tilde{u} \text{sgn}(u_c(t))]$; из последнего равенства следует, что при $\sigma < \infty$ величина $|u(t)|$ может принимать значения, принимающие \tilde{u} . Однако при $\sigma \rightarrow \infty$ величина $u(t) \rightarrow \tilde{u} \text{sat}\left(\frac{u_c(t)}{\tilde{u}}\right)$. Следовательно, при достаточно больших значениях σ величина \tilde{u} может

быть достаточно близка к \bar{u} , так при $\tilde{u} = \bar{u}$ и $\sigma \rightarrow \infty$ $u(t) \rightarrow \bar{u} \text{sat}\left(\frac{u_c(t)}{\bar{u}}\right)$.

Замечание 2. Из уравнения (5) следует, что коэффициент σ можно выбирать исходя из условия $\sigma \in (-\infty; -1) \cup (0; +\infty)$.

Для иллюстрации полученных результатов приведем следующий пример.

Пример. Рассмотрим модель объекта управления

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_0 & a_1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} g(u) + \begin{bmatrix} 0 \\ d \end{bmatrix} f(t), \quad x(0) = x_0.$$

Множество возможных значений Ξ задано неравенствами $|a_0| \leq 2$, $|a_1| \leq 2$, $1 \leq b \leq 3$, $1 \leq d \leq 3$ и $\bar{f} = 5$. Ограничения на сигнал управления $\bar{u} = 1$.

Пусть эталонная модель задана уравнением

$$\dot{x}_m(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} x_m(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} 0,29 \sin 1,2t, \quad x_m(0) = 0.$$

Цель управления заключается в обеспечении целевого условия (4).

Сформируем систему управления, подчиняющуюся закону управления (5) и состоящую из вспомогательного контура

$$\dot{\varepsilon}_a(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \varepsilon_a(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t)$$

при наличии сигнала для компенсации возмущений

$$u_c(t) = -(\dot{\zeta}_n(t) - [-1 \quad -2]\zeta(t)).$$

Пусть параметры объекта управления следующие: $a_0 = 2$, $a_1 = 2$, $b = 1$, $d = 3$, $f(t) = 0,01 + 0,1 \sin t$, $x(0) = [0,12 \quad 0,12 \quad 0,12]^T$. Очевидно, что условия (12) и (13) выполнены. Пусть $\tilde{u} = 0,9$, а из условия (14) выберем $\sigma = 100$.

Результаты моделирования переходного процесса по ошибке $\varepsilon(t)$ и по сигналу управления $u(t)$ представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

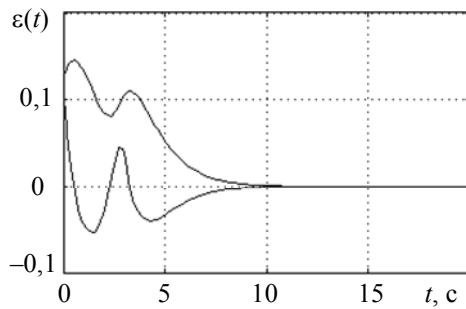


Рис. 1

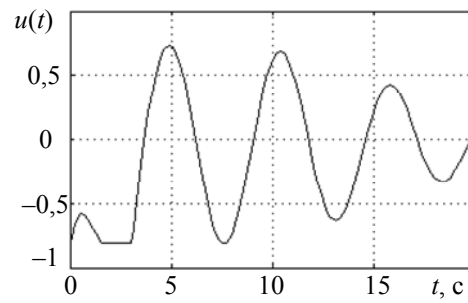


Рис. 2

Заключение. Синтезирована система управления в условиях неопределенности параметров объекта, внешней среды и ограничений на амплитуду сигнала управления. Определены условия, при выполнении которых система управления будет работоспособной при ограничениях на входной сигнал. Результаты компьютерного моделирования подтверждают аналитические расчеты, а именно: предложенная структура системы управления обеспечивает нахождение входного сигнала в заданной полосе, когда объект управления функционирует в условиях неопределенности.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Доказательство утверждения. Выберем функцию Ляпунова $V(t) = V(\varepsilon(t))$ в виде

$$V(t) = \varepsilon^T(t) P \varepsilon(t). \quad (15)$$

Для исследования системы (11) рассмотрим три варианта.

Вариант 1: $|\varphi(t)| \leq \tilde{u}$, что согласно уравнению (10) равносильно $|u_c(t)| \leq \tilde{u}$. Тогда исходя из (5) $u(t) = u_c(t)$, а значит, уравнение (11) примет вид $\dot{\varepsilon}(t) = A_m \varepsilon(t)$. Так как матрица A_m гурвицева, то цель управления (4) будет достигнута.

Вариант 2: $\tilde{u} < |\varphi(t)| \leq \bar{u}$. Тогда исходя из (10) $\tilde{u} < |u_c(t)| \leq \bar{u}$, а исходя из (5) $u(t) = (1 + \sigma)^{-1} [u_c(t) + \sigma \tilde{u} \operatorname{sgn}(u_c(t))]$. С учетом последнего перепишем уравнение (11) как

$$\dot{\varepsilon}(t) = A_m \varepsilon(t) + \sigma (1 + \sigma)^{-1} B_m [\tilde{u} \operatorname{sgn}(u_c(t)) - u_c(t)]. \quad (16)$$

При $\tilde{u} < |\varphi(t)| \leq \bar{u}$ разность $\bar{u} - \tilde{u}$ характеризует максимальную амплитуду возмущения, а значит, перепишем уравнение (16) следующим образом:

$$\dot{\varepsilon}(t) = A_m \varepsilon(t) + \sigma(1 + \sigma)^{-1} B_m (\tilde{u} - \bar{u}) \operatorname{sgn}(u_c(t)). \quad (17)$$

Производная от функции (15) по времени вдоль траекторий системы (17) определяется как

$$\dot{V}(t) = -\varepsilon^T(t) Q \varepsilon(t) + 2\sigma(1 + \sigma)^{-1} \varepsilon^T(t) P B_m (\tilde{u} - \bar{u}) \operatorname{sgn}(u_c(t)). \quad (18)$$

Воспользуемся оценкой

$$2\sigma(1 + \sigma)^{-1} \varepsilon^T(t) P B_m (\tilde{u} - \bar{u}) \operatorname{sgn}(u_c(t)) \leq 2\sigma(1 + \sigma)^{-1} \left[\varepsilon^T(t) P B_m B_m^T P \varepsilon(t) + (\tilde{u} - \bar{u})^2 \right].$$

Тогда выражение (18) можно оценить как

$$\dot{V}(t) \leq -\varepsilon^T(t) \left[Q - 2\sigma(1 + \sigma)^{-1} P B_m B_m^T P \right] \varepsilon(t) + 2\sigma(1 + \sigma)^{-1} (\tilde{u} - \bar{u})^2.$$

Очевидно, что всегда существует $\sigma > 0$, такое что $Q - 2\sigma(1 + \sigma)^{-1} P B_m B_m^T P > 0$. Таким образом, при $\tilde{u} < |\varphi(t)| \leq \bar{u}$ цель управления (4) также будет достигнута.

Вариант 3: $|\varphi(t)| > \bar{u}$. Принимая во внимание структуру функции $\varphi(t)$, перепишем уравнение (6):

$$\dot{\varepsilon}(t) = A_m \varepsilon(t) + B_m c_{01}^T \varepsilon(t) + (1 + c_{02}) B_m g(u) + B_m \left(c_{03} f(t) - r(t) - c_{01}^T x_m(t) \right). \quad (19)$$

Найдем производную от функции (15) вдоль траекторий системы (19):

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & -\varepsilon^T(t) Q \varepsilon(t) + 2\varepsilon^T(t) P B_m c_{01}^T \varepsilon(t) + 2\varepsilon^T(t) P B_m (1 + c_{02}) g(u) + \\ & + 2\varepsilon^T(t) P B_m \left(c_{03} f(t) - r(t) - c_{01}^T x_m(t) \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Рассмотрим вначале случай, когда $\operatorname{sgn}(g(u)) = -\operatorname{sgn}(\varepsilon^T(t) P B_m)$. С учетом этого оценим выражение (20):

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & -\lambda_{\min}(Q) |\varepsilon(t)|^2 + 2\bar{c}_{01} \left| \varepsilon^T(t) P B_m \right| \cdot |\varepsilon(t)| - 2 \left| \varepsilon^T(t) P B_m \right| (1 + c_{02}) \bar{u} + \\ & + 2 \left| \varepsilon^T(t) P B_m \right| \left(\bar{c}_{03} \bar{f} + \bar{c}_{01} \bar{x}_m + \bar{r} \right), \end{aligned} \quad (21)$$

где λ_{\min} — наименьшее собственное число матрицы Q .

Если

$$|\varepsilon(t)| < \bar{c}_{01}^{-1} \left[(1 + c_{02}) \bar{u} - \bar{c}_{03} \bar{f} - \bar{c}_{01} \bar{x}_m - \bar{r} \right], \quad (22)$$

то $\dot{V}(t) < 0$, откуда следуют оценки (12) и (13).

Рассмотрим теперь случай, когда $\operatorname{sgn}(g(u)) = \operatorname{sgn}(\varepsilon^T(t) P B_m)$. Перепишем второе слагаемое системы (11) в виде

$$\tilde{u} \operatorname{sat}(\tilde{u}^{-1} u_c(t)) - u(t) = (1 + \sigma)^{-1} \left[\tilde{u} \operatorname{sat}(\tilde{u}^{-1} u_c(t)) - u_c(t) \right]. \quad (23)$$

С учетом выражения (23) и $u_c(t) = -\varphi(t)$ перепишем систему (11) следующим образом:

$$\dot{\varepsilon}(t) = A_m \varepsilon(t) + \sigma(1 + \sigma)^{-1} B_m \left[\tilde{u} \operatorname{sat}(\tilde{u}^{-1} u_c(t)) + \varphi(t) \right]. \quad (24)$$

Найдем производную от функции (15) вдоль траекторий системы (24):

$$\dot{V}(t) = -\varepsilon^T(t)Q\varepsilon(t) + 2\sigma(1+\sigma)^{-1}\varepsilon^T(t)PB_m \left[\tilde{u}\text{sat}\left(\tilde{u}^{-1}u_c(t)\right) + \varphi(t) \right]. \quad (25)$$

С учетом уравнения (5) перепишем выражение для функции $\varphi(t)$ в виде

$$\varphi(t) = (1+c_{02})g(u) - (1+\sigma)^{-1} \left[-\varphi(t) + \sigma\tilde{u}\text{sat}\left(\tilde{u}^{-1}u_c(t)\right) \right] + c_{01}^T x(t) + c_{03}f(t) - r(t). \quad (26)$$

Решим (26) относительно $\varphi(t)$ и подставим $\varphi(t)$ в выражение (25):

$$\dot{V}(t) \leq -\varepsilon^T(t)Q\varepsilon(t) + 2\varepsilon^T(t)PB_m \left((1+\bar{c}_{02})\bar{u} + \bar{c}_{03}\bar{f} + \bar{c}_{01}\bar{x}_m + \bar{r} \right). \quad (27)$$

Тогда $\dot{V}(t) < 0$, если

$$|\varepsilon(t)| > 2\|R\|^{-1} \cdot |PB_m| \left((1+\bar{c}_{02})\bar{u} + \bar{c}_{03}\bar{f} + \bar{c}_{01}\bar{x}_m + \bar{r} \right). \quad (28)$$

Из выражений (22) и (28) следует, что функция $|\varepsilon(t)|$ будет находиться в области

$$2\|R\|^{-1} \cdot |PB_m| \left((1+\bar{c}_{02})\bar{u} + \bar{c}_{03}\bar{f} + \bar{c}_{01}\bar{x}_m + \bar{r} \right) < |\varepsilon(t)| < \bar{c}_{01}^{-1} \left((1+\underline{c}_{02})\bar{u} - \bar{c}_{03}\bar{f} - \bar{c}_{01}\bar{x}_m - \bar{r} \right).$$

Теперь определим оценку для коэффициента σ , при котором $|u(t)| \leq \bar{u}$. Для этого с учетом выражений (2) и (5) оценим $(1+\sigma)^{-1} \left[u_c(t) + \sigma\tilde{u}\text{sat}\left(\tilde{u}^{-1}u_c(t)\right) \right] \leq \bar{u}$ и решим последнее неравенство относительно σ : $\sigma \geq \frac{\bar{u} - u_c(t)}{\bar{u} - \tilde{u}\text{sat}\left(\tilde{u}^{-1}u_c(t)\right)}$. С учетом того, что $u_c(t) = -\varphi(t)$, оценим

сверху правую часть последнего неравенства:

$$\frac{\bar{u} - u_c(t)}{\bar{u} - \tilde{u}\text{sat}\left(\tilde{u}^{-1}u_c(t)\right)} \leq \frac{\tilde{u} + \sigma^{-1}(1+\sigma) \left[\left(\sigma^{-1}(1+\sigma) + 2 + \bar{c}_{02} + \underline{c}_{02} \right) \bar{u} + \bar{c}_{01}\bar{x}_m + 2\bar{c}_{03}\bar{f} + 2\bar{r} \right]}{\bar{u} - \tilde{u}}$$

откуда следует оценка (14).

Очевидно, что оценки (12)—(14) достаточно грубые, но из них следует, что существуют определенные значения параметров объекта, эталонной модели и регулятора, при которых в условиях ограничений можно обеспечить цель управления (4).

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-08-01183, 13-08-01014, 12-01-31354), а также в рамках федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг., соглашения № 14.В37.21.0871, 14.В37.21.1480.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Monopoli R.* Adaptive control for systems for hard saturation // Proc. of 14th IEEE Conf. on Decision and Control, Houston, TX, USA. 1975. P. 841—842.
2. *Цыкунов А. М.* Адаптивное и робастное управление динамическими объектами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
3. *Wen C., Zhou J., Liu Z., Su H.* Robust adaptive control of uncertain nonlinear systems in the presence of input saturation and external disturbance // IEEE Trans. on Automatic Control. 2011. Vol. 56, N 7. P. 1672—1678.
4. *Schwager M., Annaswamy A. M.* Direct adaptive control of multi-input plants with magnitude saturation constraints // Proc. of 44th IEEE Conf. on Decision and Control, and the European Control Conf., Seville, Spain. 2005. P. 783—788.

5. Цыкунов А. М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. 2007. № 7. С. 103—115.
6. Фуртат И. Б. Алгоритм субинвариантного управления по выходу линейным структурно неопределенным динамическим объектом // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 9. С. 22—27.
7. Фуртат И. Б. Субоптимальное управление нелинейными мультиагентными системами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 1 (83). С. 19—23.

Сведения об авторе

Игорь Борисович Фуртат

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: cainenash@mail.ru

Рекомендована
Институтом проблем
машиноведения РАН

Поступила в редакцию
26.06.13 г.

УДК 621.515

М. М. ШАКИРЬЯНОВ

СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ТУРБОКОМПРЕССОРА ОТ ПОМПАЖА

Рассматривается возможность построения системы защиты турбокомпрессора по результатам обработки экспериментальных данных о помпаже. В системе предусматривается одновременный контроль определенного набора параметров давления и температуры воздуха (газа) в газозоудушном тракте.

Ключевые слова: помпаж, струйный генератор, газозоудушный тракт.

Помпажные явления сопровождаются резкими понижением давления и повышением температуры воздуха по сечению турбокомпрессора [1, 2]. Контроль лишь отдельных параметров и(или) их определенных наборов далеко не всегда точно характеризует нарушение устойчивости газодинамической системы с компрессором.

В этой связи вполне обоснованным представляется проектирование системы с использованием экспериментальных данных о помпаже для контроля определенного набора параметров газозоудушного тракта.

Состояние газодинамической системы компрессора с присоединенными всасывающим трубопроводом и нагнетательным трубопроводом реально может характеризоваться параметрами T_1 и T_2 — температурой воздуха на входе и выходе компрессора соответственно, а также P_1 и P_2 — давлением воздуха на входе и выходе компрессора соответственно. Однако для прогнозирования помпажных явлений ограниченное количество параметров может оказаться недостаточным ввиду разновидностей помпажа, каковым является „вращающийся срыв“. Под термином „вращающийся срыв“ понимается явление, при котором срыв потока газа происходит на части лопаток компрессора в течение длительного времени [3].

Возникновение и развитие помпажа сопровождается значительным понижением давления воздуха за компрессором (P_2) и повышением температуры воздуха в газозоудушном тракте. Это утверждение подтверждается экспериментальными исследованиями, в ходе которых обнаружен эффект экспоненциального повышения температуры в газозоудушном тракте непосредственно перед возникновением помпажа. В связи с этим, помимо названных параметров T_1 и T_2 , введены дополнительные температурные параметры: T_3 — температура газа перед камерой сгорания и T_4 — температура газа за турбиной. Для измерения этих параметров наиболее эффективным представляется использование струйно-акустического датчика с быстродействием до 0,001 с.

В качестве такого датчика может быть использован струйно-акустический измеритель газового потока [4]. Принцип его работы основан на зависимости частоты колебаний струйного генератора от температуры проходящего через него газового потока. Струйный генератор колебаний, схема которого приведена на рис. 1, состоит из сопла питания 1, двух резонансных полукамер 2, клина 3 и выходного сопла 4.

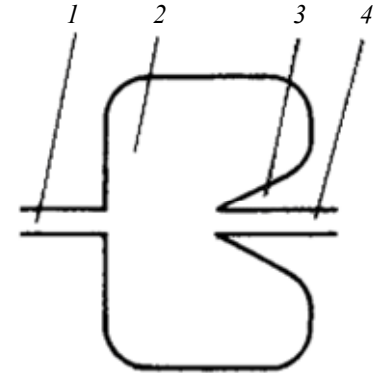


Рис. 1

Необходимым условием, обеспечивающим высокую точность измерений, является однозначная зависимость между частотой колебаний и температурой газового потока. Однако экспериментальные исследования показывают, что частота излучаемых колебаний зависит от изменения давления газа.

Здесь необходимо отметить следующее: несмотря на то, что явление возникновения звука при натекании струи на клин известно давно и ему посвящены многочисленные научные работы, исследования продолжают до настоящего времени. Наиболее полно струйные звукообразования исследованы в работах, где колебания струи под воздействием резонатора рассматриваются как автоколебания.

Полученные в результате экспериментов зависимости изменения давления P и температуры T , в относительных единицах, при помпаже, вызванные различными возмущениями на входе в двигатель (путем взрыва пороховых шашек), представлены на рис. 2, а, б соответственно.

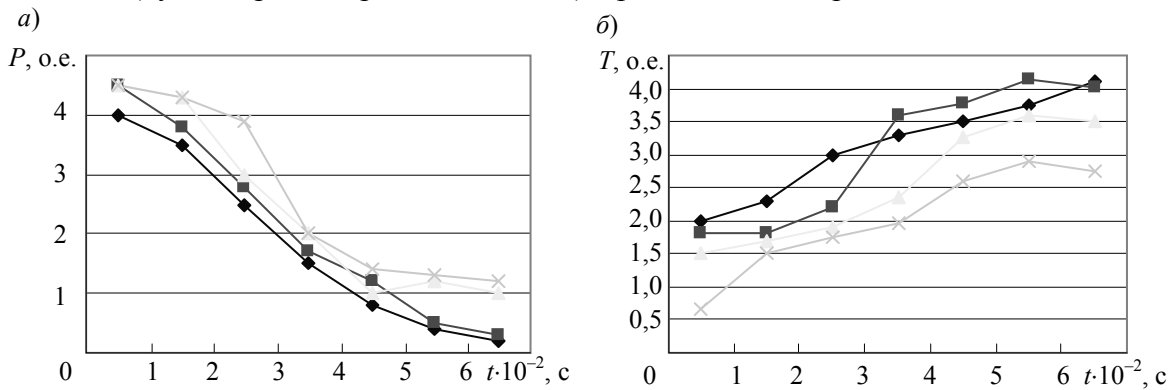


Рис. 2

Анализ графиков показывает, что независимо от интенсивности возмущений возникновение и развитие помпажа сопровождается повышением температуры и понижением давления.

Обобщенная система защиты турбокомпрессора от помпажа представлена на рис. 3. Функциональные преобразователи 5—8 формируют функции значений сигналов, поступающих с выходов датчиков 1—4 измерения температур $T_1—T_4$ соответственно. Далее эти сигналы поступают на входы пороговых устройств 9—12 соответственно. При превышении пороговых значений выдаются сигналы на исполнительные механизмы (ИМ) регулирующих устройств газотурбинного двигателя, например, клапан отсечки топлива и др.

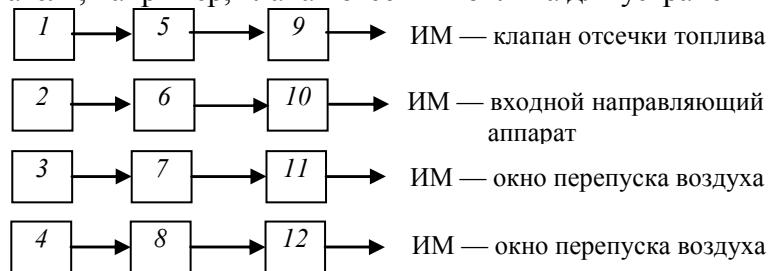


Рис. 3

Представленная система позволяет повысить быстрдействие при распознавания „вращающегося срыва“ как разновидности помпажа вследствие его резкого уменьшения (даже по

сравнению с датчиком давления воздуха на выходе компрессора, широко используемым в авиации, но зачастую фиксирующим ложную информацию о помпаже особенно на переходных режимах работы двигателя, что подтверждается периодически повторяющимися авиационными катастрофами).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакирьянов М. М. Экспериментальное исследование электронного устройства защиты ГТД от помпажа // Изв. вузов. Авиационная техника. 2006. № 2. С. 65—66.
2. Казакевич В. В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах. М.: Машиностроение, 1974. 264 с.
3. Грейцер Е. М. Помпаж и вращающийся срыв в осевых компрессорах. Экспериментальные результаты и сравнение с теорией. Энергетические машины и установки. М.: Изд-во „Мир“, 1976. Ч. II. С. 75.
4. Гулин А. И. Быстродействующий измеритель температуры газов в газотурбинном двигателе // Авиакосмическое приборостроение. 2012. № 9. С. 10—14.

Сведения об авторе

Морис Масгутович Шакирьянов — канд. техн. наук, доцент; Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, кафедра программирования и высшей математики, Уфа; E-mail: shakirianov.moris@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
программирования и высшей математики

Поступила в редакцию
18.03.13 г.

О. О. ЖАРИНОВ, И. О. ЖАРИНОВ

СИНТЕЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОГО МЕТОДА В ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Рассматриваются подходы к оптимизации вычислительных алгоритмов обработки электрокардиограмм на основе корреляционно-экстремального метода. Предложен алгоритм, позволяющий уменьшить время вычислений в десятки раз при сохранении показателей качества обработки сигнала с учетом требований электрокардиографии высокого разрешения.

Ключевые слова: электрокардиография высокого разрешения, QRS-комплекс, корреляционно-экстремальный метод, вычислительный алгоритм, быстрое преобразование Фурье, цифровая свертка.

Введение. Развитие метода электрокардиографии на современном этапе связано с совершенствованием технических средств регистрации электрокардиограммы (ЭКГ) и математических методов ее обработки. В электрокардиографии интенсивно развивается самостоятельное направление исследований — электрокардиография высокого разрешения (ЭКГ ВР) [1].

Одна из ключевых процедур автоматизированной обработки сигнала в ЭКГ ВР основана на применении ресурсоемкой, с вычислительной точки зрения, процедуры корреляционно-экстремальной обработки [2—4], которая позволяет решать задачи обнаружения и оценивания временного положения каждого кардиоцикла в реализации ЭКГ на фоне сопровождающих регистрацию помех. Практический опыт показывает, что при обработке ЭКГ, зарегистрированной с повышенной частотой дискретизации, вычислительная сложность корреляционно-экстремального метода существенно ограничивает возможности его практического применения, поэтому необходимо разработать специальный алгоритм, который обеспечит существенное уменьшение времени вычислений при сохранении показателей качества обработки.

Анализ проблемной ситуации. Обработка оцифрованной реализации ЭКГ, представленной N_{Σ} дискретными отсчетами $\eta[k]$, $k=0, 1, \dots, N_{\Sigma}-1$, на основе корреляционно-экстремального метода заключается в вычислении нормированного коэффициента корреляции между эталонным QRS-комплексом $s[k]$, $k=0, 1, \dots, N-1$, и анализируемым фрагментом ЭКГ на скользящем временном окне длиной N дискретных отсчетов [3]:

$$r[n] = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} (s[k] - M_s)(\eta[k+n] - M_{\eta}[n])}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (s[k] - M_s)^2 \sum_{k=0}^{N-1} (\eta[k+n] - M_{\eta}[n])^2}}, \quad n = 0, 1, \dots, N_{\Sigma} - N - 2, \quad (1)$$

где

$$M_s = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s[k], \quad M_\eta[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \eta[k+n].$$

Принятие решения об обнаружении каждого QRS-комплекса на анализируемом интервале ЭКГ производится в соответствии с решающим правилом, принятым в теории обнаружения сигналов: $r[n] > C$. Локальные максимумы процесса $r[n]$ на временных интервалах, где $r[n] > C$, определяют положения на временной оси опорных точек τ_l , $l=1, 2, \dots, L$, обнаруженных кардиоциклов, по которым осуществляется синхронизация в целях последующего их усреднения.

Одной из особенностей обработки ЭКГ для решения задач ЭКГ ВР является необходимость обеспечения минимально возможных значений ошибок оценивания опорных точек. Необходимое условие достижения этого требования — регистрация ЭКГ с частотой дискретизации F_Δ , при которой инструментальная составляющая погрешности определения значений τ_l окажется не менее чем на порядок ниже флуктуационной составляющей ошибки. При нормальных условиях регистрации ЭКГ это требование обеспечивается при $F_\Delta \geq 10$ кГц [5], что на порядок превышает значение, рекомендуемое в настоящее время для ЭКГ ВР. В этом случае объем данных 5-минутной записи ЭКГ также увеличивается на порядок и составляет $N_\Sigma = 3 \cdot 10^6$ дискретных отсчетов. Опыт показывает, что даже при использовании современных средств вычислительной техники без принятия специальных мер к снижению количества вычислительных операций время ожидания результата обработки такого объема данных обычно существенно превышает предел, при котором обеспечиваются условия психологически комфортной и оперативной работы медицинского персонала.

Для оценивания вычислительной сложности корреляционного метода обработки целесообразно провести декомпозицию формулы (1), представив ее в следующем виде:

$$r[n] = \frac{R[n]}{\sqrt{D_\eta[n]}}, \quad n = 0, 1, \dots, N_\Sigma - 1, \quad (2)$$

здесь

$$R[n] = \sum_{k=0}^{N-1} s_\circ[k] (\eta[k+n] - M_\eta[n]), \quad D_\eta[n] = \sum_{k=0}^{N-1} (\eta[k+n] - M_\eta[n])^2,$$

где компонент $s_\circ[k] = \frac{s[k] - M_s}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (s[k] - M_s)^2}}$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, представляет собой нормированный центрированный эталонный кардиоцикл.

Результаты анализа требований к объему вычислений по выражению (2) при обработке всей зарегистрированной ЭКГ $\{\eta[n], n=0, 1, \dots, N_\Sigma-1\}$ сведены в табл. 1.

Традиционно принято отдельно оценивать количество операций сложения (вычитания) и умножения (деления), поскольку время их выполнения различно. Однако во многих современных средствах вычислительной техники, используемых в устройствах вторичной обработки ЭКГ, время выполнения команд арифметических операций приблизительно одинаково.

В этом случае, суммируя выражения в последней строке табл. 1, можно оценить общий объем вычислений, требуемых для реализации корреляционно-экстремального метода обработки. При $N_\Sigma \gg N$ общее количество операций

$$K_1 \cong 7N N_\Sigma. \quad (3)$$

В целом, вычислительная сложность корреляционно-экстремального метода возрастает пропорционально квадрату значения частоты дискретизации, и обработка реализации ЭКГ,

продолжающаяся при $F_{\Delta}=1$ кГц примерно 10 с, при $F_{\Delta}=10$ кГц потребует уже 20 мин. Для придания проблеме количественного выражения заметим, что при типичной длительности QRS-комплекса $\{s[k]\}$ в 0,1 с и дискретизации ЭКГ с частотой $F_{\Delta}=10$ кГц объем выборки для эталонного кардиоцикла составляет $N=10^3$ отсчетов. В результате $K_1 \cong 2 \cdot 10^{10}$ операций с вещественными числами, что представляет собой значительную вычислительную нагрузку даже для современных компьютеров.

Таблица 1

Вычислительная операция, количество	Компонент формулы (2)				
	$s_o[k] \forall k^*$	$M_{\eta}[n] \forall n$	$D_{\eta}[n] \forall n$	$R[n] \forall n$	$\frac{R[n]}{\sqrt{D_{\eta}[n]}} \forall n^{**}$
Сложение (вычитание)	$3N-1$	$(N-1)N_{\Sigma}$	$(2N-1)N_{\Sigma}$	$(2N-1)N_{\Sigma}$	0
Умножение (деление)	$2N+2$	N_{Σ}	$N N_{\Sigma}$	$N N_{\Sigma}$	$2N_{\Sigma}$
Всего операций	$5N+1$	$N N_{\Sigma}$	$(3N-1) N_{\Sigma}$	$(3N-1) N_{\Sigma}$	$2N_{\Sigma}$
<p>Примечания.</p> <p>* В расчет количества операций для $\{s_o[k]\}$ включены затраты на вычисление M_s: $N-1$ операций сложения и одна операция деления.</p> <p>** Здесь при оценке вычислительной сложности учтено то обстоятельство, что операция извлечения квадратного корня может быть исключена (взамен вводится дополнительная операция умножения), если при поиске опорных точек использовать не $r[n]$, а $r^2[n]$ с эквивалентным решающим правилом $r^2[n] > C^2$.</p>					

Таким образом, очевидно, что в первую очередь необходимо стремиться к сокращению количества вычислительных операций для наиболее ресурсоемких компонентов расчетной формулы (2): $M_{\eta}[n]$, $D_{\eta}[n]$ и $R[n]$. Компонент $M_{\eta}[n]$ представляет собой выборочное математическое ожидание, компонент $D_{\eta}[n]$ — выборочную дисперсию (с точностью до постоянного множителя), вычисляемые на скользящем временном окне по дискретным отсчетам обрабатываемого процесса $\{\eta[k]\}$: для их расчета следует использовать рекуррентные формулы. Корреляционный компонент $R[n]$ можно преобразовать в формат цифровой свертки, для уменьшения объема вычислений которой существуют специальные методы [6—8].

Синтез и оптимизация алгоритмов обработки ЭКГ на основе корреляционно-экстремального метода. Выполняя замену переменных дискретного времени, нетрудно обеспечить тождественное преобразование уравнения (1) в формат, где структура выражения в числителе соответствует структуре выражения для цифровой свертки:

$$r[n-(N-1)] = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} (\tilde{s}[k] - \tilde{M}_s)(\eta[n-k] - \tilde{M}_{\eta}[n])}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (\tilde{s}[k] - \tilde{M}_s)^2 \sum_{k=0}^{N-1} (\eta[n-k] - \tilde{M}_{\eta}[n])^2}}, \quad n = N-1, N, \dots, N_{\Sigma}-1,$$

где $\{\tilde{s}[k]\}$ — „зеркальное“ отображение выборки эталонного кардиоцикла, выполняемое перестановкой отсчетов:

$$\tilde{s}[k] = s[N-1-k], \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad \tilde{M}_s = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}[k] = M_s, \quad \tilde{M}_{\eta}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \eta[n-k].$$

Проведя декомпозицию выражения для $r[n-(N-1)]$, получим

$$\tilde{r}[n] = r[n-(N-1)] = \frac{\tilde{R}[n]}{\sqrt{\tilde{D}_{\eta}[n]}}, \quad n = N-1, N, \dots, N_{\Sigma}-1, \quad (4)$$

где

$$\tilde{R}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] (\eta[n-k] - \tilde{M}_\eta[n]), \quad \tilde{D}_\eta[n] = \sum_{k=0}^{N-1} (\eta[n-k] - \tilde{M}_\eta[n])^2,$$

а выражение $\tilde{s}_\circ[k] = \frac{s[N-1-k] - M_s}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (s[k] - M_s)^2}}$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, представляет собой нормированный

центрированный эталонный сигнал.

Основное ресурсопотребление приходится на вычисление компонентов $\tilde{M}_\eta[n]$, $\tilde{D}_\eta[n]$ и $\tilde{R}[n]$. Первые два компонента при $n > N-1$ вычисляются по рекуррентным выражениям

$$\tilde{M}_\eta[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \eta[n-k] = \tilde{M}_\eta[n-1] + \frac{1}{N} (\eta[n] - \eta[n-N]) \quad (5)$$

и

$$\tilde{D}_\eta[n] = \tilde{D}_\eta[n-1] + \eta^2[n] - \eta^2[n-N] - N\tilde{M}_\eta^2[n]. \quad (6)$$

Краевой эффект, связанный с невозможностью использовать итерационные формулы (5) и (6) на интервале $0 \leq n < N$, для оценки их вычислительной сложности при $N_\Sigma \gg N$ можно не учитывать.

Относительно оптимизации вычислений компонента $\tilde{R}[n]$ необходимо предварительно отметить следующую возможность упрощения расчетной формулы:

$$\begin{aligned} \tilde{R}[n] &= \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] (\eta[n-k] - \tilde{M}_\eta[n]) = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] \eta[n-k] - \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] \tilde{M}_\eta[n] = \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] \eta[n-k] - \tilde{M}_\eta[n] \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] \eta[n-k], \end{aligned}$$

так как эталонный сигнал центрирован: $\sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] = 0$.

Для ускорения вычислений цифровой свертки

$$\tilde{R}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] \eta[n-k], \quad n = 0, 1, \dots, N_\Sigma - 1,$$

имеется множество способов, из которых наиболее удобным для построения конструктивных вычислительных алгоритмов является метод на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ). В частности, для $n = N, N+1, \dots, N_\Sigma - 1$ (с точностью до пренебрежимо малого краевого эффекта при начальных переменных $0 \leq n < N$) алгоритм расчета содержит следующие действия.

$$\text{Шаг 1. } \tilde{S}_\circ[n] = F\{\tilde{s}_\circ[n]\}, \quad n = 0, 1, \dots, N_\Sigma - 1, \quad \text{где } \tilde{s}_\circ[n] = \begin{cases} \tilde{s}_\circ[n], & n = 0, 1, \dots, N-1; \\ 0, & n = N, N+1, \dots, N_\Sigma - 1. \end{cases}$$

$$\text{Шаг 2. } X[n] = F\{\eta[n]\}, \quad n = 0, 1, \dots, N_\Sigma - 1.$$

$$\text{Шаг 3. } Y[n] = \tilde{S}_\circ[n] X[n], \quad n = 0, 1, \dots, N_\Sigma - 1.$$

$$\text{Шаг 4. } \tilde{R}[n] = F^{-1}\{Y[n]\}, \quad n = 0, 1, \dots, N_\Sigma - 1.$$

Здесь операторы $F\{\dots\}$ и $F^{-1}\{\dots\}$ обозначают вычислительные процедуры прямого и обратного быстрого преобразования Фурье соответственно.

Известно, что наибольшее ускорение вычислений при реализации алгоритмов БПФ дос-

тигается, если длина обрабатываемого массива равна целой степени числа 2, чего всегда можно добиться, дополняя обрабатываемую последовательность нулевыми отсчетами. При $N_{\Sigma}=2^m$, где m — натуральное число, алгоритмы прямого и обратного БПФ требуют по $N_{\Sigma}\log_2 N_{\Sigma}$ операций сложения комплексных чисел и по $\frac{N_{\Sigma}}{2}\log_2 N_{\Sigma}$ операций комплексного умножения. Учитывая, что одна операция сложения комплексных чисел требует двух операций сложения вещественных чисел, а одна операция комплексного умножения — четырех операций умножения и двух операций сложения вещественных чисел, нетрудно убедиться, что вычисление цифровой свертки с помощью рассмотренного 4-шагового алгоритма требует $9N_{\Sigma}\log_2 N_{\Sigma}$ операций сложения и $6N_{\Sigma}\log_2 N_{\Sigma}+4N_{\Sigma}$ операций вещественного умножения.

Результаты оценивания количества вычислительных операций, необходимых для расчета компонентов формулы (4), с применением 4-шагового алгоритма расчета цифровой свертки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вычислительная операция, количество	Компонент формулы (4)				
	$\tilde{s}_o[k] \forall k$	$\tilde{M}_n[n] \forall n$	$\tilde{D}_n[n] \forall n$	$\tilde{R}_n[n] \forall n$	$\frac{\tilde{R}[n]}{\sqrt{\tilde{D}_n[n]}} \forall n$
Сложение (вычитание)	$3N-1$	$2N_{\Sigma}$	$3N_{\Sigma}$	$9N_{\Sigma}\log_2 N_{\Sigma}$	0
Умножение (деление)	$2N+2$	N_{Σ}	$4N_{\Sigma}$	$(6\log_2 N_{\Sigma}+4)N_{\Sigma}$	$2N_{\Sigma}$
Всего операций	$5N+1$	$3N_{\Sigma}$	$7N_{\Sigma}$	$(15\log_2 N_{\Sigma}+4)N_{\Sigma}$	$2N_{\Sigma}$

Суммируя выражения в последней строке табл. 2, при $N \ll N_{\Sigma}$ количество вычислительных операций можно оценить величиной $(15\log_2 N_{\Sigma}+16)N_{\Sigma}$, а при $N_{\Sigma} \neq 2^m$, когда обрабатываемая последовательность дополняется нулями, — величиной

$$K_2 = (15\log_2 2^{\lceil \log_2 N_{\Sigma} \rceil} + 16) \cdot 2^{\lceil \log_2 N_{\Sigma} \rceil}, \quad (7)$$

где оператор $\lceil \dots \rceil$ выполняет округление до целого в бóльшую сторону.

При оговоренных ранее условиях регистрации ЭКГ формула (7) дает оценку в $K_2 \approx 1,5 \cdot 10^9$ арифметических операций, что на порядок меньше, чем полученная по табл. 1 оценка для метода прямых вычислений $K_1 \approx 2 \cdot 10^{10}$.

Следует отметить, что данный выигрыш получен именно за счет уменьшения количества вычислительных операций для расчета цифровой свертки, поскольку если в методе прямых вычислений реализовать только итерационные методы (5) и (6) с учетом центрирования эталонного сигнала, но цифровую свертку вычислять прямым методом, то общее количество вычислительных операций составит

$$K_{\text{ит}} = (2N+12)N_{\Sigma}. \quad (8)$$

Эта оценка дает $K_{\text{ит}} \approx 6 \cdot 10^9$, что в 4 раза больше значения K_2 .

Дополнительно сократить количество вычислительных операций для расчета цифровой свертки удастся при переходе к алгоритмам вычисления секционированных сверток [6—8]: перекрытия с суммированием или перекрытия с накоплением, которые по потенциальным возможностям ускорения вычислительного процесса эквивалентны.

На рис. 1 приведена структурная схема алгоритма вычисления секционированной свертки по методу перекрытия с накоплением. Здесь свертка вычисляется постепенно, посредством обработки секций длиной N_{Δ} дискретных отсчетов, а эталонным является сигнал $\{w[k]\}$, представляющий собой выбранный QRS-комплекс, подвергнутый „зеркальному“ отображению, центрированный и дополненный нулями начиная от исходных N отсчетов до $N_s=2^m$.

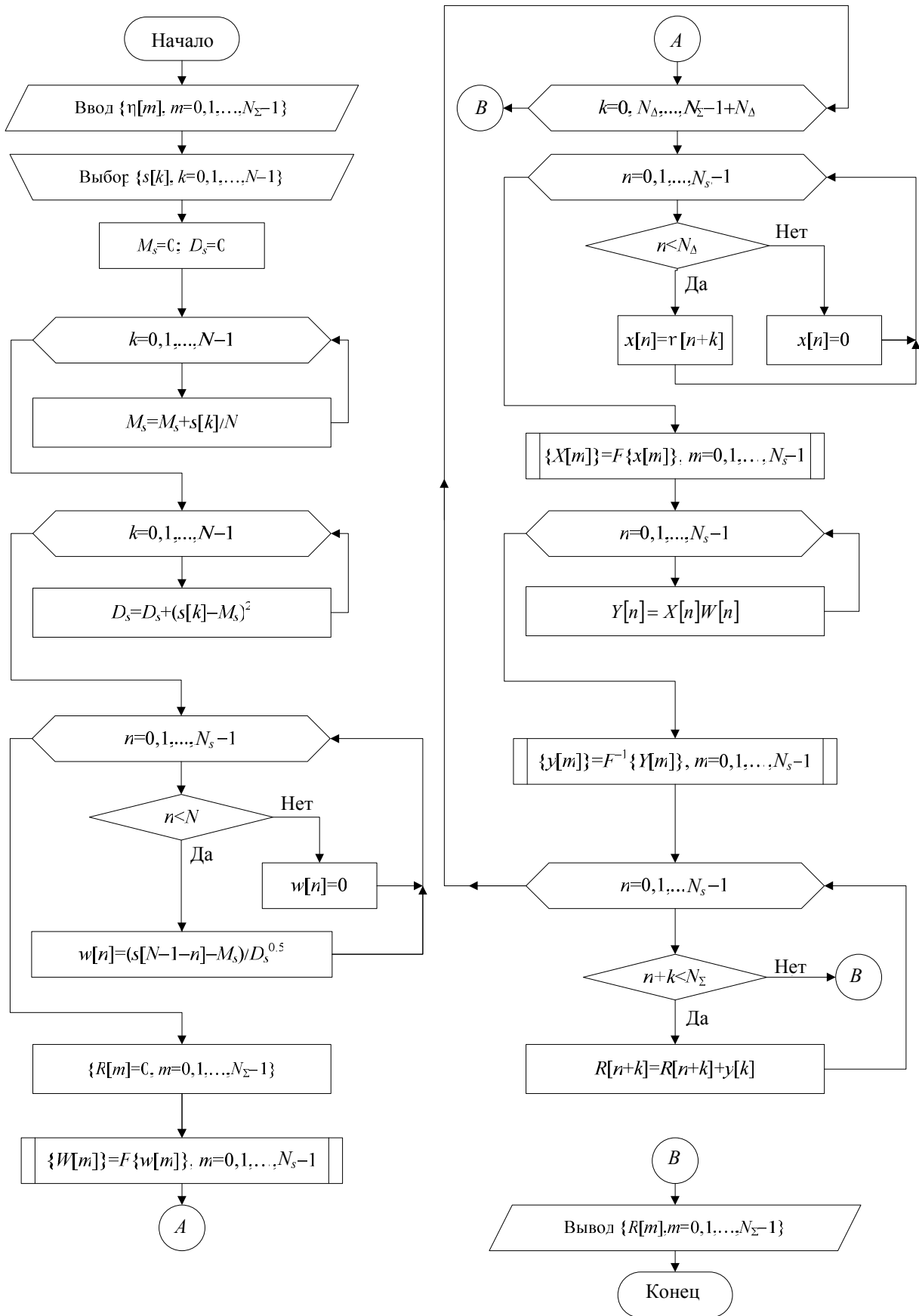


Рис. 1

Анализ схемы алгоритма с учетом того, что для рассматриваемого метода $N+N_\Delta=N_s$, позволяет общее количество операций с вещественными числами, требуемых для вычисления $\tilde{R}[n]$, $n = N, N+1, \dots, N_\Sigma-1$, оценить величиной

$$K_{\tilde{R}[n]} = 5N_s \log_2 N_s + \frac{N_\Sigma}{N_s - N} (10N_s \log_2 N_s + 9N_s). \quad (9)$$

Аналитическое исследование выражения (9) на экстремум в целях выбора значения параметра N_s , представляет собой проблему, сложность которой не соответствует масштабу решаемой задачи, поэтому оценивание выигрыша в быстродействии при различных N_s производилось численными методами. Следует заметить, что, в отличие от 4-шагового алгоритма вычисления цифровой свертки, при реализации метода вычисления секционированной свертки реализацию ЭКГ дополнять нулями не требуется. На рис. 2 приведен график построенной по формуле (9) зависимости величины $K_{\tilde{R}[n]}$ от значения N_s , определяющего количество отсчетов (длину) в эталонном сигнале, при типовых исходных данных $N = 10^3$ и $N_\Sigma = 3 \cdot 10^6$.

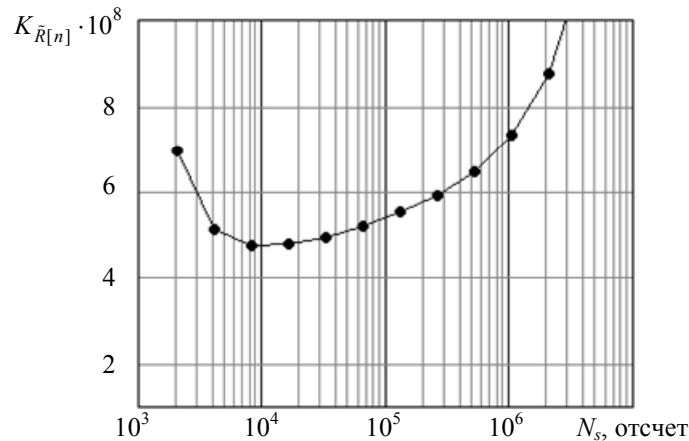


Рис. 2

Как видно из графика, минимальное значение $K_{\tilde{R}[n]}$ достигается при $N_s=2^{13}$, причем выбор значения N_s в плане минимизации вычислительной сложности алгоритма расчета цифровой свертки не слишком критичен.

Прибавив к выражению (9) величину $12N_\Sigma$ (общее количество операций, требуемых для вычисления $\tilde{M}_\eta[n] \forall n$, $\tilde{D}_\eta[n] \forall n$ и $\frac{\tilde{R}[n]}{\sqrt{\tilde{D}_\eta[n]}} \forall n$, согласно данным табл. 2, последняя строка),

получим итоговое выражение, определяющее количество вычислительных операций, необходимых для оптимизированного алгоритма вычислений коэффициента корреляции $\{r[n]\}$ для всей реализации ЭКГ:

$$K_3 = 5N_s \log_2 N_s + \frac{N_\Sigma}{N_s - N} (10N_s \log_2 N_s + 9N_s) + 12N_\Sigma. \quad (10)$$

Расчет по формуле (9) при $N=10^3$, $N_s=2^{13}$ и $N_\Sigma=3 \cdot 10^6$ дает $K_3=5,2 \cdot 10^8$ операций.

Таким образом, применение специально разработанных методов и вычислительных алгоритмов позволяет существенно сократить избыточность вычислений при корреляционно-экстремальной обработке электрокардиографических сигналов, при этом обеспечивается возможность точного вычисления всех значений коэффициентов $r[n]$, $n=0, 1, \dots, N_\Sigma-N-2$, как если бы они вычислялись непосредственно по формуле (1).

Анализ результатов исследования. Количественные характеристики оптимизации алгоритма обработки электрокардиограмм на основе корреляционно-экстремального метода получены в предположении о выполнении повышенных требований к дискретизации процессов в области ЭКГ ВР и к выбору „длины“ эталонного сигнала, обеспечивающего минимально возможное значение дисперсии ошибки оценивания временных положений опорных точек QRS-комплексов. Однако в настоящее время распространены электрокардиографические системы, работающие при меньших частотах дискретизации. Кроме того, „длина“ эталонного сигнала может быть выбрана меньшей, чем длительность полного QRS-комплекса, хотя, конечно, при этом несколько ухудшаются показатели качества обработки ЭКГ [3]. Результаты сравнительного анализа эффективности исследованных вычислительных алгоритмов на основе корреляционно-экстремального метода при различных сочетаниях параметров обработки 5-минутной записи ЭКГ приведены в табл. 3 (здесь $T_{эТ}$ — длительность эталонного сигнала в непрерывном времени).

Таблица 3

Параметр регистрации ЭКГ		Параметр вычислительного алгоритма, отчет			Количество требуемых вычислительных операций для расчета $r[n] \forall n$			
$T_{эТ}, c$	$F_{\Delta}, Гц$	N_{Σ}	N	$N_{с\text{ опт}}$	K_1	$K_{1\text{ ит}}$	K_2	K_3
0,1	10^4	$3 \cdot 10^6$	10^3	2^{13}	$2 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$5,2 \cdot 10^8$
	$5 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^2$	2^{12}	$5,2 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$7,0 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^8$
	$2 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^2$	2^{11}	$8,4 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^8$	$3,3 \cdot 10^8$	$8,7 \cdot 10^7$
	10^3	$3 \cdot 10^5$	10^2	2^{10}	$2 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^7$
0,06	10^4	$3 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^2$	2^{13}	$1,3 \cdot 10^{10}$	$3,6 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$4,9 \cdot 10^8$
0,04			$4 \cdot 10^2$	2^{12}	$8,4 \cdot 10^9$	$2,4 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$4,7 \cdot 10^8$
0,02			$2 \cdot 10^2$	2^{11}	$4,2 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$4,3 \cdot 10^8$
0,01			10^2	2^{10}	$2 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^8$
0,06	10^3	$3 \cdot 10^5$	60	2^9	$1,2 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$	$3,8 \cdot 10^7$
0,04			40	2^8	$8,4 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$	$3,6 \cdot 10^7$
0,02			20	2^7	$4,2 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$	$3,2 \cdot 10^7$
0,01			10	2^6	$2 \cdot 10^7$	10^7	$1,5 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^7$

Примечание. Полужирным шрифтом выделены минимальные значения количества вычислительных операций при каждом сочетании исходных параметров алгоритма.

Данные, приведенные в табл. 3, дают наглядное представление об относительной эффективности сокращения количества вычислительных операций при использовании различных исследованных алгоритмов. Решение задачи оптимизации, обусловленной необходимостью уменьшить недопустимо большое время вычислений при обработке электрокардиограмм на высокой частоте дискретизации с применением „длинного“ эталонного сигнала, демонстрирует неплохие результаты: количество вычислительных операций сокращается более чем на порядок. При обработке кардиограмм, зарегистрированных при стандартной частоте дискретизации $F_{\Delta} = 10^3$ Гц и умеренных требованиях к показателям качества обработки, предложенный вычислительный алгоритм (см. рис. 1) показывает более скромные результаты: в ряде случаев он становится соизмеримым по эффективности и даже проигрывает методу прямых вычислений коэффициента корреляции с применением итерационных процедур (что видно при сравнении K_3 и $K_{1\text{ ит}}$).

Как показали результаты проведенного тестирования разработанных алгоритмов, время выполнения каждого из них не пропорционально соответствующей оценке количества вычислительных операций. В табл. 4 приведены результаты сравнительного анализа времени вычислений при использовании исследованных алгоритмов. Тестирование производилось в

программной среде MathCAD 14 на компьютере с процессором Intel® Core™ 2 Duo CPU E4600, 2,4 ГГц, с объемом ОЗУ в 1 Гб под управлением ОС Windows XP Professional Ed. SP2, с использованием авторских алгоритмов и программного обеспечения [9, 10].

Вообще, данные о сравнительной эффективности различных вычислительных алгоритмов на основе корреляционно-экстремального метода могут варьироваться в зависимости от особенностей аппаратной платформы, применяемой операционной системы и свойств компилятора используемой вычислительной среды. Сравнение данных табл. 3 и 4 показывает, что относительный выигрыш во времени выполнения для алгоритмов на основе БПФ оказывается намного больше, чем следует из формальных оценок количества вычислительных операций, и разработанный алгоритм на основе метода секционированной свертки обеспечивает минимальное время вычислений при любых исходных параметрах сигнала. Связано это, по-видимому, с тем, что алгоритм БПФ хорошо приспособлен для параллельных вычислений, поддерживаемых современными процессорами на аппаратном уровне.

Таблица 4

Параметр регистрации ЭКГ		Параметр вычислительного алгоритма, отсчет			Время вычисления $r[n] \forall n$, с, для		
$T_{эт}$, с	F_{Δ} , Гц	N_{Σ}	N	$N_{s\text{ опт}}$	$K_{\text{итг}}$	K_2	K_3
0,1	10^4	$3 \cdot 10^6$	10^3	2^{13}	1470	33	12
	$5 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^2$	2^{12}	225	16	6
	$2 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^2$	2^{11}	40	8	3
	10^3	$3 \cdot 10^5$	10^2	2^{10}	10	4	1,5
0,06	10^4	$3 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^2$	2^{13}	880	33	12,2
0,04			$4 \cdot 10^2$	2^{12}	500	33	12,3
0,02			$2 \cdot 10^2$	2^{11}	200	33	12,2
0,01			10^2	2^{10}	104	33	12
0,06	10^3	$3 \cdot 10^5$	60	2^9	7,5	4	1,3
0,04			40	2^8	5	4	1,3
0,02			20	2^7	3,2	4	1,3
0,01			10	2^6	2,4	4	1,3

Примечание. Алгоритм прямых вычислений, дающий оценку вычислительных операций K_1 по формуле (3), не тестировался по причине огромных непроизводительных затрат машинного времени при очевидном результате.

Заключение. Достигнутые результаты оптимизации вычислительного алгоритма обработки ЭКГ на основе корреляционно-экстремального метода следующие: при необходимых требованиях к параметрам зарегистрированных процессов и правильном выборе параметров алгоритма время вычислений сокращается в десятки раз по сравнению с методом прямых вычислений, обеспечивая комфортную работу пользователя. С практической точки зрения, выигрыш в быстродействии становится значимым только при повышенной частоте дискретизации, которая необходима для реализации перспективных подходов к обработке ЭКГ с высоким разрешением [4, 5]. Таким образом, разработанный и исследованный алгоритм является специфическим инструментальным средством для решения задач электрокардиографии высокого разрешения при требовании достижения наилучших показателей качества обработки сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрокардиография высокого разрешения / Под ред. Г. Г. Иванова, С. В. Грачева, А. Л. Сыркина. М.: Издво „Триада-Х“, 2003. 304 с.

2. Кардиомониторы. Аппаратура непрерывного контроля ЭКГ: Учеб. пособие / Под ред. А. Л. Барановского и А. П. Немирко. М.: Радио и связь, 1993. 248 с.
3. Жаринов О. О., Жаринов И. О. Применение корреляционно-экстремального метода для решения задач обнаружения и оценивания положений опорных точек QRS-комплексов в электрокардиограмме // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 5 (75). С. 85—90.
4. Жаринов О. О., Жаринов И. О. Электрокардиография высокого разрешения: новый подход к обработке сигнала // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2006. № 33. С. 106—120.
5. Жаринов О. О. К вопросу о разрешающей способности метода электрокардиографии высокого разрешения // Вестник молодых ученых. 2003. № 6. С. 33—38.
6. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. 248 с.
7. Арутюнов П. А. Теория и применение алгоритмических измерений. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
8. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов: практический подход: Пер. с англ. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2004. 992 с.
9. А.с. 2753 ОФАП. Программа исследования на ЭВМ корреляционно-экстремального алгоритма обнаружения QRS-комплексов электрокардиограммы / О. О. Жаринов, И. О. Жаринов. М.: ВНИИЦ, № 50200300257. 2003.
10. Жаринов И. О., Жаринов О. О. Статистический анализ информационных процессов с повторяющимися признаками формы в электрофизиологических исследованиях и медицинском приборостроении: Монография. СПб: Изд-во „Нестор-история“, 2011. 151 с.

Сведения об авторах

- Олег Олегович Жаринов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра моделирования вычислительных и электронных систем; E-mail: zharinov73@hotmail.ru
- Игорь Олегович Жаринов** — д-р техн. наук, доцент; ФГУП «СПб ОКБ „Электроавтоматика“ им. П. А. Ефимова», Санкт-Петербург; руководитель учебно-научного центра; E-mail: igor_rabota@pisem.net

Рекомендована кафедрой
машинного проектирования бортовой
электронно-вычислительной
аппаратуры НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
01.09.13 г.

О. Ф. НЕМОЛОЧНОВ, Л. Г. ОСОВЕЦКИЙ

КРИЗИС ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ, НЕДЕКЛАРИРОВАННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И *DON'T CARE*

Рассматриваются вопросы верификации вычислительных процессов по графоаналитическим моделям, управляемых частично-определенными булевыми функциями. Исследуются задачи поиска по булеву графу управления и кубическим покрытиям недеklarированных возможностей и мертвого кода как следствия *don't care*. Приведены примеры построения покрытий для булева графа и верификация *don't care* в виде покрытия конъюнкции отношений-неравенств, тождественно равных нулю.

Ключевые слова: технология программирования, недеklarированные возможности, верификация, мертвый код, угрозы безопасности.

Введение. Определим вычислительный процесс как процесс преобразования информации по формулам и алгоритмам, используемым для вычисления значений некоторого множества переменных. Вычисление значений переменных по разным формулам и алгоритмам осуществляется под управлением заданного множества неравенств-отношений, которые задают условия-предикаты, так как каждое отношение может либо выполняться, либо не выполняться, т.е. принимать два значения: *true* и *false*, и, следовательно, образует предикат на множестве значений переменных, входящих в левую и правую части неравенств. Для описания вычислительного процесса, порождаемого логической схемой или программой, необходимо построить модель, которая позволит формализовать его описание и упростить решение различных задач синтеза и анализа с применением аппарата теории множеств и алгебры логики. В качестве такой модели удобно использовать графоаналитическое представление вычислительного процесса [1]. В вершинах графа располагаются итеративные и рекуррентные формулы и условия-предикаты (отношения). Связи между вершинами задаются дугами. В общем случае в вершине может размещаться любой алгоритм преобразования информации. Дуги управления образуют конъюнкции условий-предикатов, их дизъюнкции образуют булевы функции. Основной задачей исследования вычислительного процесса является его верификация в соответствии с декларацией, состоящая в верификации декларированных и недеklarированных возможностей процесса и в поиске несуществующих значений, образующих множество *don't care*.

Таким образом, задача верификации вычислительного процесса может быть сведена к поиску недеklarированных возможностей (НДВ) и конъюнкций условий-предикатов, тождественно равных нулю, для которых системы неравенств не имеют решений. НДВ на графе вычислительного процесса образуют множество вершин и дуг, недостижимых через входные последовательности наборов данных, построенных по декларации и *don't care*, которые порождают частично-определенные булевы функции. Эти функции при их отображении на n -мерный двоичный куб E_n^2 могут быть заданы покрытиями комплексов $K^1(f)$, где $f=1$, $K^0(f)$, где $f=0$, и $K^d(f)$, где $f=d$ (*don't care*). Поиск и верификация вершин (конъюнкций) комплекса $K^0(f)$ и составляет основную задачу анализа вычислительных процессов.

Графоаналитическая модель вычислительного процесса. Информационные потоки в вычислительных процессах управляются некоторым множеством условий-предикатов в виде неравенств-отношений. Неравенства задают отношения между значениями переменных, входящих в их левую и правую части. Неравенства могут выполняться или не выполняться

и порождают, таким образом, предикат P , равный T при выполнении, и равный F — при невыполнении. Под формулой понимается конечная последовательность символов переменных и знаков математических операций между ними, т.е. рассматривается линейная формула FR. Значение, вычисленное по формуле FR, будем обозначать как $|FR|$.

Под алгоритмом понимается некоторая конечная последовательность элементарных действий, приводящих к однозначному результату — значению переменной. В общем случае обобщением формулы или алгоритма является некоторый оператор S , имеющий одну точку входа (T_{in}) и одну точку выхода (T_{out}).

Представление и описание вычислительного процесса в виде графа как множества вершин и связей между ними является некоторой метамоделью, не зависящей от конкретной реализации, например, в виде логической схемы или программы на алгоритмическом языке.

Для описания вычислительного процесса введем три типа вершин [2]: линейные — для формул и операторов; условные — для отношений-неравенств; объединения связей между ними. Связи между вершинами являются однонаправленными и, следовательно, образуют дуги, т.е. всегда имеется источник и приемник передачи управления, и, таким образом, информационные потоки в виде последовательности вершин и дуг являются направленными и детерминированными. Аналитическое описание вершин задается в виде логико-алгебраических выражений, сочетающих в себе логику условий-предикатов и алгебраические формулы вычисления переменных, а также может быть задано в виде кубических покрытий [3].

Далее вычислительный процесс может быть фрагментирован на замкнутые параллельные структуры (SR), реализующие по разным формулам альтернативные вычисления переменных r или различных переменных в зависимости от заданного множества условий-предикатов. Условия-предикаты могут задаваться либо напрямую булевыми переменными, либо косвенно через неравенства-отношения. Некоторое множество вершин и дуг графа вычислительного процесса образует параллельную структуру, если оно содержит одну точку входа T_{in} и одну точку выхода T_{out} . Для структуры SR все разветвления по условиям должны сходиться в одной точке T_{out} . На алгоритмическом языке высокого уровня им соответствуют условные операторы присвоения.

Любая булева функция f , входящая в параллельную структуру SR, является полностью заданной, т.е. образует комплекс $K(f) = K^1(f) \cup K^d(f) \cup K^0(f)$. Другими словами, если в SR содержится n условий, то любая булева функция f из SR может быть отображена на кубе E_n^2 множествами вершин K^1 , где $f=1$, K^0 , где $f=0$, и K^d , где $f=d$, таких что $K^1 \cup K^0 \cup K^d = E_n^2$. Здесь d (*don't care*) есть такие вершины куба E_n^2 , где значение функции не определено вследствие того, что конъюнкции условий-предикатов дают пустые пересечения множеств значений переменных, входящих в неравенства-отношения, т.е. система неравенств не имеет решения.

Параллельные структуры SR могут находиться между собой в следующих отношениях:

- включение, когда некоторая структура SR_j содержит в себе некоторую структуру SR_i ($SR_j \supset SR_i$);
- конъюнкция — $SR_j \& SR_i$, т.е. последовательная композиция;
- дизъюнкция — $SR_j \vee SR_i$, т.е. параллельная композиция.

Так как любая структура SR является замкнутой, покрытия входящих в нее булевых функций можно (и нужно) строить независимо друг от друга, полагая, что условия-предикаты локализованы в ней, благодаря чему и достигается компактность покрытий. Таким образом, при построении покрытий для некоторой структуры SR другие структуры графа вычисли-

тельного процесса могут рассматриваться как некоторые нераскрываемые операторы S , что соответствует реализации вычислительного процесса, описанного на языке высокого уровня, в виде блоков и модулей.

На рис. 1 показан пример параллельной структуры, реализующей интервальную формулу (IFR), при $k_1 < k_2$:

$$r = \begin{cases} \text{IFR}_1 \text{ при } x < k_1; \\ \text{IFR}_2 \text{ при } k_1 \leq x \leq k_2, \\ \text{IFR}_3 \text{ при } x > k_2. \end{cases}$$

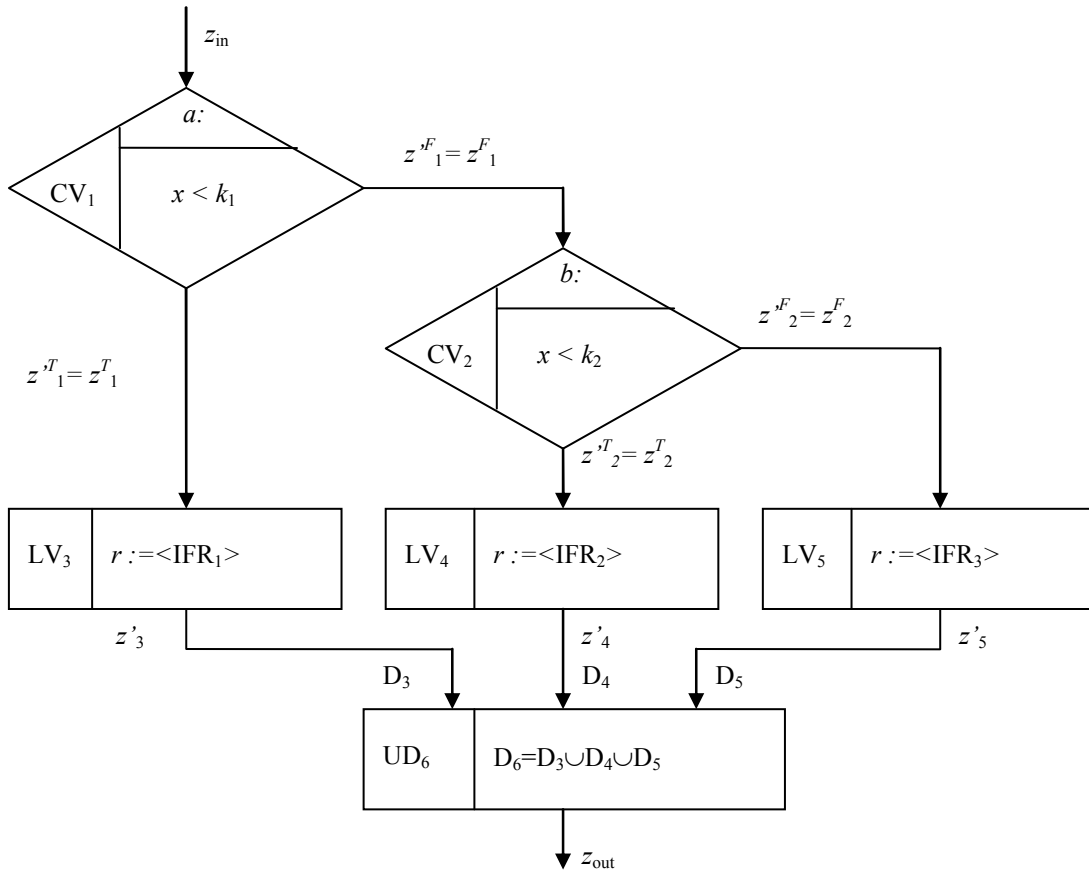


Рис. 1

На рисунке отношение $x < k_1$ обозначено через $a: x < k_1$, отношение $x > k_2$ — через $b: x > k_2$, и тогда соответственно $\bar{a}: x \geq k_1$ и $\bar{b}: x \leq k_2$; CV — условная вершина, LV — линейная вершина, D — дуга, UD — объединение дуг, T и F — предикаты.

Выражение для переменной r на языке высокого уровня может быть записано условным оператором присваивания:

$$r := \text{if } (x < k_1) \text{ then } \langle \text{IFR}_1 \rangle \\ \quad \text{else if } (x > k_2) \text{ then } \langle \text{IFR}_3 \rangle \\ \quad \text{else } \langle \text{IFR}_2 \rangle.$$

Результаты вычисления покрытий для переменной r сведены в табл. 1; в начале таблицы даны исходные покрытия для всех вершин графа в соответствии с типовыми покрытиями и в терминах обозначений, принятых в работе [2].

Таблица 1

z_{in}	a	b	r	r'	z_1^T	z_1^F	z_2^T	z_2^F	z_3	z_4	z_5	z_{out}	Примечание
									1	0	0	1	C_1 C_2 C_3 C_4 } $C(UD_6)$
									0	1	0	1	
									0	0	1	1	
									0	0	0	0	
			×	/IFR ₁ /									C_5 C_6 } $C(LV_3)$
			×	×									
			×	/IFR ₂ /				1	1				C_7 C_8 } $C(LV_4)$
			×	×			0	0	0				
			×	/IFR ₃ /			1				1		C_9 C_{10} } $C(LV_5)$
			×	×			0			0	0		
	0					1	0	1					C_{11} C_{12} C_{13} } $C(CV_2)$
	1					1	1	0					
	×					0	0	0					
1	0					0	1						C_{14} C_{15} C_{16} } $C(CV_1)$
1	1					1	0						
0	×					0	0						

В табл. 2 приведены пересечения кубов, имеющих непустое значение. Вычисления проводились от z'_{out} к z_{in} и, фактически, свелись к перебору четырех кубов из покрытия $C(UD_6)$.

Таблица 2

z_{in}	a	b	r	r'	z_1^T	z_1^F	z_2^T	z_2^F	z_3	z_4	z_5	z_{out}	Примечание
1	1	×	×	/IFR ₁ /	1	0	0	0	1	0	0	1	$C_1 \cap C_5 \cap C_{15} \cap C_8 \cap C_{10}$
1	0	0	×	/IFR ₂ /	0	1	0	1	0	1	0	1	$C_2 \cap C_7 \cap C_{11} \cap C_6 \cap C_{10}$
1	0	1	×	/IFR ₃ /	0	1	1	0	0	0	1	1	$C_3 \cap C_9 \cap C_{12} \cap C_6 \cap C_8$
0	×	×	×	×	0	0	0	0	0	0	0	0	$C_4 \cap C_6 \cap C_8 \cap C_{10}$

Удалив из покрытия промежуточные значения z' , получим покрытие $C(r)$ в формате:

$z_{in} a b r r' z'_{out}$:

$$C(r) = \left\{ \begin{array}{cc|cc|cc} z_{in} & a & b & r & r' & z'_{out} \\ \hline 1 & 1 & \times & \times & |IFR_1| & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \times & |IFR_2| & 1 \\ 1 & 0 & 1 & \times & |IFR_3| & 1 \\ 0 & \times & \times & \times & \times & 0 \end{array} \right\},$$

структура которого соответствует структуре покрытий для типовых вершин и описывает режим вычисления по различным итеративным формулам и режим хранения $r = \times$.

Поиск и верификация недеklarированных возможностей. *Недекларированные возможности* — функциональные возможности программного обеспечения (ПО), не описанные или не соответствующие описанным в документации, при использовании которых возможно нарушение конфиденциальности, доступности или целостности обрабатываемой информации. Реализацией недеklarированных возможностей, в частности, являются программные закладки.

Программные закладки — преднамеренно внесенные в ПО функциональные объекты, которые при определенных условиях (входных данных) инициируют выполнение не описанных в документации функций ПО, приводящих к нарушению конфиденциальности, доступности или целостности обрабатываемой информации [4].

Определим недеklarированные возможности в общем виде как все особенности и возможности вычислительного процесса (ВП), порождаемого программой в ходе ее исполнения, не описанные в декларации. Природа НДВ носит как объективный, так и субъективный ха-

раक्टर в силу сложности и размерности самого программного продукта (ПП). Однако можно выделить, в общих чертах, основные источники и составляющие части НДС:

- 1) наличие в ПП специально предусмотренных закладок для наблюдения за ВП и его отладки в ходе проектирования и реализации;
- 2) исключение излишне мелких подробностей ВП при составлении декларации из-за стремления к ее компактности;
- 3) наличие в частично-определенных булевых функциях f управления ВП неопределенных значений d в виде комплекса $K^d(f)$, который объективно существует, но, как правило, не используется и не описывается.

Поиск и верификацию НДС можно осуществить путем моделирования вычислительного процесса либо в виде программы, либо на более высоком уровне — в виде графоаналитической модели.

Моделирование ВП проводится с использованием испытательных наборов данных из его декларации посредством прямого исполнения программы в ходе тестовых экспериментов. В ходе экспериментов необходимо фиксировать вершины и дуги, которые достижимы на входе T_{in} , вычисляются и наблюдаются через выход T_{out} в исследуемой программе.

О п р е д е л е н и е. Множество вершин и дуг графоаналитической модели вычислительного процесса образуют множество НДС, если они недостижимы в результате тестовых экспериментов, построенных по декларации.

Множество задействованных вершин и дуг графа образуют декларированные возможности (ДВ) ВП и соответственно программы его реализующей. Таким образом, все множество вершин и дуг $M(V,D)$ распадается на два подмножества $M^{ДВ}$ и $M^{НДС}$: $M(V,D) = M^{ДВ} \cup M^{НДС}$. Указанные подмножества можно построить путем моделирования константных неточностей условий-предикатов ($m^1 \equiv 1 (T)$ и $m^0 \equiv 0 (F)$), непосредственно вводя их либо в программу [5], либо в условные вершины графоаналитической модели ВП, при условии, что такая модель построена. С этой целью в ходе тестовых экспериментов производится сравнение результатов вычислений при отсутствии неточностей и с заданной неточностью $m^p \in M$, где M — все множество условий-предикатов. Условие-предикат может полностью не проверяться или проверяться только в одном из значений T или F . В этом смысле множество непроверяемых неточностей и формирует множество вершин и дуг, образующих НДС.

Поиск и верификация *don't care*. Для любой булевой функции f от n переменных область определения состоит из 2^n их значений, задающих канонические формы f . Это множество значений может быть сопоставлено с вершинами n -мерного двоичного куба E_n^2 ; для упрощения логических выражений можно применять исчисление кубических комплексов путем построения избыточных покрытий в виде дизъюнктивных нормальных форм (простых импликант) или в виде скобочных форм (полученных методом функциональной декомпозиции). Первый способ применяется при реализации ВП в виде логических схем, а второй — в виде ПП.

В случае частично-определенных булевых функций область определения из 2^n значений разбивается на два подмножества M^1 и M^d : $M^1 \cup M^d = E_n^2$ и $M^1 \cap M^d = \emptyset$. Множество M^1 состоит из конъюнкций, которые могут быть вычислены в значениях, равных единице, а множество M^d состоит из конъюнкций, тождественно равных нулю. Значения функции f на конъюнкциях из M^d принято обозначать как d , образующие значение f в виде *don't care*, т.е. значение функции f „безразличное“ и может быть произвольно присоединено к любой функции управления z , построенной на множестве M^1 .

В случае если булевы переменные задаются в виде отношений-неравенств, то значениям d соответствуют системы неравенств, для которых отсутствуют решения, и соответственно множество отношений между переменными, входящими в левую и правую части неравенств, дают пустое пересечение.

Итак, определим множество конъюнкций *don't care* как множество конъюнкций, тождественно равных нулю. Поиск таких конъюнкций может быть осуществлен либо непосредственным решением систем неравенств в аналитической форме, либо методом моделирования отношений на числовой оси в виде линий Ламберта или на плоскости в виде диаграмм Эйлера — Венна непосредственным заданием этих множеств [6].

Верификация *don't care* состоит в построении покрытий C^1 для M^1 и C^d для M^d , которые позволяют производить поиск *don't care* в сокращенной форме для подмножеств из M^d и, следовательно, сократить перебор при решении систем неравенств-отношений.

Рассмотрим описанные выше положения на примере. Пусть на числовых осях x и y заданы четыре отношения:

$$a : x < 4, \quad b : x > 5, \quad c : y < 3, \quad d : y > 6.$$

Здесь отношения a и b не зависят от значений c и d , поэтому поиск *don't care* можно произвести раздельно.

Итак, если $x < 4$ и $x > 5$, то эта система неравенств не имеет решения, т.е. на числовой оси x невозможно найти значения x , удовлетворяющие конъюнкции $a=b=1$, т.е. $ab \equiv 0$, которое и есть *don't care*. Аналогично, конъюнкция $c=d=1$ также не имеет решения и $cd \equiv 0$ образует *don't care* для $y < 3$ и $y > 6$.

Покрытие множества M^d относительно множества отношений $\{a,b,c,d\}$ компактно можно записать в виде двух кубов:

$$C^d = \left\{ \begin{array}{cccc} a & b & c & d \\ 1 & 1 & \times & \times \\ \times & \times & 1 & 1 \end{array} \right\}.$$

Аналогично можно для верификации *don't care* построить покрытие для M^1 в виде трех кубов:

$$C^1 = \left\{ \begin{array}{cccc} a & b & c & d \\ \times & 0 & \times & 0 \\ 0 & \times & 0 & \times \\ \times & 0 & 0 & \times \end{array} \right\}.$$

Заметим, что $C^1 \cup C^d = E_n^2$ и $C^1 \cap C^d = \emptyset$, что и свидетельствует о рассмотрении всех конъюнкций для отношений $\{a,b,c,d\}$.

Указанные решения проиллюстрированы на рис. 2.

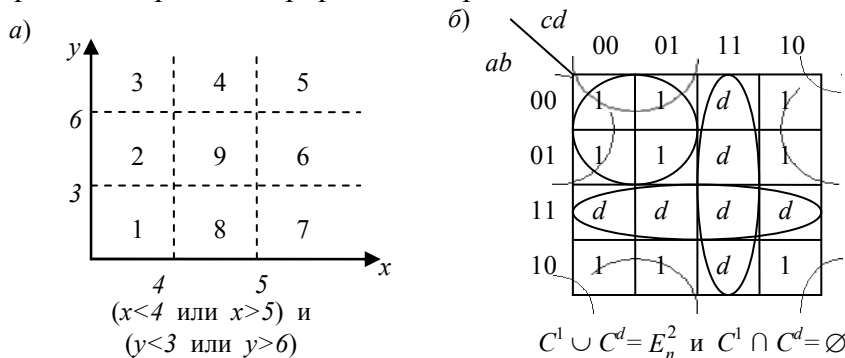


Рис. 2

Так, на рис. 2, a показаны отношения $\{a,b,c,d\}$ в системе координат xu : видно, что число существующих решений для системы неравенств равно 9, а оставшиеся 7 отношений решений не имеют. На развертке куба E_n^2 в виде карты Карно (рис. 2, б) вершины множества M^1 обозначены как 1, а множества M^d — как d .

Из рассмотренного примера видно, что задача поиска и верификации *don't care* состоит в переборе всех вариантов решений. Этот перебор может быть сокращен, если решения искать сразу в кубической форме.

Мертвый код как следствие *don't care*. Определим понятие мертвого кода (МК) как множество команд программы, которые не могут быть исполнены ни при каких значениях конъюнкций условий-предикатов. Это может быть только в том случае, если данные конъюнкции тождественно равны нулю. Такие конъюнкции и образуют множества *don't care* и порождают частично-определенные булевы функции. Если они запрограммированы в явном виде, то операторы программы, заданные только через них, никогда не будут исполняться. Иными словами, мертвый код всегда есть следствие *don't care*.

Такие конъюнкции могут быть заданы на уровне булевых переменных в виде явных тавтологий, например, $a \vee \bar{a}$ и $\bar{a}\bar{a}$, или в виде избыточных выражений, например, $a \vee ab$, $a \vee \bar{a}b$ и т.п. Указанная избыточность может быть следствием ошибок при программировании условий, например при настройке стандартных шаблонов, и если это ошибка, а не умысел, то она должна быть устранена путем минимизации логических выражений. Заметим, что для настраиваемых шаблонов *don't care* может быть только вычислено и указано, в противном случае теряется сам смысл шаблонов как стандартного и апробированного решения.

Если же *don't care* запрограммировано сознательно в виде артефакта, то порождаемые операторы образуют закладки. Эти закладки не могут быть обнаружены через тестовые эксперименты по полной декларации, т.е. декларации, содержащей декларированные и недеklarированные возможности программы. В этом и состоит принципиальное различие между мертвым кодом и НДВ.

Мертвый код может быть в неявном виде задан при программировании отношений-неравенств, в этом случае необходимо осуществлять поиск *don't care* через решение систем неравенств. Для простоты рассмотрения приведем примеры мертвого кода в виде условных выражений над булевыми переменными. Пусть заданы условные выражения, реализующие операторы S_1 и S_2 , которые могут быть операторами присваивания, перехода, обращения к процедурам или, в общем случае, любыми, в свою очередь, составными операторами, модулями или блоками. Итак, пусть заданы два условных выражения:

$$\text{if } (a\bar{a}) \text{ then } S_1 \text{ else } S_2 \text{ и } \text{if } (a \vee \bar{a}) \text{ then } S_1 \text{ else } S_2.$$

В первом выражении никогда не будет исполняться оператор S_1 , а во втором — оператор S_2 . Операторы S_1 и S_2 в данном контексте могут рассматриваться как специально сделанные закладки. Конъюнкции, тождественно равные нулю, показаны на рис. 3 в виде функций управления z_i на булевых графах, реализующих приведенное выше условное выражение.

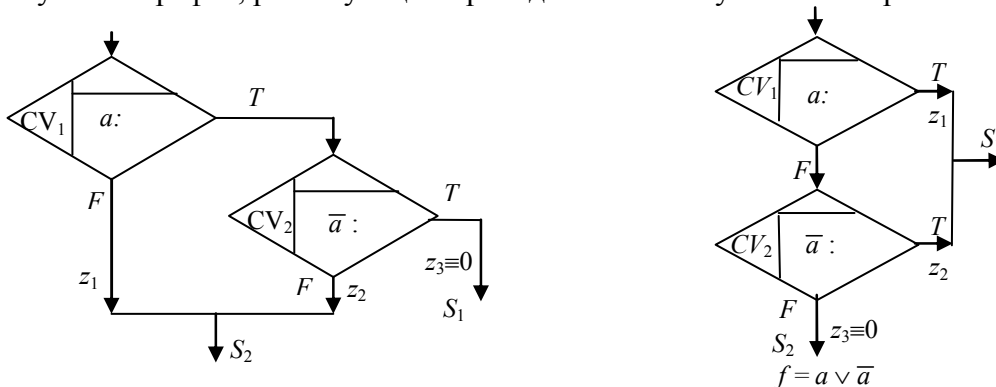


Рис. 3

Заключение. Наличие в вычислительном процессе, порождаемом программой при интерпретации ее команд процессором, недеklarированных возможностей или мертвого кода несет в себе явную (НДВ) или неявную (МК) угрозу безопасности программному продукту.

Эта угроза может быть реализована, например, в виде компьютерного вируса. Поэтому поиск и верификация НДВ и МК является основной задачей в области защиты информации. Решение этой задачи конструктивно может быть найдено путем построения графоаналитической модели или, в частном случае, построения булева графа для функции управления вычислительным процессом. Для сокращения размерности задачи поиска НДВ и МК вычислительный процесс на графоаналитической модели следует разбивать на параллельные структуры SR. Такое разбиение позволяет локализовать поиск и верификацию НДВ и МК в рамках отдельно взятой параллельной структуры и не рассматривать все множество реализованных в программе условий-предикатов совместно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Немолочнов О. Ф., Зыков А. Г., Поляков В. И. Комплексные кубические покрытия и графоаналитические модели как средство описания вычислительных процессов программ // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. „Интеллектуальные системы“ (AIS'06) и „Интеллектуальные САПР“ (CAD-2006). М.: Физматлит, 2006. Т. 2.
2. Модель и примитивы покрытий вершин циклических вычислительных процессов / О. Ф. Немолочнов, А. Г. Зыков, Л. Г. Осовецкий, В. И. Поляков // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 8. С. 18—23.
3. Немолочнов О. Ф., Зыков А. Г., Поляков В. И. Кубические покрытия логических условий вычислительных процессов программ // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2004. № 14. С. 225—233.
4. Руководящий документ Гостехкомиссии России „Защита от несанкционированного доступа к информации. Часть 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия недеklarированных возможностей“. Введ. 04.06.1999 г.
5. Тестирование логических неисправностей вычислительных процессов в программах / О. Ф. Немолочнов, А. Г. Зыков, Л. Г. Осовецкий, В. И. Поляков, К. В. Петров // Информационные технологии. 2007. № 12. С. 2—5.
6. Кондаков Н. И. Логический словарь. М.: Наука. 1971. 656 с.

Сведения об авторах

Олег Фомич Немолочнов

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики; E-mail: nof@ipmi.ifmo.ru

Леонид Георгиевич Осовецкий

— д-р техн. наук, профессор; Центральный научно-исследовательский институт связи, Санкт-Петербург; E-mail: leoned.osovetsky@gmail.com

Рекомендована кафедрой информатики и прикладной математики НИУ ИТМО

Поступила в редакцию 01.07.13 г.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 664.7:681.268

В. С. АФОНИН, Д. Е. КРИВОБОКОВ

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ РАСХОДА СЫПУЧЕГО ВЕЩЕСТВА

Рассматривается способ установления зависимости параметров выходного сигнала емкостного первичного измерительного преобразователя от плотности потока зерна с помощью нейросетевых технологий. Приведены методика и результаты экспериментов.

Ключевые слова: измерение расхода, зерно, первичный емкостный преобразователь, нейросетевые технологии.

В различных отраслях промышленности технологические процессы связаны с перемещением сыпучих материалов различной природы. Для обеспечения учета и дозирования сыпучих веществ используются приборы контроля расхода материалов — расходомеры. На территории Алтайского края наиболее актуальной является задача контроля зерна, в частности организация системы создания цифровых карт, позволяющих вывести зависимость урожайности сельхозугодий от агрохимических показателей почвы [1]. Для организации такой измерительной системы необходимы надежные датчики, работающие в условиях засоренности и запыленности и при высоком уровне вибраций зерноуборочных машин. В этой связи бесконтактные расходомеры имеют некоторые преимущества по сравнению контактными: при их использовании не нарушается структура потока сыпучего вещества и отсутствует необходимость замены датчиков при их изнашивании [2].

Расход сыпучего вещества — количество вещества, проходящего через сечение в единицу времени, определяется путем измерения объемной концентрации и скорости движения материала в трубопроводе [3, 4], причем для определения данных параметров используются различные методы.

Для определения объемной концентрации диэлектрика в трубопроводе часто применяется емкостный метод, а для измерения скорости используется какой-либо другой метод, например эффект Доплера. Однако, как показали эксперименты, емкостный преобразователь может быть использован непосредственно для определения расхода сыпучего вещества. Известно, что частицы твердого вещества, проходя через электрический преобразователь, вызывают изменение его емкости [3]. Спектральные параметры электрического тока, вызванного этими процессами, определяются скоростью движения, электрическими свойствами и размером частиц вещества. Так как электрический ток есть результат наложения отдельных токов каждой частицы, то его частотные характеристики связаны с количеством частиц вещества, прошедших через емкостный преобразователь в единицу времени, т.е. с расходом вещества.

В настоящей статье представлены результаты исследований по установлению зависимости частотных параметров выходного сигнала емкостного преобразователя от величины расхода сыпучего материала, проходящего через него.

В ходе исследований был проведен ряд экспериментов, в которых через емкостный датчик пропускать сыпучее вещество — зерна пшеницы. Созданная для этой цели экспериментальная установка (рис. 1) состоит из измерительного конденсатора (датчика), к электродам которого подключено генерируемое источником питания постоянное напряжение; преобразователя тока в напряжение, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и персонального компьютера для цифровой обработки сигнала. При цифроаналоговом преобразовании частота дискретизации выбиралась с учетом спектра исходного сигнала.

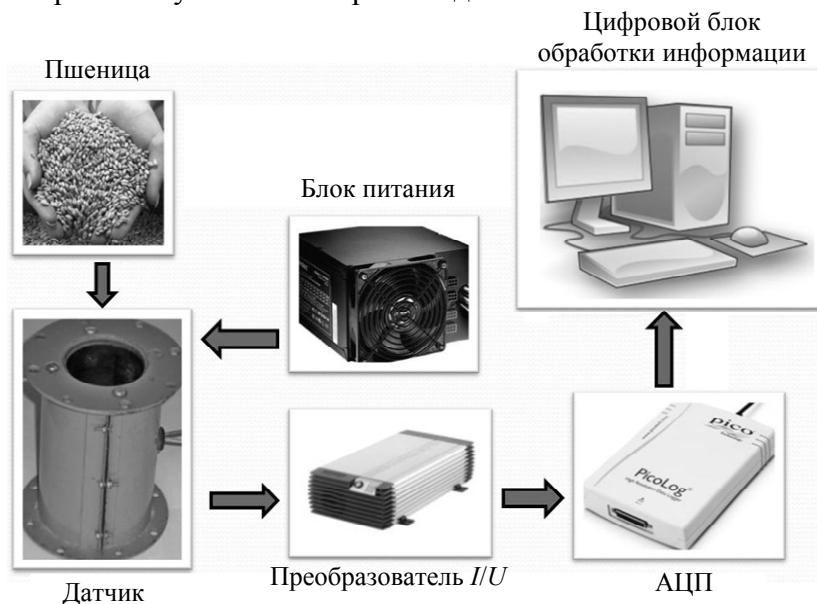


Рис. 1

Задачу формирования потока вещества с заданной величиной расхода можно упростить за счет создания идентичных условий проведения эксперимента: во-первых, вещество засыпают в трубопровод с одинаковой высотой, что позволяет не учитывать скорость потока; во-вторых, используют пшеницу с одинаковым гранулометрическим составом и с неизменными значениями влажности. Таким образом, в дальнейшем можно установить прямо пропорциональную зависимость коэффициента заполнения трубопровода веществом от плотности потока этого вещества.

Вариативность коэффициента заполнения трубопровода сыпучим материалом достигается за счет применения воронок с различными площадями сечений выходных отверстий. Среднее значение расхода вещества (q_m) при использовании каждой воронки определялось экспериментально путем измерения времени прохождения через нее заданной массы зерна. Ниже представлены результаты измерений для каждой из восьми воронок.

Номер воронки	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
$q_m, \text{ г/с}$	15	25	33	38	51	71	80	101

При определении зависимости выходного сигнала емкостного первичного преобразователя от плотности потока зерна, проходящего через него, было установлено, что для всех измеряемых параметров коэффициент корреляции составляет примерно 0,5—0,6, что не позволяет говорить о функциональной зависимости между исследуемыми величинами.

Поскольку на спектральные характеристики выходного сигнала емкостного преобразователя влияет множество факторов (неоднородность потока, его распределение по объему датчика, размер зерен и т.п.), перспективным решением представляется использование боль-

шего количества параметров информационного сигнала для определения величины расхода. Такими параметрами могут быть амплитудные значения гармоник сигнала.

Для учета большого количества спектральных параметров информационного сигнала предлагается использовать нейросетевые системы, способные „подстраиваться“ (обучаться) под функциональную зависимость между экспериментально полученными входными и выходными сигналами. Для формирования обучающей и тестовой выборок с использованием калиброванных воронок обеспечивалось прохождение через емкостный датчик потоков вещества с заданными значениями расхода. Для каждого потока непрерывный сигнал датчика разбивался на фрагменты в 512 значений для дальнейшего анализа. Информационный сигнал для каждого потока сохранялся в виде одномерного массива значений напряжений с фиксированным временным интервалом. Таким образом, размер массива соответствует частоте дискретизации сигнала и времени анализа. При формировании обучающей выборки для каждого потока проводилось по 50 экспериментов. Общий объем обучающей выборки, включая сигнал датчика при отсутствии вещества, составил 450 фрагментов. Тестовая выборка составлялась для каждого потока по 10 фрагментам, не входящим в состав обучающей выборки.

Обучающая и тестовая выборки представляют собой совокупность элементов, каждый из которых содержит набор гармоник сигнала (спектральные образы), соответствующего каждому фрагменту. Для построения спектрального образа используется преобразование Фурье. Таким образом, входными сигналами нейросети являются амплитуды гармоник. В результате нейросеть имеет 255 входов, на каждый из которых подается сигнал, пропорциональный амплитуде соответствующей гармоники, и один выход, принимающий значение плотности потока.

Для разработки и обучения нейросети использовалась программа NeuroShell, являющаяся достаточно мощным инструментом и позволяющая оценить применимость различных архитектур и структур интеллектуальных систем. В качестве возможных рассматривались и оценивались следующие нейросети: сеть метода группового учета аргументов, сеть с различными передаточными функциями, сеть с обходными соединениями, рекурсивная сеть с обратной отрицательной связью, классическая слоистая однонаправленная сеть — сеть стандартного соединения. После обучения на обучающих выборках сети тестировались с помощью тестовой выборки. По результатам тестирования установлено, что наименьшую ошибку преобразования обеспечивает слоистая однонаправленная нейросеть, имеющая два скрытых слоя по 200 нейронов в каждом.

Результат работы выбранной нейросети, представленный значениями средних абсолютных ошибок измерения величин расходов зерна, приведен на рис. 2.

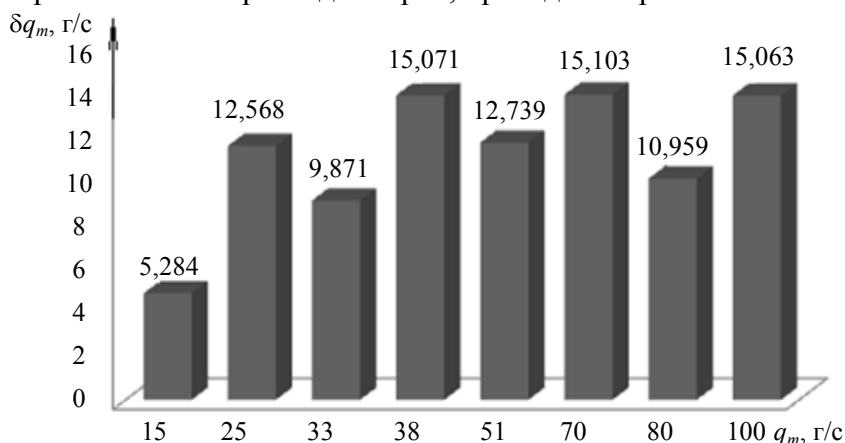


Рис. 2

Применение нейросетей для обработки сигнала первичного емкостного преобразователя не позволяет получить аналитическую зависимость. Однако результаты, представленные на рис. 2, указывают на то, что такая зависимость существует, а предложенный метод описания

и обработки сигнала емкостного преобразователя достаточно информативен. Поэтому можно предположить, что в ходе дальнейших исследований распределения амплитуд сигнала по гармоникам будет установлена функциональная зависимость, использование которой позволит определить оптимальные параметры первичного емкостного преобразователя и формирования потока зерна, а также оценить влияние дестабилизирующих факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвинцев П. А., Афонин В. С. Система картографирования урожайности с помощью навигатора GPS // Ползуновский альманах. 2011. № 1. С. 100—101.
2. Arakaki C. et al. Non intrusive mass flow measurements // POSTEC Newsletter. 2006. N 23. P. 15—16.
3. Афонин В. С., Хомутов О. И. Метод измерения расхода сыпучего материала и его экспериментальная проверка // Ползуновский вестник. 2011. № 3/1. С. 94—97.
4. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. Л.: Машиностроение, 1989.

Сведения об авторах

Вячеслав Сергеевич Афонин

— канд. техн. наук, доцент; Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, кафедра информационных технологий, Барнаул; E-mail: afonin@mail.altstu.ru

Дмитрий Евгеньевич Кривобоков

— канд. техн. наук, доцент; Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, кафедра информационных технологий, Барнаул; E-mail: dmitriikrivobokov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
информационных технологий

Поступила в редакцию
26.05.13 г.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 520.2.03; 520.2.062

А. В. ДЕМИН, Л. М. МЕНДЕЛЕЕВА

АЛГОРИТМ ЮСТИРОВКИ СОСТАВНЫХ ЗЕРКАЛ ВЫСОКОАПЕРТУРНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

Рассмотрены особенности юстировки составных зеркал высокоапертурных телескопов. Предложены математическая модель и алгоритм процесса юстировки зеркал методом компарирования.

Ключевые слова: высокоапертурный телескоп, главное зеркало, апертура, волновой фронт, нормаль, вектор, позиционирование, компаратор, алгоритм, модель.

На современном этапе развития космических технологий одним из перспективных направлений является создание многозональных высокоапертурных зеркально-линзовых телескопов, обеспечивающих сбор и обработку информации в диапазоне спектра излучения от ультрафиолетового до инфракрасного, что позволяет расширить границы астрофизических исследований и повысить информационные возможности космических систем дистанционного зондирования поверхности Земли.

Одна из проблем создания высокоапертурных телескопов — уменьшение значения показателя m_S (масса на единицу площади) — может быть решена при конструкторско-технологической реализации главного зеркала как основного массогабаритного компонента телескопа. В настоящее время технологии изготовления облегченных зеркал достаточно развиты, однако на практике создание зеркал диаметром более 2,5 м с приемлемым значением m_S проблематично. В этой связи наиболее перспективным путем решения данной проблемы является создание составных зеркал, состоящих из зеркальных сегментов, что, в частности, отражено в работах [1—4].

Основные проблемы при создании составных зеркал (СЗ) связаны с разработкой методов и средств их сборки и обеспечением требуемого качества изображения в процессе эксплуатации зеркала в составе телескопа.

Позиционирование зеркальных сегментов (ЗС) на базовой поверхности составного зеркала в соответствии с оптическим расчетом осуществляется в два этапа — геометрическое и опtotехническое позиционирование, реализуемое с помощью управляемых активаторов (пьезопривода). Геометрическое позиционирование зеркальных сегментов осуществляется путем их перемещения по трем линейным направлениям (вдоль оптической оси и в плоскости, перпендикулярной ей): тем самым обеспечивается решение задачи минимизации амплитудных искажений. Опtotехническое позиционирование ЗС осуществляется в трех угловых направлениях относительно вершины сегмента (два наклона относительно оптической оси и поворот вокруг нее): тем самым обеспечивается решение задачи минимизации фазовых искажений.

Таким образом, решение задачи минимизации амплитудно-фазовых искажений волнового фронта, создаваемых составным зеркалом $\{i_{Pi}\}_{i=1}^N$ по отношению к оптическому расчету для эталона $\{i_{Ri}\}_{i=1}^N$, обеспечивается при выполнении следующих условий:

$$\left. \begin{aligned} & \left\{ \left\{ \mathbf{R}_i^X \cdot \mathbf{R}_i^Y - L_{RiXY} = 0 \right\}_{i=1}^N ; \left\{ \mathbf{R}_i^X \times \mathbf{R}_i^Y = \mathbf{R}_i^Z \right\}_{i=1}^N ; \right. \\ & \left. \left\{ \left\{ \mathbf{P}_i^X \cdot \mathbf{P}_i^Y - L_{PiXY} = 0 \right\}_{i=1}^N ; \left\{ \mathbf{P}_i^X \times \mathbf{P}_i^Y = \mathbf{P}_i^Z \right\}_{i=1}^N ; \right. \right. \\ & \left. \left. \left\{ \left\{ \mathbf{R}_i^X \times \mathbf{P}_i^X = 0 \right\}_{i=1}^N ; \left\{ \mathbf{R}_i^Y \times \mathbf{P}_i^Y = 0 \right\}_{i=1}^N ; \left\{ \mathbf{R}_i^Z \times \mathbf{P}_i^Z = 0 \right\}_{i=1}^N ; \right. \right. \\ & \left. \left. \left\{ \left| \mathbf{R}_i^X \right| = \left| \mathbf{P}_i^X \right| \right\} ; \left\{ \left| \mathbf{R}_i^Y \right| = \left| \mathbf{P}_i^Y \right| \right\} ; \left\{ \left| \mathbf{R}_i^Z \right| = \left| \mathbf{P}_i^Z \right| \right\} ; \right. \\ & \left. \left\{ W_{Ri} = -n' \int_{\sin u'_{R0i}}^{\sin u'_{0i}} \delta g'_{R0i} d(\sin u'_{R0i}) \right\}_{i=1}^N - \left\{ W_{Pi} = -n' \int_{\sin u'_{P0i}}^{\sin u'_{0i}} \delta g'_{P0i} d(\sin u'_{P0i}) \right\}_{i=1}^N \right\} = \min, \quad (1a) \end{aligned}$$

где символы R_i и P_i означают принадлежность к расчетному i_R -му и позиционируемому i_P -му зеркальным сегментам; N — число зеркальных сегментов; \mathbf{R}_i^X , \mathbf{R}_i^Y , \mathbf{R}_i^Z и \mathbf{P}_i^X , \mathbf{P}_i^Y , \mathbf{P}_i^Z — тройки векторов, определяющие положение зеркальных сегментов; L_{RiXY} и L_{PiXY} — отстояние вершин i_R -го и i_P -го ЗС от точек отсчета на базовой поверхности СЗ; $\{W_{Ri}\}_{i=1}^N$ и $\{W_{Pi}\}_{i=1}^N$ — волновой фронт (в данном случае используется понятие волновой aberrации i_R -го и i_P -го ЗС и соответствующая формула, приведенная в работе [5]); $\{u'_{Ri}\}_{i=1}^N$ и $\{u'_{Pi}\}_{i=1}^N$ — апертурные углы i_R -го и i_P -го ЗС, $\{g_{Ri}\}_{i=1}^N$ и $\{g_{Pi}\}_{i=1}^N$ — поперечные aberrации этих сегментов, здесь индекс „0“ обозначает принадлежность к сфере сравнения; штрихами обозначено отношение символа к задней апертуре (пространству изображения); n' — показатель преломления составного зеркала.

Система уравнений (1) определяет условия ортогональности троек векторов (1a) и минимизации разности волновых aberrаций (1б) i_R -го и i_P -го ЗС при изготовлении сегментов в пределах допусков: $\{\delta(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^N$.

Введем систему координат XYZ , начало которой совпадает с вершиной $\{F_i(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^N$ составного зеркала, при этом ось OZ совпадает с его оптической осью. Положение каждого ЗС можно определить касательной плоскостью и нормалью к его вершине относительно системы координат $\{X_i, Y_i, Z_i\}_{i=1}^N$ в соответствии с уравнениями [6]

$$\left(\frac{\partial F_i}{\partial x_i} \right)_{0i} (x_i - x_{0i}) + \left(\frac{\partial F_i}{\partial y_i} \right)_{0i} (y_i - y_{0i}) + \left(\frac{\partial F_i}{\partial z_i} \right)_{0i} (z_i - z_{0i}) = 0; \quad (2a)$$

$$\frac{x_i - x_{0i}}{\left(\frac{\partial F_i}{\partial x_i} \right)_{0i}} = \frac{y_i - y_{0i}}{\left(\frac{\partial F_i}{\partial y_i} \right)_{0i}} = \frac{z_i - z_{0i}}{\left(\frac{\partial F_i}{\partial z_i} \right)_{0i}}, \quad (2б)$$

где $\left(\frac{\partial F_i}{\partial x_i}\right)_{0i}$, $\left(\frac{\partial F_i}{\partial y_i}\right)_{0i}$, $\left(\frac{\partial F_i}{\partial z_i}\right)_{0i}$ — частные производные функции $F(x,y,z)$ в точке $M_{0i} = (x_{0i}; y_{0i}; z_{0i})$; $(x_i; y_i; z_i)$ и $(x_{0i}; y_{0i}; z_{0i})$ — координаты поверхности i -го сегмента.

Применение современных информационных и компьютерных технологий в оптике, несомненно, обеспечивает более высокую производительность по сравнению с аппаратными средствами, используемыми при сборке. В этой связи представим процесс позиционирования каждого зеркального сегмента на базовой поверхности (БП) как реализацию метода компарирования. Рассмотрим функцию реального компаратора, которую выполняет компьютер с двумя экранами — виртуальный компаратор. На первом экране отображена виртуальная модель составного зеркала, выполняющая роль меры сравнения (эталона): $\left\{R_i(x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri}, \rho_{0Ri}, e_{Ri}^2) = 0\right\}_{i=1}^N$ — поверхности, „разбитой“ на N зеркальных сегментов $\{i_{Ri}\}_{i=1}^N$, параметры которых, включая и координаты вершин, определены в соответствии с оптическим расчетом. На втором экране виртуального компаратора — объект-модель $\left\{P_i(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi}, \rho_{0Pi}, e_{Pi}^2) = 0\right\}_{i=1}^N$ — отображение текущего положения позиционируемых сегментов $\{i_{Pi}\}_{i=1}^N$ на БП, само перемещение их осуществляется активаторами. Здесь ρ_{0Ri} и ρ_{0Pi} — радиусы кривизны при вершинах i_R -го и i_P -го ЗС; e_{Ri}^2 и e_{Pi}^2 — квадраты эксцентриситета их образующих поверхностей.

Условием правильной сборки составного зеркала, помимо выполнения соотношений (1), является обеспечение соответствия качества изображения расчету, что достигается максимально возможным совпадением объекта-модели и расчетной (эталонной) модели, а именно $\{i_{Pi}\}_{i=1}^N$ и $\{i_{Ri}\}_{i=1}^N$:

$$\left\{R_i(x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri}, \rho_{0Ri}, e_{Ri}^2) = 0\right\}_{i=1}^N \cup \left\{P_i(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi}, \rho_{0Pi}, e_{Pi}^2) = 0\right\}_{i=1}^N = \max. \quad (3)$$

Алгоритм позиционирования зеркальных сегментов на базовой поверхности составного зеркала можно определить как последовательность действий, производимых с i_P -м ЗС относительно i_R -го.

Шаг 1. Формирование виртуального компаратора и базы исходных данных:

$$\begin{aligned} & \left\{R_i(x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri}, \rho_{0Ri}, e_{Ri}^2) = 0\right\}_{i=1}^N; \\ & \left\{\mathbf{R}_i^X \cdot \mathbf{R}_i^Y - L_{RiXY} = 0\right\}_{i=1}^N; \\ & \left\{\mathbf{R}_i^X \times \mathbf{R}_i^Y = \mathbf{R}_i^Z\right\}_{i=1}^N; \\ & \left\{x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri}, \rho_{0Ri}, e_{Ri}^2\right\}; \\ & \left\{W_{Ri} = -n' \int_{\sin u'_{R0i}}^{\sin u'_{0i}} \delta g'_{R0i} d(\sin u_{R0i}^i)\right\}_{i=1}^N, \end{aligned}$$

а именно:

— эталона — изображения базовой поверхности составного зеркала, состоящей из N зеркальных сегментов $\{i_{Ri}\}_{i=1}^N$ в соответствии с оптическим расчетом на телескоп;

— базы данных, формируемой относительно пространственного положения зеркальных сегментов эталона на базовой поверхности, — N троек векторов, определяющих касательные плоскости и нормали зеркальных сегментов эталона в соответствии с оптическим расчетом на телескоп.

Шаг 2. Формирование объекта-модели — начальное положение:

$$\begin{aligned} & \left\{ P_i(x_{P_i}, y_{P_i}, z_{P_i}, \rho_{0P_i}, e_{P_i}^2) = 0 \right\}_{i=1}^N; \\ & \left\{ \mathbf{P}_i^X \cdot \mathbf{P}_i^Y - L_{PiXY} = 0 \right\}_{i=1}^N; \\ & \left\{ \mathbf{P}_i^X \times \mathbf{P}_i^Y = \mathbf{P}_i^Z \right\}_{i=1}^N, \\ & \left\{ x_{P_i}, y_{P_i}, z_{P_i}, \rho_{0P_i}, e_{P_i}^2 \right\}. \end{aligned}$$

Шаг 3. Выбор опции „геометрическое позиционирование“ и назначение траектории „обхода“ сегментов.

Шаг 4. Выбор первого геометрически позиционируемого зеркального сегмента объекта-модели и его аналога на эталоне, определение их троек векторов: представление касательной плоскости и нормали тройкой векторов, положения которых определены параметрами измерительных датчиков позиционируемого сегмента для 1_P -го ЗС, и ввод расчетных данных 1_R -го ЗС эталона:

$$\begin{aligned} & \left\{ x_{P_1}, y_{P_1}, z_{P_1}, \rho_{0P_1}, e_{P_1}^2 \right\}, \\ & \left\{ \mathbf{P}_1^X; \mathbf{P}_1^Y; \mathbf{P}_1^Z; L_{P_1XY} \right\}; \\ & \left\{ x_{R_1}, y_{R_1}, z_{R_1}, \rho_{0R_1}, e_{R_1}^2 \right\}, \\ & \left\{ \mathbf{R}_1^X; \mathbf{R}_1^Y; \mathbf{R}_1^Z; L_{R_1XY} \right\}. \end{aligned}$$

Шаг 5. Покоординатное сравнение тройки векторов для 1_P -го ЗС объекта-модели с тройкой векторов для соответствующего 1_R -го ЗС эталона (в соответствии с шагами 1 и 3):

$$\left. \begin{aligned} & P_1(x_{P_1}, y_{P_1}, z_{P_1}, \rho_{0P_1}, e_{P_1}^2) = 0; \\ & \mathbf{P}_1^X \cdot \mathbf{P}_1^Y - L_{P_1XY} = 0; \\ & \mathbf{P}_1^X \times \mathbf{P}_1^Y = \mathbf{P}_1^Z; \end{aligned} \right\} \vee \left. \begin{aligned} & R_1(x_{R_1}, y_{R_1}, z_{R_1}, \rho_{0R_1}, e_{R_1}^2) = 0; \\ & \mathbf{R}_1^X \cdot \mathbf{R}_1^Y - L_{R_1XY} = 0; \\ & \mathbf{R}_1^X \times \mathbf{R}_1^Y = \mathbf{R}_1^Z. \end{aligned} \right\}$$

Шаг 6. При соблюдении условий, регламентируемых шагами 1 и 3, „закрепление“ 1_P -го ЗС на БП и переход ко второму позиционируемому зеркальному сегменту объекта-модели. Если шаги 1 и 3 не выполнены, то переход к шагу 3 и повтор действий относительно 1_P -го ЗС.

Шаг 7. Выполнение действий, аналогичных шагам 3, 4 и 5 относительно $(N - 1)$ троек векторов для геометрически позиционируемых ЗС на базовой поверхности составного зеркала.

Шаг 8. Завершение этапа геометрического позиционирования N зеркальных сегментов на базовой поверхности в соответствии с оптическим расчетом на телескоп и переход к этапу оптотехнического позиционирования.

Шаг 9. Выбор первого оптически позиционируемого зеркального сегмента объекта-модели и введение в компьютер параметров волнового фронта (или волновой аберрации) в соответствии с показаниями датчика волнового фронта:

$$W_{P1} = -n' \int_{\sin u'_{P01}}^{\sin u'_{01}} \delta g'_{P01} d(\sin u'_{P01}).$$

Шаг 10. Сравнение значений W_{P1} и W_{R1} , т.е. выполнение операции

$$\left\{ W_{R1} = -n' \int_{\sin u'_{R01}}^{\sin u'_{01}} \delta g'_{R01} d(\sin u'_{R01}) \right\} - \left\{ W_{P1} = -n' \int_{\sin u'_{P01}}^{\sin u'_{01}} \delta g'_{P01} d(\sin u'_{P01}) \right\} = \Delta W_1,$$

$$\Delta W_1 \vee \delta W_1.$$

Шаг 11. Если $\Delta W_1 \leq \delta W_1$, то переход ко второму сегменту. Если $\Delta W_1 > \delta W_1$, то посредством последовательных угловых подвижек 1-го сегмента обеспечение выполнения требований по качеству изображения.

Шаг 12. Повторение шагов 8, 9 и 10 относительно $(N - 1)$ позиционируемых сегментов.

Шаг 13. Оценка качества изображения, формируемого составным зеркалом:

$$\left\{ W_R = -n' \int_{\sin u'_{R0}}^{\sin u'_{0}} \delta g'_{R0} d(\sin u'_{R0}) \right\} - \left\{ W_P = -n' \int_{\sin u'_{P0}}^{\sin u'_{0}} \delta g'_{P0} d(\sin u'_{P0}) \right\} = \Delta W,$$

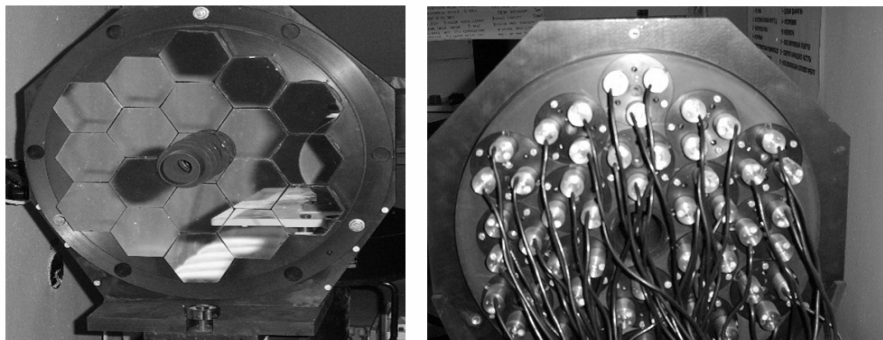
$$\Delta W \vee \delta W.$$

Шаг 14. Если $\Delta W \leq \delta W$, то процесс сборки составного зеркала завершен; если $\Delta W > \delta W$, то переход к интерферометрическим измерениям, т.е. определение положения q_P -го ЗС, для чего требуется дополнительная коррекция.

Шаг 15. Дополнительная коррекция q_P -го ЗС.

Шаг 16. Завершение геометрического и оптического позиционирования.

Алгоритм геометрического позиционирования был реализован на составном зеркале со световым диаметром 0,5 м с 20 управляемыми гексагональными зеркальными сегментами (разработка канд. техн. наук А. Г. Серегина). Макет зеркала приведен на рисунке. При геометрическом позиционировании в течение 1 ч удалось установить 20 зеркал с погрешностью не более 0,01 мм. Аналогичная работа с применением автоколлиматора потребовала 10 ч. Следует отметить, что юстировка составного зеркала диаметром 10,4 м (площадью 73 м²) для телескопа Gran Telescopio CANARIAS длилась около года [7].



Предложенный алгоритм юстировки составных зеркал высокоапертурных телескопов, в основу которого положен метод компарирования, позволяет решить задачу создания зеркал со световым диаметром более 3 м, что, в свою очередь, позволяет обеспечить автономное поддержание качества составных зеркал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лахтиков В. Б., Серегин А. Г.* Оценка оптимальной конфигурации разреженной апертуры для составного главного зеркала адаптивного телескопа // Оптич. журн. 1997. Т. 64, № 3. С. 127—128.
2. The James Webb Space Telescope [Электронный ресурс]: <<http://www.jwst.nasa.gov/>>.
3. *Parkinson C. L.* Aqua: An Earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables // IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41 (2). P. 173—183.
4. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md.20771 [Электронный ресурс]: <<http://aqua.nasa.gov/>>.
5. *Слюсарев Г. Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969.
6. *Александров П. С.* Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М.: Наука, 1979. 512 с.
7. <http://www.gtc.iac.es>.

Сведения об авторах

- Анатолий Владимирович Демин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-цифровых систем и технологий; заведующий кафедрой; E-mail: dav_60@mail.ru
- Лилия Михайловна Менделеева** — магистр; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-цифровых систем и технологий; E-mail: mendeleevalm@gmail.com

Рекомендована кафедрой
оптико-цифровых систем и технологий

Поступила в редакцию
18.07.13 г.

УДК 535.32

В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ, А. М. ГОЛУБЕВ

МОДЕРНИЗАЦИЯ РЕФРАКТОМЕТРА АББЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ТОЧНОСТИ

Рассматривается усовершенствованный на основе метода выделения контуров рефрактометр Аббе, позволяющий сделать четкой границу разделения темной и светлой областей поля в окуляре прибора. Для теоретического обоснования повышения точности измерения показателя преломления использован метод Монте-Карло.

Ключевые слова: показатель преломления, рефрактометр Аббе, точность измерений, имитационное моделирование, метод Монте-Карло.

Введение. Одним из перспективных направлений развития технологий приборостроения является компьютеризация традиционных лабораторных приборов, что позволяет расширить возможности улучшения качества исследований и повышения точности измерений [1].

Рефрактометры Пульфриха и Аббе, основанные на явлении полного внутреннего отражения на границе эталонной призмы и рабочей среды, позволяют измерить показатель преломления с необходимой для практических целей точностью. При этом рефрактометр Пульфриха обладает более высокой точностью (10^{-5}) по сравнению с рефрактометром Аббе. Рефрактометр Аббе является прибором, скорее, для массового контроля оптических материалов в целях исключения грубых ошибок при их подборе.

В традиционном серийном рефрактометре Аббе граница между темной и светлой областями поля окулярного изображения размыта, что затрудняет измерение реального угла выхода лучей и, как следствие, определение показателя преломления исследуемого образца, внося дополнительную погрешность. Задача модернизации прибора заключается в компьютерной трансформации окулярного изображения в целях существенного повышения резкости границы между светлой и темной частями изображения, что дает возможность повысить как точность наведения на границу, так и точность измерительных отсчетов не менее чем на порядок. Достижение данного результата позволяет отнести модернизированный рефрактометр Аббе к новому классу приборов повышенной точности, соизмеримой с точностными параметрами интерферометра Пульфриха при сохранении таких достоинств рефрактометра Аббе, как конструктивная и эксплуатационная простота, экономичность и оперативность.

В настоящей статье рассматривается принцип модернизации рефрактометра Аббе, а также методика проведения измерений. Показана возможность увеличения точности измерений за счет компьютерной обработки изображения, наблюдаемого в окуляре. На основе методов имитационного моделирования (метода Монте-Карло) теоретически обосновано повышение точности измерений.

Модернизация рефрактометра Аббе. Передача изображения, наблюдаемого в окуляре рефрактометра, на компьютер осуществляется при помощи фотокамеры, позволяющей представить изображение в цифровом виде. Для выполнения этой задачи необходимо создать конструкцию, которая позволит закрепить объектив цифровой камеры на окуляре рефрактометра. Данная конструкция должна быть рассчитана в соответствии с диаметром оправы окуляра и диаметром оправы объектива.

Возьмем за основу рефрактометр ИРФ-22 и фотоаппарат Nikon P5000, конструктивные характеристики которых представлены ниже.

Диаметр	
окуляра $d_{ок}$, мм	26
объектива $D_{об}$, мм	32
Длина объектива $L_{об}$, мм	22
Диаметр резьбы объектива $D_{р.об}$, мм	44
Длина резьбы	
окуляра $h_{ок}$, мм	4
объектива $H_{об}$, мм	4
Шаг резьбы	
окуляра, мм	0,5
объектива, мм	1

На основе этих данных выполнена модель насадки окуляра (рис. 1). Для исключения вибраций при съемке и улучшения качества изображения фотоаппарат фиксируется при помощи насадки.

После установки фотоаппарата можно приступить к съемке изображения, наблюдаемого в окуляре рефрактометра. Съемку можно проводить как в ручном, так и в автоматическом режиме. На полученных снимках граница между темной и светлой областями поля размыта, что затрудняет измерения и вносит дополнительную погрешность (рис. 2).

Для устранения данной погрешности необходимо произвести обработку полученных снимков на компьютере, выделив четкую границу, разделяющую темную и светлую области, как контур. Для этой цели применим метод выделения контура, используемый для обработки интерферограмм [1].

На рис. 3, *а*, *б* приведены графики распределения интенсивности изображения (I) на участке поля, содержащем границу: до выделения контура (*а*) график представляет собой градиент, после (*б*) — импульс.

Данный метод позволяет определить более точно угол выхода лучей за счет уменьшения ширины границы между темной и светлой областями, что видно при сравнении снимка до и после обработки (рис. 4). Так, ширина границы до выделения контура (W) примерно в 10 раз превышает ширину границы после выделения контура (W').

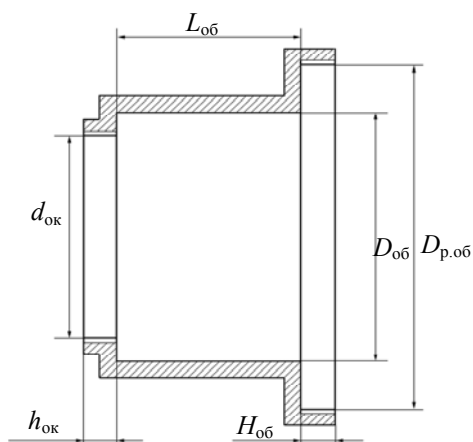


Рис. 1

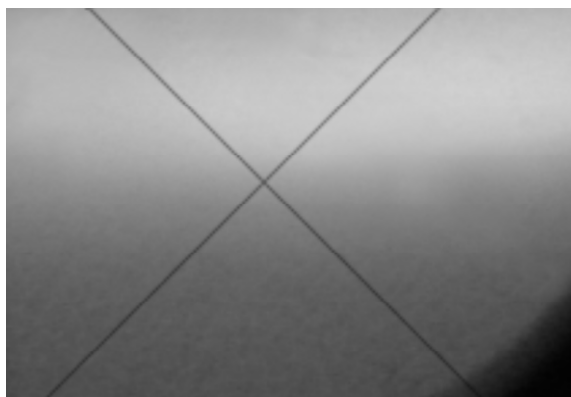


Рис. 2

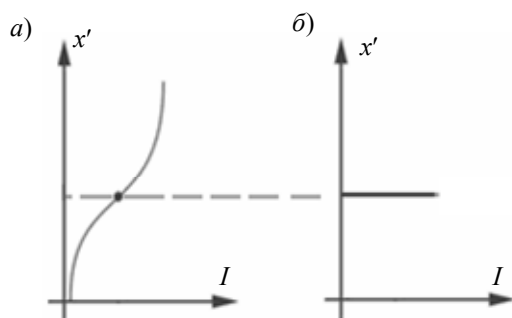


Рис. 3

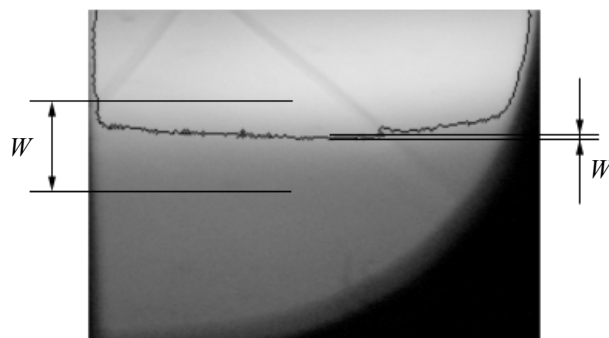


Рис. 4

Таким образом, применение метода выделения контура позволяет увеличить точность проводимых рефрактометром измерений на один порядок, что и было изначальной целью.

Теоретическое обоснование повышения точности измерений. Модернизация рефрактометра Аббе, путем оснащения его цифровой фотокамерой, не ограничивается только конструктивной реализацией.

На практике при измерениях показателя преломления рефрактометром Аббе за результат принимают среднее арифметическое значение нескольких измерений (например, 5—10). Модернизированный рефрактометр Аббе, в котором при обработке изображения применяется метод выделения контура, позволяет добиться четкого разделения темной и светлой областей поля линией контура. Это ведет к снижению погрешности при наводке и, как следствие, к повышению точности измерений показателя преломления.

Во всех отраслях науки и техники в последнее время широкое распространение получили методы имитационного моделирования (статистических испытаний) [2, 3]. Основываясь на этих методах, попытаемся обосновать предположение о том, что используемый в модернизированном рефрактометре Аббе метод выделения контура позволяет повысить точность измерений показателя преломления.

Методика модельного эксперимента. Сравнительный анализ точности измерения показателя преломления серийным рефрактометром Аббе (прибор 1) и модернизированным (прибор 2) выполнялся с помощью ряда модельных экспериментов по измерению показателя пре-

ломления дистиллированной воды n_v (табличное значение показателя преломления 1,33291 при 20 °С).

Прибор 1 позволяет производить измерения с погрешностью $2 \cdot 10^{-4}$. В соответствии со статистическим правилом трех сигм (3σ) можно утверждать, что $3\sigma_1 = 2 \cdot 10^{-4}$, следовательно, $\sigma_1 = 6,6 \cdot 10^{-5}$. Генерируя случайные числа по закону нормального распределения с параметрами $\mu = 1,33291$ и $\sigma_1 = 6,6 \cdot 10^{-5}$, получаем моделируемые результаты измерений.

Прибор 2 за счет использования метода выделения контура позволяет производить измерения с точностью на порядок более высокой: $3\sigma_2 = 2 \cdot 10^{-5}$, поэтому будем генерировать случайные числа по закону нормального распределения с параметрами $\mu = 1,33291$ и $\sigma_2 = 6,6 \cdot 10^{-6}$. Ограничимся проведением 1000 независимых модельных экспериментов для каждого прибора.

Подставив параметры μ и σ в формулу закона нормального распределения, получим

$$f(x) = \frac{1}{6,6 \cdot 10^{-5} \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-1,33291)^2}{2 \cdot 6,6 \cdot 10^{-10}}\right\} \text{ и } f(x) = \frac{1}{6,6 \cdot 10^{-6} \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-1,33291)^2}{2 \cdot 6,6 \cdot 10^{-12}}\right\}.$$

Реализация модели производилась с использованием статистических инструментов электронных таблиц MS Excel [4, 5].

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты исследований, выполненных по изложенной методике, представлены в таблице.

Номер эксперимента	n_v — прибор 1		n_v — прибор 2	
	Результат измерения	Среднее для N измерений	Результат измерения	Среднее для N измерений
1	1,3322	1,3322	1,33284	1,33284
2	1,3329	1,33255	1,33285	1,332845
3	1,3344	1,333167	1,33291	1,332867
4	1,3332	1,333175	1,33293	1,332883
...
999	1,3326	1,332921	1,33295	1,332911
1000	1,3328	1,332921	1,33283	1,332911

Анализ результатов показал, что при использовании прибора 1 даже по окончании 1000 модельных экспериментов не удается достичь высокой точности измерений (рис. 5, кривая 1) (достижение такой точности, вообще говоря, представляется сомнительным). Для прибора 2 точность измерений значительно выше (см. рис. 5, кривая 2).

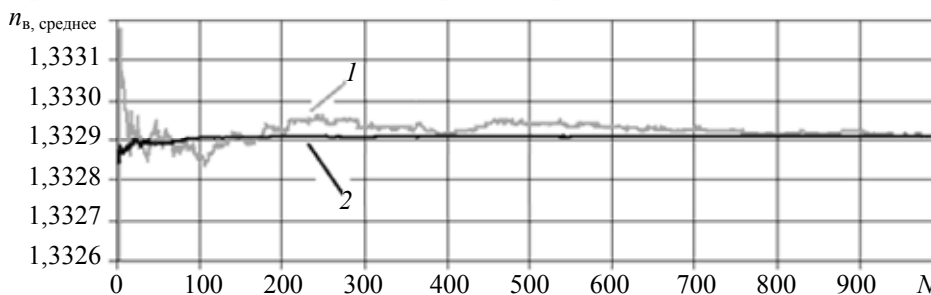


Рис. 5

Для модернизированного рефрактометра Аббе (прибор 2) период стационарности (когда среднее значение практически не изменяется) начинается уже после проведения 200 модельных экспериментов: пять цифр после запятой перестают изменяться. Таким образом, точность измерений, включая пятый знак после запятой, может быть достигнута после 200 реальных (не модельных) экспериментов.

Для серийного рефрактометра Аббе (прибор 1) период стационарности практически не наступил и по окончании 1000 модельных экспериментов (среднее значение сильно колеблется относительно эталонного).

Заключение. В дополнение к изложенному следует отметить, что в качестве регистратора окулярного изображения рефрактометра может использоваться любая фотокамера, имеющая указанные выше параметры. Применение других средств для получения цифрового изображения предполагает изменение параметров насадки окуляра.

Одним из достоинств рассмотренной конструкции является простота ремонта (путем замены ее компонентов).

Модельные эксперименты показали следующее:

— проведения 5—10 измерений прибором 1 недостаточно для определения показателя преломления с точностью до четырех знаков после запятой;

— прибор 2 позволяет повысить точность измерений показателя преломления, исключив погрешность наведения.

Увеличение точности измерений, достигнутое за счет компьютеризации рефрактометра Аббе, позволяет повысить эффективность его использования на производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирилловский В. К. Современные оптические исследования и измерения. СПб: Изд-во „Лань“, 2010.
2. Таха Х. Введение в исследование операций: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. Кн. 2.
3. Лебедев А. Н. и др. Вероятностные методы в инженерных задачах: Справочник. СПб: Энергоатомиздат, 2000.
4. Гельман В. Я. Решение математических задач средствами Excel: Практикум. СПб: Питер, 2003.
5. Гультияев А. К. MATLAB 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows. СПб: Корона-Век, 2001.

Сведения об авторах

Владимир Константинович Кирилловский — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: vkkir@mail.ru

Алексей Михайлович Голубев — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: golubev.ifmo@gmail.com

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
10.09.13 г.

А. С. АНТОНОВ, Г. Г. ИШАНИН

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИОКСИДА АЗОТА**

Рассматривается оптико-электронный газоанализатор для измерения концентрации диоксида азота в автомобильных выбросах, принцип действия которого основан на методе оптической адсорбционной спектроскопии. Приведены технические характеристики источника и приемников оптического излучения разрабатываемого газоанализатора; представлена его оптическая схема и описаны преимущества данной схемы по сравнению с классической.

Ключевые слова: газоанализатор, излучающий диод, фотодиод, метод оптической адсорбционной спектроскопии.

Современные газоанализаторы, используемые для измерения концентрации диоксида азота (NO_2) в составе выхлопных газов автотранспортных средств, имеют ряд недостатков, в частности:

— газоанализаторы, принцип действия которых основан на методе хемиллюминесцентной реакции оксида азота с озоном, должны иметь в своем составе генератор озона и конвертер, обеспечивающий нагрев газа (до $350\text{ }^\circ\text{C}$) для перехода двуокиси азота в оксид азота, — это влечет за собой увеличение погрешности измерения, а также времени измерения и энергопотребления [1];

— газоанализаторы, принцип действия которых основан на использовании электрохимических сенсоров, имеют низкую селективность и требуют периодической корректировки показаний по мере расхода ресурса сенсора (средний срок службы сенсора не более трех лет) [2].

Перечисленные факторы позволяют сделать вывод о необходимости разработки оптико-электронного газоанализатора, обладающего высокой селективностью, быстродействием, низким энергопотреблением, увеличенным ресурсом работы и относительно невысокой стоимостью.

В настоящей статье описывается разрабатываемый газоанализатор диоксида азота, теоретически отвечающий данным требованиям. Принцип его действия основан на методе оптической адсорбционной спектроскопии, который используется для определения изменения интенсивности зондирующего излучения, прошедшего через поглощающую газовую среду. Газовая среда выполняет функцию фильтра, поглощающего излучение источника с определенной длиной волны. Зависимости спектрального показателя поглощения σ различных газов от длины волны λ приведены на рис. 1.

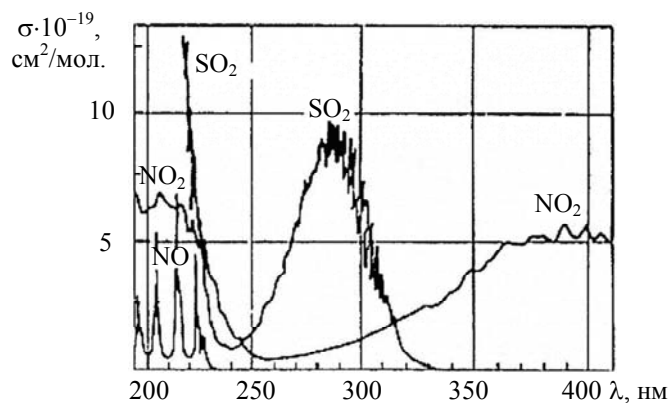


Рис. 1

Анализ рис. 1 показывает, что на длинах волн 350—450 нм наблюдается поглощение излучения только диоксидом азота. На данном участке спектра максимальное поглощение достигается при $\lambda=385$ нм, что следует учитывать при подборе источника излучения.

Метод определения коэффициента пропускания газа основан на законе Бугера — Ламберта — Бера:

$$\tau = \Phi_{\tau} / \Phi_0 = \exp(-\sigma[C]l), \quad (1)$$

где Φ_0 и Φ_{τ} — поток излучения на входе и выходе оптической кюветы, в которой находится поглощающая среда (диоксид азота); l — длина оптического пути поглощения, см; $[C]$ — концентрация диоксида азота в газовой смеси, мол./см³.

В целях корректности последующего изложения приведем оптическую схему классического газоанализатора (рис. 2).

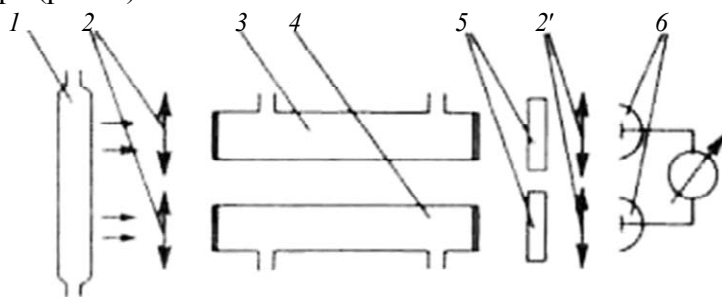


Рис. 2

Зондирующее излучение газоразрядного или теплового источника 1 формируется оптической системой 2 в параллельный пучок, который проходит через рабочую 3 и опорную 4 кюветы. Далее излучение проходит через фильтры 5 и фокусируется оптической системой $2'$ на фотоэлементах 6 или фотоэлектронных умножителях [2].

Рассмотрим теперь оптическую схему разрабатываемого газоанализатора диоксида азота (рис. 3).

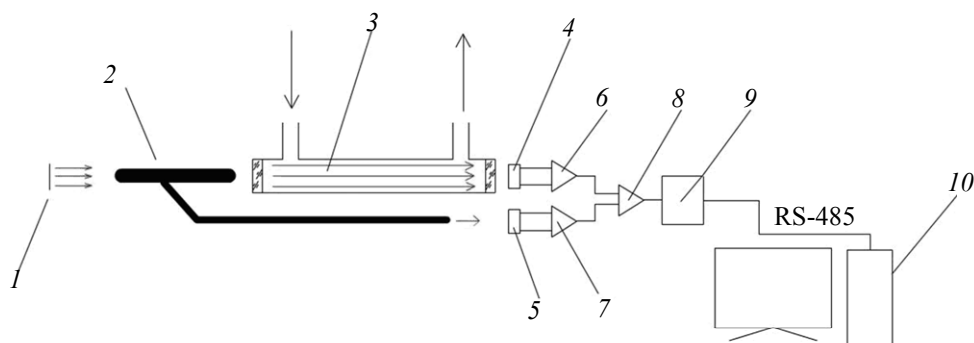


Рис. 3

Газоанализатор функционирует по следующему принципу. Исследуемый газ, после прохождения системы пробоподготовки, где происходит удаление влаги и мелкодисперсных частиц, поступает в кювету 3 . Излучение от источника 1 проходит через волоконно-оптический разветвитель 2 , разделяющий излучение на два потока: первый поток проходит через кювету 3 и попадает на основной приемник оптического излучения 4 , второй поток направляется непосредственно на опорный приемник 5 . Сигналы основного и опорного приемников поступают на усилители 6 и 7 соответственно, откуда попадают на компаратор 8 (AD8476). Далее сигнал передается на контроллер с АЦП 9 , связанный с компьютером 10 при помощи интерфейса RS-485.

В качестве источника применяется излучающий диод (L390-5-15), выбранный в соответствии с максимальным значением спектрального показателя поглощения диоксида азота; длина волны источника 390 ± 2 нм, максимальный поток излучения 9 мВт. Поток модулируется напряжением с частотой в 1000 Гц.

В качестве приемника оптического излучения (ПОИ) выбран фотодиод (PD-440-0/1.4), работающий в диапазоне длин волн 190—570 нм, в диодном режиме, с установленным сопротивлением 50 Ом. Для исключения дрейфа излучения источника применяется второй, аналогичный, приемник оптического излучения (опорный приемник). Зависимость спектральной чувствительности фотодиода (S_λ) от длины волны показана на рис. 4.

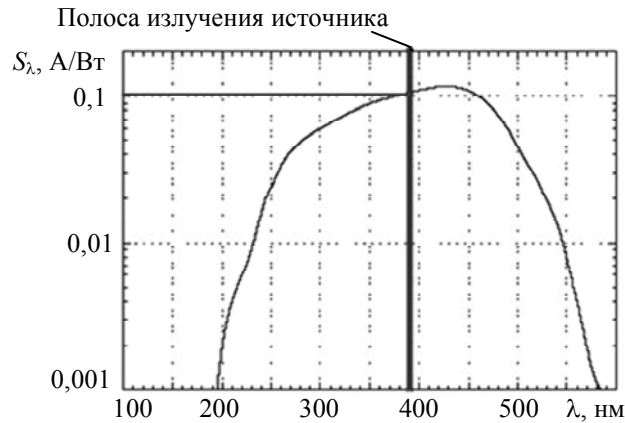


Рис. 4

Диапазон измерения концентрации NO_2 при контроле автотранспортных выбросов составляет от 0 до 5000 ppm. В экспериментальной модели газоанализатора использовалась кювета длиной 15 см. Чтобы проверить, подходит ли данная длина кюветы для измерения малых концентраций NO_2 , воспользуемся выражением (1). Подставив минимальное значение концентрации NO_2 $C=1$ ppm ($4,7 \cdot 10^{+12}$ мол./см³) в формулу (1), при $\sigma=6 \cdot 10^{-19}$ см²/мол. (согласно рис. 1), определим коэффициент пропускания диоксида азота при длине кюветы 15 см:

$$\tau_{\text{NO}_2} = \Phi_\tau / \Phi_0 = \exp(-\sigma[C]l) = \exp(-(6 \cdot 10^{-19}) \cdot 4,7 \cdot 10^{+12} \cdot 15) = 0,9, \quad (2)$$

отсюда коэффициент поглощения диоксида азота $\alpha = 0,1$.

Из выражения (2) следует, что газоанализатор при данной длине кюветы способен анализировать минимальную концентрацию NO_2 .

Подставим значение концентрации газа $C=5000$ ppm ($2,3 \cdot 10^{+16}$ мол./см³) в формулу (1) для проверки динамического диапазона газоанализатора:

$$\tau_{\text{NO}_2} = \Phi_\tau / \Phi_0 = \exp(-\sigma[C]l) = \exp(-(6 \cdot 10^{-19}) \cdot 2,3 \cdot 10^{+16} \cdot 15) = 0,17, \quad (3)$$

тогда коэффициент поглощения $\alpha = 0,83$.

Фототок приемника оптического излучения определяется выражением [3]

$$I_\Phi = \Phi_0 \tau_{o.c} S_\lambda \tau_{\text{NO}_2},$$

где $\tau_{o.c}$ — коэффициент пропускания оптической системы.

Тогда при коэффициенте поглощения $\alpha = 0,1$ ($\tau_{\text{NO}_2} = 0,9$) фототок ПОИ

$$I_\Phi = 0,009 \cdot 0,8 \cdot 0,1 \cdot 0,9 = 0,000648 \text{ А},$$

а при коэффициенте поглощения $\alpha = 0,83$ ($\tau_{\text{NO}_2} = 0,17$) —

$$I_\Phi = 0,009 \cdot 0,8 \cdot 0,1 \cdot 0,17 = 0,0001224 \text{ А}.$$

Таким образом, согласно расчетам длина кюветы полностью удовлетворяет поставленной задаче, так как порог чувствительности выбранного приемника излучения составляет $1,0 \cdot 10^{-12}$ Вт/(Гц^{1/2}·см).

В процессе функционирования газоанализатора интенсивность излучения источника постепенно изменяется, что приводит к недостоверности результатов измерений. Для компенсации дрейфа излучения источника в газоанализаторе применяется схема вычитания, собранная на быстродействующих, малощумящих дифференциальных усилителях 6, 7 и компараторе 8 (см. рис. 3).

Итак, благодаря применению узкополосного источника излучения для выделения требуемой области спектра излучения исключается необходимость применения фильтров или монохроматора. С помощью внедрения волоконно-оптического разветвителя можно излучение источника направлять непосредственно на опорный приемник без применения опорной кюветы. Основной и опорный приемники оптического излучения расположены рядом, в одном блоке, что исключает температурный дрейф одного приемника относительно другого. Весь тракт распространения автомобильных выбросов в газоанализатор надежно защищен от фона, что позволяет не ставить узкополосные фильтры. В связи с использованием излучающего диода вместо газоразрядного источника излучения предложенный оптико-электронный газоанализатор обладает малым энергопотреблением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов И. Л., Аманназаров А., Бескова Г. С. Методы анализа неорганических газов / Под ред. В. М. Немца. СПб: Химия, 1993. 560 с.
2. Алов Н. В. и др. Аналитическая химия и физико-химические методы анализа / Под ред. А. А. Ищенко. СПб: Академия, 2010. Т. 2. 416 с.
3. Ишанин Г. Г., Козлов В. В. Источники оптического излучения. СПб: Политехника, 2009. 415с.

Сведения об авторах

- Александр Сергеевич Антонов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: antsasha@mail.ru
- Геннадий Григорьевич Ишанин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: Ishanin@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
02.10.13 г.

КОНГ ТУ ХУИНЬ, А. М. СКВОРЦОВ, А. А. ПЕТРОВ

ФОРМИРОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ СИСТЕМЫ SiO_2/Si ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА

Рассмотрен процесс формирования микро- и наномасштабных периодических структур на поверхности системы SiO_2/Si под действием наносекундных лазерных импульсов. При облучении экспериментальных образцов получены волнообразные периодические структуры на поверхности. Исследована зависимость топологии поверхности системы SiO_2/Si от плотности энергии лазерного импульса.

Ключевые слова: наносекундный лазер, наноструктурирование, периодические структуры, система SiO_2/Si , оптическая микроскопия, зондовая микроскопия.

Введение. В настоящее время технологии обработки материалов ультракороткими лазерными импульсами широко используются для производства и создания сложных двух- и трехмерных микро- и наноструктур в различных материалах. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, приводящее к образованию различных видов поверхностных структур, таких как рябь [1], волнистый рельеф [2, 3], микро- и наноструктуры [4, 5], широко представлено для полупроводников [1, 3, 5], металлов [4] и изоляторов [6]. Эти поверхностные структуры, как правило, образуются внутри области лазерного пятна и имеют шаг периодичности от сотен нанометров до нескольких микрометров.

Одной из основных структур, играющих важную роль в микроэлектронике, является тонкая пленка двуокиси кремния, выращенная методом термического окисления кремниевой подложки (система SiO_2/Si). При импульсном лазерном воздействии в условиях незначительного превышения порога абляции материала на его поверхности могут быть сформированы периодические структуры [7—10]. Для модификации поверхности используются Nd:YAG-лазеры [9], эксимерные [11] и импульсные CO_2 -лазеры [12], лазеры на Ti:сапфире [13]. Однако структурирование поверхности системы SiO_2/Si под действием импульсов лазера наносекундной длительности исследовано недостаточно.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментов, в которых наблюдалось образование наномасштабных периодических структур на поверхности системы SiO_2/Si при однократном и многократном воздействии пучка излучения наносекундного ArF-лазера с длиной волны 193 нм.

Эксперимент. Схема воздействия на систему SiO_2/Si излучения эксимерного лазера приведена на рис. 1, а, где 1 — лазер; 2 — объектив; 3 — образец; 4 — металлическая подложка; 5 — фокальная плоскость объектива; d — расстояние между фокальной плоскостью объектива и поверхностью образца. В качестве экспериментальных образцов (системы SiO_2/Si) использовались пластины монокристаллического кремния КЭФ-4,5, ориентированные в кристаллографической плоскости (100). На пластинах методом термического окисления

во влажном кислороде был выращен слой SiO_2 толщиной 150 нм. Для обработки образцов использовался импульсный ArF-лазер с длиной волны 193 нм и длительностью импульса 17 нс. Облучение проводилось при плотностях энергии от 0,7 до 2,0 Дж/см². Частота следования импульсов составляла 3 Гц. Излучение лазера было направлено перпендикулярно поверхности, площадь облучаемой области оценивалась по следу, формируемому после одного лазерного импульса, и составляла 1×5 мм². Число импульсов, падающих на поверхность, изменялось в диапазоне от 1 до 10. Модификация поверхности образцов осуществлялась на воздухе при комнатной температуре. Полученные структуры исследовались методами атомно-силовой микроскопии (АСМ). Для АСМ-измерений использовался сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator компании NT-MDT [14].

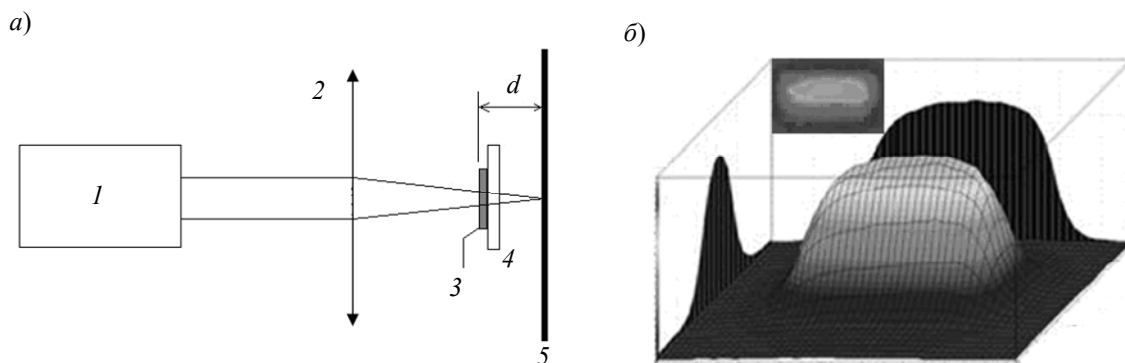


Рис. 1

В процессе облучения распределение мощности в лазерном пучке было существенно неоднородным, так как лазер обладает стандартной прямоугольной в поперечном сечении конфигурацией пучка (рис. 1, б, здесь вставка — фото лазерного пятна на поверхности образца). Как видно из рисунка, вдоль короткой оси распределение гауссово, вдоль длинной — с относительно плоской вершиной и быстрым понижением плотности энергии от вершины к краям. В данной статье показаны результаты АСМ-исследования двух экспериментальных образцов. Для первого образца использовался следующий режим облучения: плотность энергии 0,7 Дж/см², один импульс; для второго образца — плотность энергии 1,32 Дж/см², пять импульсов, частота повторения 3 Гц.

АСМ-исследования проводились в трех различных областях лазерного пятна: на рис. 2 приведена схема расположения областей 1—3 внутри пятна облучения. Плотность энергии понижалась от середины пятна к области 1 и далее — к областям 2 и 3.

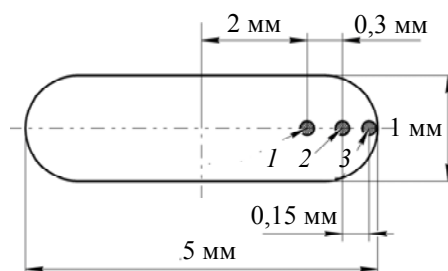


Рис. 2

Анализ результатов исследований. Результаты исследования первого образца (облучение с плотностью мощности 0,7 Дж/см², 1 импульс) приведены на рис. 3. АСМ-анализ поверхности в области 1 показал наличие нанорельефа волнообразной формы с шагом около 40 нм (рис. 3, а). Структуру нанорельефа составляют ряды вертикальных, зауженных кверху колонн высотой 120 нм и диаметром от 30 нм у основания и до 25 нм к вершине (рис. 3, б).

В областях 2 и 3 регулярность топологического рисунка теряется. Для этих областей характерны образования структур в виде „нанопиков“ с большим разбросом размеров по их основанию (от 20 до 100 нм). Следует отметить, что при перемещении кантилевера с области 2 (рис. 3, в, з) на область 3 (рис. 3, д, е) уменьшается плотность „нанопиков“ на единицу площади и уменьшается их средняя высота с 50 до 40 нм.

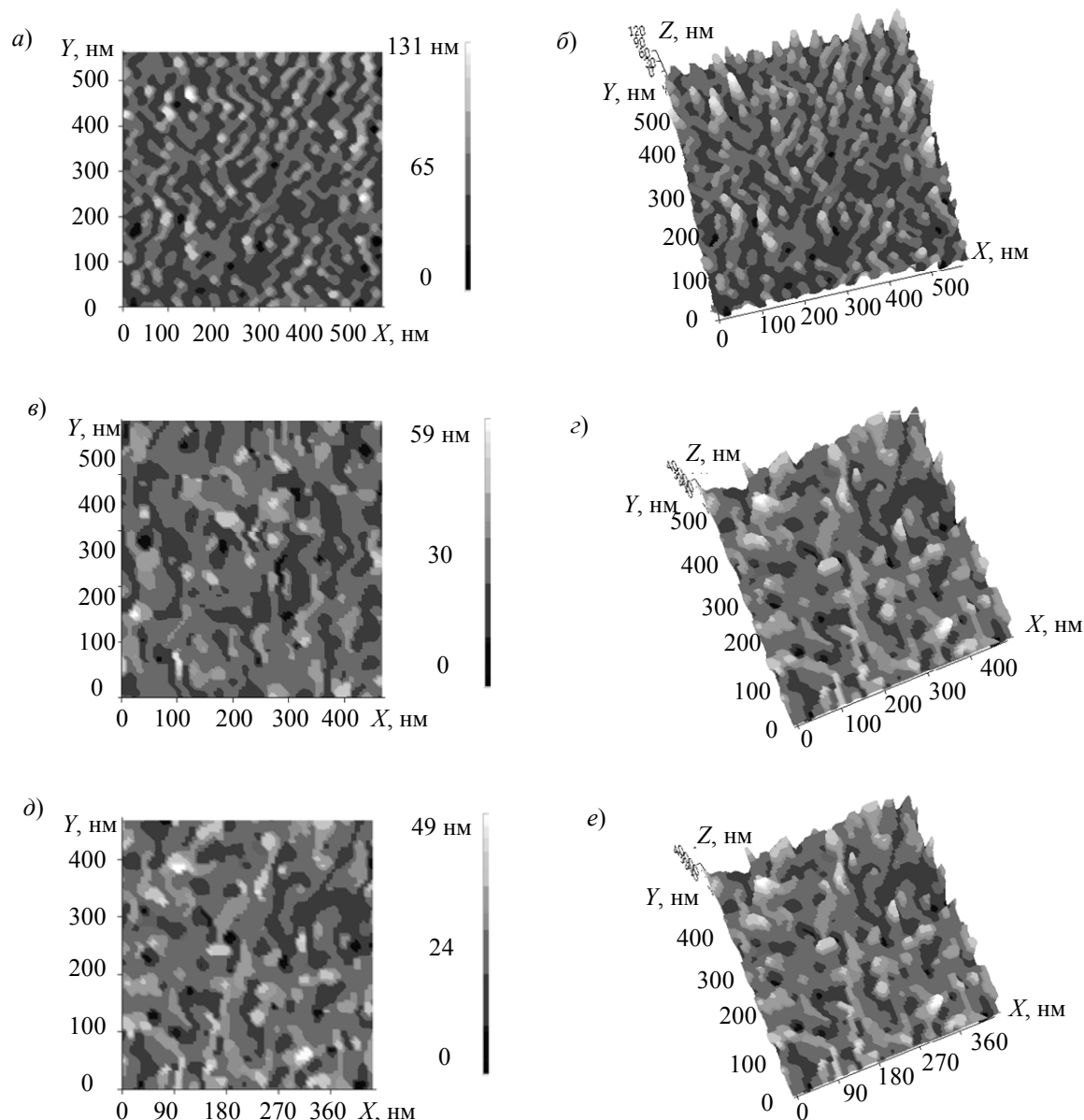


Рис. 3

На рис. 4 приведены результаты исследования второго образца (облучение с плотностью мощности $1,32 \text{ Дж/см}^2$, 5 импульсов, частота следования импульсов 3 Гц). АСМ-анализ поверхности в области 1 показал наличие волнообразных микроструктур, которые имеют шаг периодичности около 3 мкм, высоту 280—300 нм (рис. 4, а, б). Для области 2 характерны образования регулярных периодических структур с шагом около 2 мкм (рис. 4, в, з). Можно отметить, что наряду с уменьшением шага снизилась и высота рельефа до 120—150 нм по сравнению со структурами в области 1. Ближе к внешнему краю пятна облучения (область 3) наблюдаются образования микроструктур в виде „сталагмитов“ (рис. 4, д, е). Размер структур типа „сталагмитов“ неоднороден и колеблется от 0,08 до 2,5 мкм по основанию, а высота рельефа изменяется в пределах 60—90 нм.

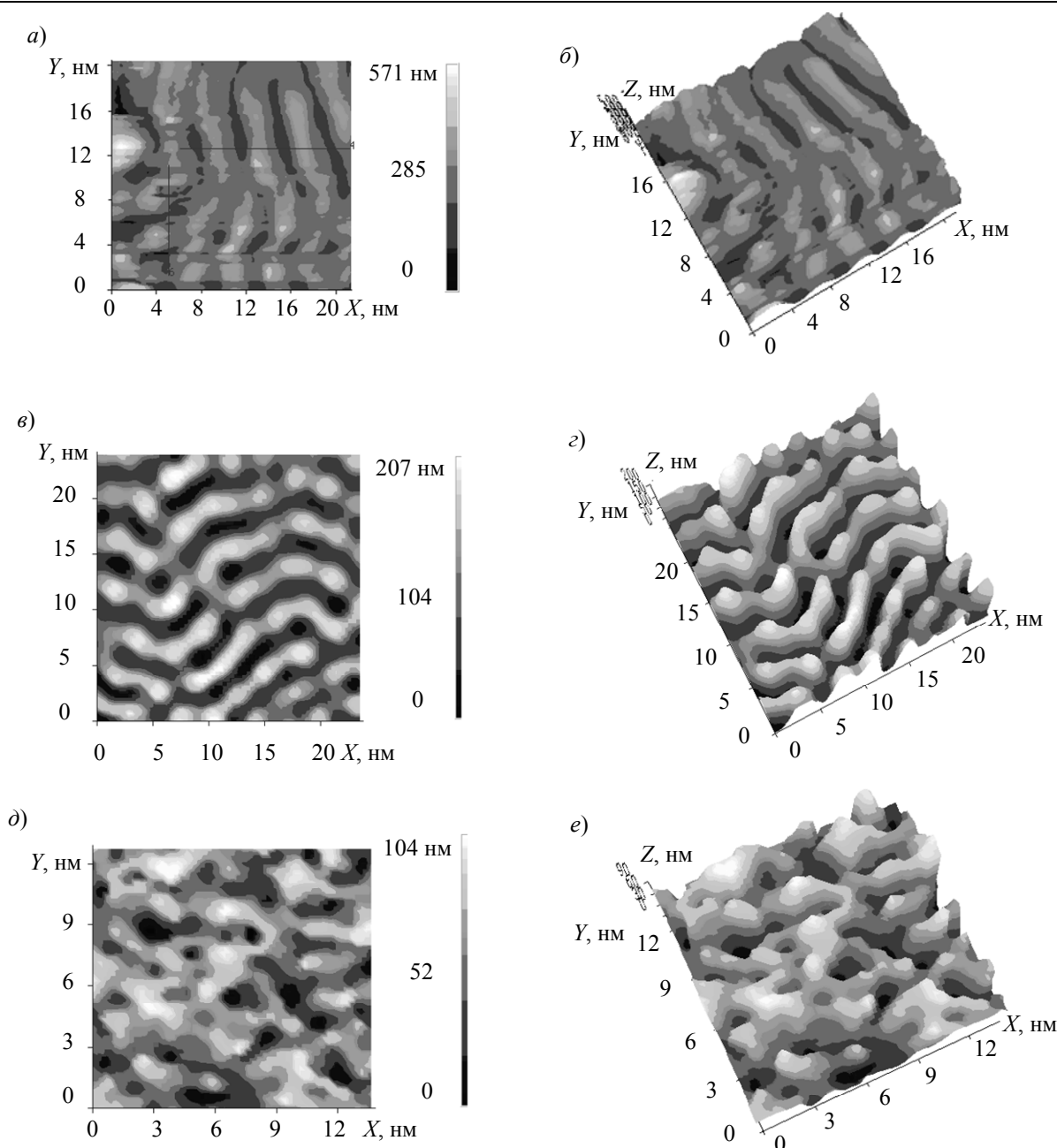


Рис. 4

Заключение. Таким образом, с помощью АСМ исследованы периодические и непериодические наноструктуры на поверхности системы SiO_2/Si , полученные при воздействии АгF-лазерного излучения (193 нм) при числе импульсов $N = 1 \dots 10$. В результате экспериментов получены зависимости топологии микро- и наноструктур от плотности энергии и числа импульсов лазерного излучения. Показано, что, меняя число импульсов и варьируя плотность энергии излучения эксимерного лазера, можно в широких пределах управлять морфологией системы SiO_2/Si .

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 13-02-00033.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borowiec A., Haugen H. K. Subwavelength ripple formation on the surfaces of compound semiconductors irradiated with femtosecond laser pulses // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. P. 4462—4464.

2. *Nayak B. K., Gupta M. C.* Ultrafast laser-induced selforganized conical micro/nano surface structures and their origin // *Optic. Lasers Eng.* 2010. Vol. 48. P. 966—973.
3. *Sava V., Mitran T. L., Socol G., Antohe S.* Silicon surface structuring by XeCl excimer laser irradiation in atmospheric conditions // *Digest J. of Nanomaterials and Biostructures.* 2013. Vol. 8, N 1. P. 61—68.
4. *Nayak B. K., Gupta M. C., Kolasinski K. W.* Formation of nano-textured conical microstructures in titanium metal surface by femtosecond laser irradiation // *Appl. Phys. A.* 2008. Vol. 90. P. 399—402.
5. *Головань Л. А., Джунь И. О., Докукина А. Е., Заботнов С. В., Ежов А. А., Кашикаргов П. К., Маслова Н. Е., Остапенко И. О., Панов В. И., Тимошенко В. Ю.* АСМ-исследования наночастиц, формирующихся при модифицировании поверхности кремния фемтосекундными лазерными импульсами // *Изв. РАН. Сер. физическая.* 2009. Т. 73, № 1. С. 43—45.
6. *Bolle M., Lazare S.* Characterization of submicrometer periodic structures produced on polymer surfaces with low fluence ultraviolet laser radiation // *J. Appl. Phys.* 1993. Vol. 73. P. 3516—3524.
7. *Ursu I., Mihailescu I. N., Popa Al., Prohorov A. M., Ageev V. P., Gorbunov A. A., Konov V. I.* Studies of the change of a metallic surface microrelief as a result of multiple-pulse action of powerful UV laser pulses // *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 58. P. 3909.
8. *Воронов В. В., Долгаев С. И., Лаврищев С. В., Лялин А. А., Смакин А. В., Шафеев Г. А.* Формирование конических микроструктур при импульсном лазерном испарении твердых тел // *Квантовая электроника.* 2000. Т. 30, № 8. С. 710—714.
9. *Nishioka K., Horita S.* Periodic arrays of submicron Si and Ni dots on SiO₂ fabricated using linearly polarized Nd:YAG pulsed laser // *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* 2008. Vol. 91. P. 235—240.
10. *Khramova O. D., Khaydukov E. V., Zuev D. A., Rocheva V. V., Novodvorsky O. A., Poroykov A. Yu., Dvorkin V. V., Panchenko V. Ya., Akhmanov A. S.* Surface modification of crystalline silicon created by the 532 nm nanosecond Nd:YAG laser pulses // *Proc. of the X Intern. Conf. "Laser and Laser-Information Technologies: Fundamental Problems and Applications"*. Plovdiv, Bulgaria, 2010. P. 75—77.
11. *Лапшин К. Э., Обидин А. З., Токарев В. Н., Хомич В. Ю., Шмаков В. А., Ямицков В. А.* Прямое лазерное наноструктурирование поверхности алмазных пленок и керамики нитрида кремния наносекундными импульсами излучения F2-лазера // *Рос. нанотехнологии.* 2007. Т. 2, № 11. С. 50—58.
12. *Trtica M. S., Gakovic B. M.* Pulsed TEA CO₂ laser surface modifications of silicon // *Appl. Surf. Sci.* 2003. Vol. 205, N 1—4. P. 336—342.
13. *Jing-Tao Zhu, Yi-Feng Shen, Wen Li, Xiao Chen et al.* Effect of polarization on femtosecond laser pulses structuring silicon surface // *Appl. Surf. Sci.* 2006. Vol. 252, N 8. P. 2752—2756.
14. NanoEducator модель СЗМУ-Л5. Руководство пользователя [Электронный ресурс]: <http://phys.unn.ru/docs/spm/NE_R.pdf>.

Сведения об авторах

Конг Ту Хуинь

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем; E-mail: Picochip912@yahoo.com

Альберт Матвеевич Скворцов

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем; E-mail: a-skvortsov@yandex.ru

Андрей Анатольевич Петров

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: petrovandrey79@inbox.ru

Рекомендована кафедрой проектирования и безопасности компьютерных систем

Поступила в редакцию 18.04.13 г.

С. В. ЧЕРНЫХ

**ВОЗМОЖНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ
НА ОСНОВЕ ГРАНУЛИРОВАННЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ**

Представлен прогноз о достижимой чувствительности магнитных датчиков на основе гранулированных сверхпроводников, базирующийся на результатах экспериментальных и теоретических исследований процесса проникновения магнитного поля в высокотемпературный сверхпроводник состава $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

Ключевые слова: гранулированные сверхпроводники, магнитные датчики, чувствительность.

Введение. Понимание процесса проникновения магнитного поля в гранулированные сверхпроводники (высокотемпературную керамику) крайне важно для создания новых и совершенствования существующих датчиков измерителей слабых магнитных полей. Этот вопрос изучался во многих работах, однако он так и остается до конца не исследованным. Сравнительный анализ известных публикаций показывает, что в этой области существуют вопросы, требующие дополнительных исследований.

Так, в работе [1] утверждается, что глубина проникновения переменного (72 Гц) магнитного поля в образец высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) составляет около 0,5 мм, при этом в исследованиях „использовался миниатюрный датчик Холла с размерами рабочей области 50×50 мкм и толщиной 180 мкм“. В работе [2] говорится, что глубина проникновения переменного (100—150 МГц) магнитного поля в образец ВТСП составляет около $2 \cdot 10^{-3}$ мм, ВТСП-материалы, облученные быстрыми нейтронами реактора, исследовались методом высокочастотного поглощения. В этих работах изучались ВТСП состава $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

Предположим, что глубина проникновения переменного магнитного поля зависит от частоты по какому-либо закону. Однако в работе [1] приводится утверждение о независимости „градиента потока индукции в образцах“ от частоты в диапазоне 5—500 Гц. В работе [3] также сообщается о независимости магнитного отклика ВТСП-образца $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ от частоты в диапазоне от 60 Гц до 1 МГц и, возможно (на основе теоретических изысканий), до 10 ГГц. Таким образом, глубина проникновения переменного магнитного поля в образец ВТСП на частоте 72 Гц отличается от глубины проникновения на частоте 100—150 МГц в 250 раз, но поток переменного магнитного поля в образце ВТСП от частоты не зависит. На основе $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ изготавливаются датчики измерителей слабых магнитных полей. Достигнутая чувствительность таких измерителей составляет $2 \cdot 10^{-7}$ Э/ $\sqrt{\text{Гц}}$ [4, 5]. В литературе не приводятся оценки возможной предельной чувствительности таких датчиков (именно датчиков, но не самих измерителей). Хотя авторы работы [5] утверждают, что, оптимизируя параметры как самого измерителя, так и его датчика, можно добиться чувствительности измерителя $\sim 10^{-8}$ Э/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и выше, но никакого обоснования заявленной величины они не приводят.

Вопрос о взаимосвязи глубины проникновения переменного магнитного поля в образец ВТСП и чувствительности магнитных датчиков из таких же ВТСП рассматривается в настоящей статье. На основе сравнения результатов экспериментальных и теоретических исследований магнитных свойств ВТСП-керамики формируется модель гранулированного сверхпроводника, используемая для прогнозирования предельно достижимой чувствительности датчиков магнитного поля. Исследования проводились на ВТСП состава $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, изготовленных методом твердофазного синтеза.

Методика измерений и результаты эксперимента. Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из генератора синусоидального напряжения (Γ), управляемого им источника тока (ИТ), датчика (Д) и селективного вольтметра (В). Датчик представляет собой две обмотки (токовую и сигнальную), одна поверх другой, на цилиндрическом образце (Ц) ВТСП-керамики. На токовую обмотку подается сигнал от источника тока, а сигнальная обмотка подключается к вольтметру. Исследования проводились на различных образцах, имеющих форму цилиндра диаметром 9 мм и высотой 15 мм. Обмотки выполнены из провода ПЭВ-0,1 по 111 витков каждая, длина каждой 15 мм.

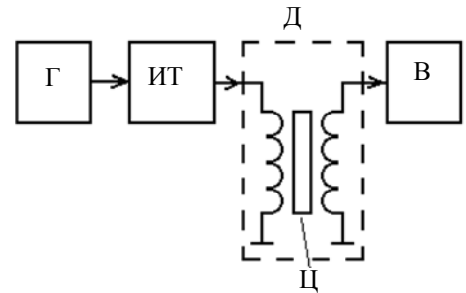


Рис. 1

Внешнее магнитное поле — суперпозиция постоянной H_0 и переменной $h_0 \cos(\omega t + \psi)$ составляющих — направлено вдоль оси цилиндрического образца. Постоянная составляющая H_0 задавалась внешней катушкой (на рис. 1 не указана), в которую вставлялся датчик.

Была исследована зависимость амплитуды отклика ВТСП-образца на внешнее магнитное поле от его параметров H_0 и h_0 . Отклик образца измерялся на частоте (f) внешнего гармонического магнитного поля, равной 2 кГц. На рис. 2, а представлена зависимость амплитуды сигнала U^* , снимаемого селективным вольтметром с катушки датчика, от внешнего постоянного магнитного поля H_0 при частоте внешнего гармонического воздействия $f = 2$ кГц: кривая 1 соответствует $h_0 = 2,17$ Э; 2 — $h_0 = 11,3$ Э; 3 — $h_0 = 18,3$ Э. Образец ВТСП в датчике приводился в сверхпроводящее состояние (замораживался) при $H_0 = 0$, затем значение H_0 увеличивалось до +15 Э, после чего образец приводился в нормальное состояние (размораживался). Далее он снова замораживался при $H_0 = 0$ и значение H_0 снижалось до -15 Э. Характер зависимости $U^*(H_0)$ не изменялся при изменении частоты f от 60 Гц до 2 кГц. На рис. 2, б представлена зависимость $U^*(h_0)$ при $f = 2$ кГц и $H_0 = 0$.

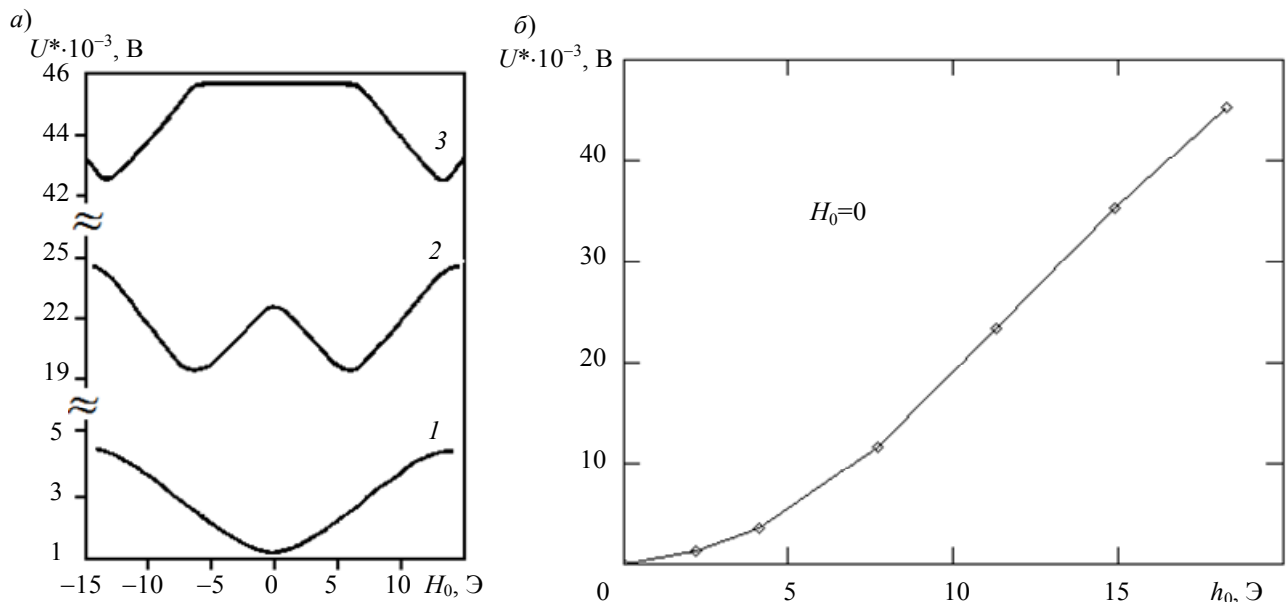


Рис. 2

Теоретические исследования. В ходе теоретических исследований предполагалось, что цилиндрический образец из ВТСП-керамики может быть представлен как система сверхпроводящих колец, которые расположены одно под другим, и каждое из колец содержит только один джозефсоновский переход. Данное предположение позволяет использовать выражение [6]

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{\Phi_e}{\Phi_0} + \sum_{n=1}^{\infty} M_n(\beta_e) \sin\left(2\pi n \frac{\Phi_e}{\Phi_0}\right), \quad (1)$$

которое определяет зависимость полного (эффективного) магнитного потока Φ от внешнего потока Φ_e для сверхпроводящего кольца с включенным в него джозефсоновским контактом. Здесь Φ_0 — квант магнитного потока; коэффициенты $M_n(\beta_e)$ определяются через функции Бесселя первого рода $J_n(x)$: $M_n(\beta_e) = (-1)^n J_n(n\beta_e)/(n\pi)$, $0 \leq \beta_e < 1$, $\beta_e = 2\pi LI_1/\Phi_0$, где I_1 — максимальный джозефсоновский ток (т.е. максимальное значение сверхтока), который может протекать по кольцу для поддержания постоянного значения флюксоида, L — индуктивность кольца. Поток через кольцо при этом не квантуется [6].

Пусть

$$\Phi_e = \Phi_d + \Phi_a \sin(\omega t), \quad (2)$$

где Φ_d — постоянный во времени магнитный поток, Φ_a — амплитуда переменного во времени магнитного потока.

Так как в эксперименте вольтметром измерялась ЭДС в сигнальной обмотке, то можно записать $E = -N(d\Phi/dt)$, где N — число витков в сигнальной обмотке. Поскольку в эксперименте отклик ВТСП-образца измерялся на частоте внешнего гармонического магнитного поля, подставим выражение (2) в формулу (1) и затем, выделив гармоническую составляющую с частотой ω и проинтегрировав ее по времени, в результате получим

$$E = -N \frac{d}{dt} \left(\frac{\Phi}{\Phi_0} \right)_{\omega} = - \left[\frac{\Phi_a}{\Phi_0} + \sum_{n=1}^{\infty} M_n(\beta_e) \cos\left(2\pi n \frac{\Phi_d}{\Phi_0}\right) 2J_1\left(2\pi n \frac{\Phi_a}{\Phi_0}\right) \right] N \omega \cos(\omega t), \quad (3)$$

откуда

$$E_{\omega} = - \left[\frac{\Phi_a}{\Phi_0} + \sum_{n=1}^{\infty} M_n(\beta_e) \cos\left(2\pi n \frac{\Phi_d}{\Phi_0}\right) 2J_1\left(2\pi n \frac{\Phi_a}{\Phi_0}\right) \right].$$

Результаты теоретических исследований в виде зависимостей $E_{\omega}(\Phi_d/\Phi_0)$ и $E_{\omega}(\Phi_a/\Phi_0)$ показаны на рис. 3, а и б соответственно, при $\beta_e = 0,85$ и $n=20$.

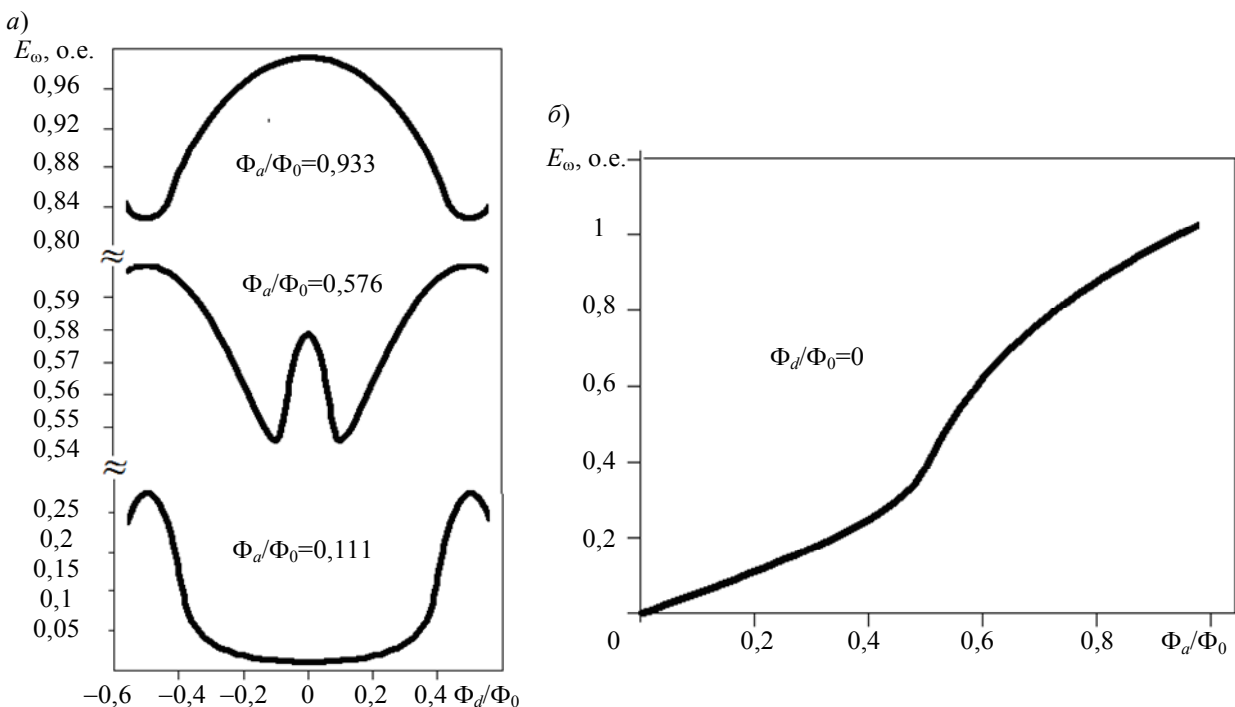


Рис. 3

Обсуждение результатов. Сравнительный анализ рис. 2, а и 3, а показывает хорошую сходимость зависимостей $U^*(H_0)$ и $E_\omega(\Phi_d/\Phi_0)$. Отметим также пропорциональность величин h_0 и Φ_a в этих зависимостях. Действительно,

$$\frac{11,3 \text{ Э}}{2,17 \text{ Э}} \approx \frac{0,576}{0,111} \approx 5,2 \text{ и } \frac{18,3 \text{ Э}}{2,17 \text{ Э}} \approx \frac{0,933}{0,111} \approx 8,4.$$

Сравнивая рис. 2, б и 3, б, видим, что зависимости $U^*(h_0)$ и $E_\omega(\Phi_a/\Phi_0)$ также похожи. Таким образом, свойства гранулированного сверхпроводника можно, в какой-то степени, объяснить свойствами сверхпроводящего кольца с джозефсоновским контактом.

Сформируем модель гранулированного сверхпроводника цилиндрической формы. Будем основываться на представлении керамического образца в виде набора сверхпроводящих гранул, соединенных слабыми связями. Известно, что материал гранул обладает свойствами сверхпроводника второго рода, магнитное поле в который проникает в виде абрикосовских вихрей. Средний размер l гранул совпадает с физическими размерами кристаллитов, не превышающими, как правило, 10 мкм [1]. Это позволяет выполнить условие $l \gg \lambda$, где λ — лондоновская глубина проникновения поля в гранулы, составляющая при $T = 77 \text{ К}$ величину порядка 10^{-5} см [1]. Хотя между крупными гранулами имеются пустоты или области, заполненные мелкими кристаллитами размером $l < \lambda$, будем считать число их пренебрежимо малым. Первое критическое поле гранулы H_{c1} составляет 50—100 Э при $T = 77 \text{ К}$ [1, 7].

Поскольку сверхпроводящие гранулы соединены слабыми связями, магнитное поле $H_{ex} < H_{c1}$ проникает от края цилиндра к его центру по джозефсоновским переходам. На рис. 4 приведено схематическое изображение фрагмента цилиндрического ВТСП-образца (вид сверху) с возможным расположением в нем гранул, которое будем считать более вероятным. Здесь уместно напомнить, что, согласно технологии твердофазного синтеза, в процессе пресования цилиндрического образца гранулы вероятнее всего должны расположиться так, как представлено на рис. 4. Как следует из этого рисунка, глубина проникновения магнитного поля в ВТСП-образец не может быть больше, чем средний размер l гранул.

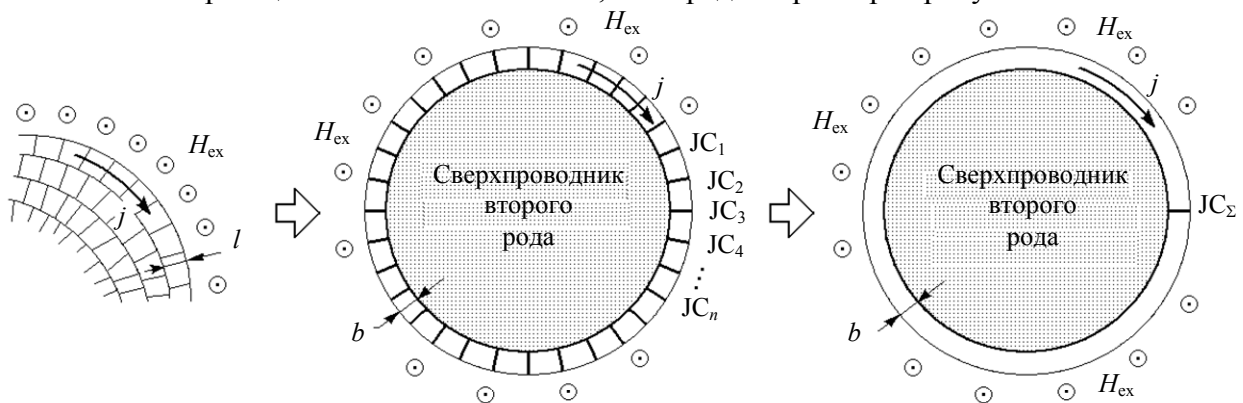


Рис. 4

Внутри керамического образца протекает экранирующий (мейсснеровский) ток j . Предположим, что ток j протекает по сверхпроводящему кольцу шириной b , равной среднему размеру l гранул, со множеством джозефсоновских переходов $JC_1 \dots JC_n$ (см. рис. 4). Данное кольцо „как бы надето“ на сверхпроводник второго рода (выделен на рисунке штриховкой) с $H_{c1} = 50 \dots 100 \text{ Э}$ при $T = 77 \text{ К}$. Можно предположить, что ток j протекает по такому же кольцу, но с одним переходом JC_Σ , сопротивление R_Σ которого равно сумме сопротивлений переходов $JC_1 \dots JC_n$. Таким образом, цилиндр из ВТСП-керамики будет представлять собой систему из таких сверхпроводящих колец с переходами JC_Σ , расположенных одно под другим.

В защиту такого представления гранулированного сверхпроводника можно привести следующие данные и расчеты. Сравнение рис. 2, б и 3, б показывает, что квант магнитного потока проникает в джозефсоновский переход при внешнем гармоническом магнитном поле $h_0 \approx 18$ Э. Это согласуется с результатами работы [2], где экспериментально измеренное значение нижнего критического джозефсоновского поля H_{c1j} (когда внутрь образца проникает магнитный поток в виде джозефсоновских вихрей) составляет 16 Э. Тогда ширину кольца можно найти по формуле $b = \Phi_0 / (h_0 d)$, где $\Phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-7}$ Гс·см²; $d = 2\lambda + t = 2,025 \cdot 10^{-5}$ см — толщина области контакта, в которую проникает магнитное поле; $t = 2,5 \cdot 10^{-7}$ см — толщина изоляционной прослойки джозефсоновского перехода. В результате получим $b \approx 5,7 \cdot 10^{-4}$ см, что совпадает с размером l сверхпроводящих гранул, указанным в работе [1].

Оценка чувствительности магнитных датчиков. Принцип устройства магнитных датчиков на основе гранулированных сверхпроводников подробно рассмотрен, например, в работах [4, 5]. Главным элементом таких датчиков является цилиндрический сердечник из ВТСП состава $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ с обмотками, подключаемый к измерителю слабых магнитных полей (измерительной системе).

Весьма важно оценить уровень шумового потока рассматриваемого датчика в рабочих условиях, так как он определяет минимально обнаружимый внешний поток. Под термином „шум“ в данном случае понимается наличие беспорядочных колебаний магнитного потока (шумовой поток).

Для расчетов используем выражение, представляющее собой так называемый классический предел минимально обнаружимого магнитного потока для одноконтактного низкотемпературного ($T = 4,2$ К) сверхпроводящего квантового интерферометра (СКВИД — Superconducting Quantum Interference Device) [6]:

$$(\delta\Phi)_{\text{class}} = \langle \delta\Phi_N^2 \rangle^{1/2} = L \left(\frac{4k_B T \delta\nu}{R} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где $\langle \delta\Phi_N^2 \rangle$ — среднеквадратическое значение шумового потока; R — нормальное сопротивление слабой связи; $\delta\nu = \delta\omega / (2\pi)$ — полоса частот; k_B — постоянная Больцмана.

Для типичных значений $L = 10^{-10}$ Гн, $R = 5$ Ом и $T = 4$ К чувствительность СКВИДа к потоку составляет $3,2 \cdot 10^{-7} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$ [6]. Типичные значения L получены для диаметра сверхпроводящего кольца 1—2 мм, а типичные значения R — для площади туннельных контактов 1—100 мкм² [6].

Оценим с помощью выражения (4) чувствительность к магнитному потоку датчика с цилиндрическим сердечником диаметром 2 мм. В рассматриваемом случае значение R_Σ будет значительно больше. Нормальное сопротивление межзеренного контакта в массивных образцах (согласно работе [8]) составляет 0,1—10 Ом. Примем для расчетов его значение равным 10 Ом; проведя вычисления, получим $R_\Sigma \approx 11$ кОм, $T = 77$ К. Рассмотренные сверхпроводящие кольца обладают малой индуктивностью, поскольку магнитное поле сосредоточено в межзеренных контактах. Учитывая размеры зерен, лондоновскую глубину проникновения и толщину диэлектрического слоя между зёрнами, можно найти значение индуктивности L , которое для кольца диаметром 2 мм составит $1,8 \cdot 10^{-12}$ Гн. В результате получим значение $5,5 \cdot 10^{-10} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$ для контакта $J_{C\Sigma}$.

Поскольку кольца с контактами $J_{C\Sigma}$ расположены одно под другим, то их шумовые потоки будут складываться. Понятно, что чем длиннее сердечник датчика, тем хуже его чувст-

вительность. Без ущерба для технических характеристик можно создать датчик длиной 5 мм. Чувствительность к потоку такого датчика составит $4,8 \cdot 10^{-7} \Phi_0 / \sqrt{\Gamma\text{ц}}$, а чувствительность к магнитному полю достигнет величины $7,9 \cdot 10^{-9} \text{ Э} / \sqrt{\Gamma\text{ц}}$.

Заключение. В результате экспериментальных и теоретических исследований можно утверждать следующее:

— глубина проникновения внешнего гармонического магнитного поля в сверхпроводящий образец при $h_0 \approx 0 \dots 18 \text{ Э}$ не превышает размеров сверхпроводящих гранул;

— джозефсоновские вихри начинают проникать внутрь слабых связей сверхпроводящего образца при $h_0 \geq 18 \text{ Э}$;

— чувствительность к потоку датчиков на основе ВТСП-керамики может достигать чувствительности СКВИДов при $T = 77$, а не при $T = 4 \text{ К}$ (для СКВИДа).

Заметим также, что датчики магнитного поля, разработанные на основе ВТСП состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, отличаются простотой конструкции по сравнению со СКВИДами (на основе как обычных сверхпроводников, так и пленок высокотемпературных сверхпроводников), а также более надежны и долговечны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дзугутов В. М., Подлевских Н. А., Фишер Л. М. Проникновение низкочастотного магнитного поля в ВТСП-керамику // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1990. Т. 3, № 1. С. 47—56.
2. Коноплева Р. Ф., Чащин В. С. Исследование методом высокочастотного поглощения параметров ВТСП-материалов, облученных быстрыми нейтронами реактора // Физика твердого тела. 1997. Т. 39, № 1. С. 28—34.
3. Белодедов М. В., Черных С. В. О проникновении магнитного поля в гранулированный сверхпроводник // ЖТФ. 2003. Т. 73, вып. 2. С. 75—79.
4. Белодедов М. В., Черных С. В. Высокочувствительные магнитометры на основе ВТСП-керамики // ПТЭ. 2001. № 4. С. 157—161.
5. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В. Простое чувствительное устройство для измерения слабых магнитных полей на основе высокотемпературного сверхпроводящего иттриевого купрата // ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 3. С. 81—85.
6. Бароне А., Патерно Дж. Эффект Джозефсона: физика и применения: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
7. Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников / Пер. с англ.; Под ред. Д. М. Гинзберга. М.: Мир, 1990.
8. Куприянов М. Ю., Лихарев К. К. Эффект Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках и структурах на их основе // Успехи физ. наук. 1990. Т. 160, вып. 5. С. 49—87.

Сведения об авторе

Сергей Викторович Черных — канд. физ.-мат. наук, доцент; Волгоградский государственный университет, кафедра телекоммуникационных систем; E-mail: schtks@list.ru

Рекомендована кафедрой
телекоммуникационных систем

Поступила в редакцию
04.11.13 г.

ИНФОРМАЦИЯ

СООБЩЕНИЕ О КОНКУРСЕ ВЫПУСКНЫХ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ СПЕЦИАЛИСТОВ, БАКАЛАВРОВ, МАГИСТРОВ ПО ОПТИЧЕСКИМ И ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ И СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ В 2013 г.

18-й Всероссийский конкурс выпускных квалификационных работ (ВКР) специалистов, бакалавров, магистров по оптическим и приборостроительным направлениям и специальностям в 2013 г. по традиции проведен Санкт-Петербургским национальным исследовательским университетом информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО) — базовым вузом по образованию в области приборостроения и оптотехники. Конкурсы проводятся с 1996 г. по решению Совета учебно-методического объединения по образованию в области приборостроения и оптотехники (далее — Совет УМО). Для координации действий по организации и проведению студенческих олимпиад и конкурсов, в том числе данных конкурсов, в составе Совета УМО создан Совет по студенческим олимпиадам и конкурсам. Совет собирается один-два раза в год и обсуждает методические и другие текущие вопросы организации студенческих олимпиад и конкурсов, проводимых вузами России, реализующими учебные программы высшего профессионального образования в области приборостроения, оптотехники, фотоники и оптоинформатики. Совет координирует всю работу по проведению конкурса. Советом разработана и утверждена методика оценки ВКР, поступивших на конкурс.

Конкурс выпускных квалификационных работ специалистов, бакалавров, магистров по оптическим и приборостроительным направлениям и специальностям проведен в соответствии с планом организации Всероссийской студенческой олимпиады 2013 г., в котором указаны сроки и регламент проведения мероприятий олимпиады. Состав оргкомитета, жюри и рабочей группы конкурса утверждены приказом ректора СПб НИУ ИТМО. Этим же приказом утверждено Положение о конкурсе.

С 2006 г. конкурсы ВКР проводятся с использованием электронных средств связи (сети Интернет) на этапах получения и рецензирования ВКР.

В 2013 г. в рабочую группу конкурса выпускных квалификационных работ по оптическим и приборостроительным направлениям и специальностям поступило 58 работ из 10 вузов РФ. Участниками Всероссийского конкурса ВКР 2013 г. стали: Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых (ВлГУ); Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, филиал „Восток“ (КНИТУ, „Восток“); Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ); Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИТГУ); Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (СПб НИУ ИТМО); Сибирская государственная геодезическая академия (СГГА); Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР); Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ); Национальный исследовательский университет „Московский энергетический институт“ (МЭИ,

Смоленск); Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“; Научный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ);

Среди поступивших на конкурс выпускных квалификационных работ материалы 22 работ апробированы на конференциях различного уровня с публикацией материалов докладов. Авторами работ, представленных к награждению дипломами конкурса, выполнено 77 докладов на различных конференциях. Более 80 работ участников конкурса опубликованы в открытой печати.

Авторы 32 работ использовали при их написании материалы научных статей и конференций.

Материалы сети Интернет использованы авторами при написании 36 работ.

В рецензировании работ принимали участие 28 рецензентов из 7 вузов России. Большинство работ получили несколько рецензий.

По результатам конкурса определены следующие победители:

среди диссертаций магистров:

I место — Сергеев Максим Михайлович (НИУ ИТМО);

II место — Тимофеев Александр Олегович (УГАТУ),
— Петухова Дарья Борисовна (НИУ ИТМО);

III место — Горяинов Виктор Сергеевич (ЛЭТИ),
— Исаев Расим Мирмагмудович (НИУ ИТМО);

среди квалификационных работ специалистов:

I место — Гребенчуков Александр Николаевич (ТУСУР);

II место — Курасов Андрей Юрьевич (СГГА);

III место — Осипова Алена Юрьевна (КНИТУ, Чистополь);

среди работ бакалавров:

I место — Петроченков Игорь Александрович (МЭИ, Смоленск);

II место — Макарова Алена Алексеевна (НИУ ИТМО);

III место — Шунайлов Павел Игоревич (НИ ТГУ),
— Пахоменкова Карина Юрьевна (НИУ ИТМО).

Награды представителям вузов вручены на заседании Совета УМО вместе с подарками, предоставленными спонсорами конкурса — ЗАО НПФ „Уран“ в ноябре 2013 г.

*Заместитель председателя Совета УМО,
проректор по учебно-методической работе СПбНИУ ИТМО
А. А. ШЕХОНИН*

*Председатель рабочей группы конкурса
С. С. ГВОЗДЕВ*

*Член рабочей группы конкурса
А. Ф. АБДЕЕВА*

SUMMARY

P. 5—10.

METHOD FOR REFINEMENT OF ATMOSPHERIC MODEL PARAMETERS IN AREA FORECAST OF CARRIER ROCKET SEPARATING PARTS FALL

The problem of refinement of atmospheric model in a given altitude range based on sounding data is considered. Vertical profiles of atmospheric thermodynamic parameters are represented in the form of canonical expansion with known mathematical expectation, mean square deviation, and coordinate functions in nod altitude values. An approach is proposed for calculation of corrections to atmospheric model parameters at altitude above the upper limit of sounding region.

Keywords: carrier rocket, separating part, fall area, dispersion ellipse, atmospheric parameters, sounding.

Data on authors

- Vladimir N. Arsenyev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Mozhaysky Military Space Academy, Department of On-board Information and Measuring Complexes, St. Petersburg;
E-mail: vladar56@mail.ru
- Dastanbek A. Bulekbaev* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Higher Mathematics, St. Petersburg; E-mail: atiman@mail.ru

P. 11—14.

METEOROLOGICAL DATA DESCRIPTION AND DECODING TECHNOLOGY BASED ON ALGEBRAIC APPROACH

An algorithm for description and processing of meteorological data is proposed. The algorithm is based on algebraic approach; it allows to accelerate meteorological data processing and to reduce the necessary computational resources.

Keywords: algebraic approach, formal languages, abstract data types, meteorology, data processing, alphanumeric meteorological codes, decoding.

Data on authors

- Ivan A. Gotur* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Geophysical Technologies and Support for the Troops, St. Petersburg; E-mail: gotur@newmail.ru
- Aleksey V. Kostromitinov* — Mozhaysky Military Space Academy, Department of Geophysical Technologies and Support for the Troops, St. Petersburg; Engineer; E-mail: alexakos@yandex.ru

P. 15—19.

HADAMARD — MERSENNE MATRICES AS A BASIS OF ORTHOGONAL TRANSFORMATION FOR VIDEO MASKING ENCODING

A procedure of video masking encoding with the use of M-matrices as an orthogonal basis is considered. Two-level orthogonal symmetrical M-matrices are proposed for utilization on the stage of image spectral expansion. The M-matrices applied in the procedure are of order equal to Mersenne sequence for which Hadamard matrices do not exist.

Keywords: orthogonal matrices, M-matrices, Hadamard matrices, Hadamard — Mersenne matrices, Mersenne number, video processing.

Data on authors

- Anton A. Vostrikov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Research Institute of Informational Control Systems; Deputy Director; E-mail: vostricov@mail.ru
- Yury N. Balonin* — St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Computer Systems and Networks; Programmer; E-mail: yuraball@mail.ru

P. 20—26.

CONTROL OVER OBJECTS UNDER UNCERTAINTY AND RESTRICTION TO INPUT SIGNAL AMPLITUDE

An algorithm of control over objects under parametric uncertainty, perturbations, and restriction to input signal amplitude is synthesized. A method is proposed for signal formatting in such a way as to ensure the control function to be bounded in a given range. Limiting requirements on parameters of object under control, reference model, and regulator to ensure the control system efficiency are formulated. Results of modeling for the case of linear object are presented.

Keywords: control under uncertainty, limitation on control signal amplitude, compensation of perturbations.

Data on author

- Igor B. Furtat* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Management Systems and Informatics; E-mail: cainenash@mail.ru

P. 26—28.

SYSTEM OF TURBOCOMPRESSOR PROTECTION AGAINST SURGING

The possibility of construction of a turbocompressor protection system based on experimental data on surging is considered. The system allows for simultaneous control over a specified set of parameters of gas pressure and temperature in the air-gas tract.

Keywords: surging, fluid oscillator, air-gas tract.

Data on author

- Moris M. Shakirianov* — Cand. Techn. Sci.; M. Akmullah Bashkir State University, Department of Programming and Higher Mathematics, Ufa; E-mail: shakirianov.moris@yandex.ru

P. 29—38.

SYNTHESIS AND OPTIMIZATION OF COMPUTATIONAL ALGORITHMS FOR SIGNAL PROCESSING BASED OF EXTREME CORRELATION METHOD IN HIGH-RESOLUTION ELECTROCARDIOGRAPHY

Approaches to optimization of computational algorithms of electrocardiographic signals processing based on extreme correlation method are discussed. An algorithm allowing for tenfold decrease of computation time at retained signal processing quality indicators is proposed, the algorithm is reported to meet the requirements of high-resolution electrocardiography.

Keywords: high-resolution electrocardiography, QRS-complex, extreme correlation method, computational algorithm, Fast Fourier Transform, digital convolution.

Data on authors

- Oleg O. Zharinov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Modeling of Computational and Electronic Systems, E-mail: zharinov73@hotmail.ru
- Igor O. Zharinov** — Dr. Techn. Sci.; P. A. Efimov Experimental Design Office “Electroavtomatika”, St. Petersburg; Head of Scientific Educational Center; E-mail: igor_rabota@pisem.net

P. 39—46.

CRISIS OF INDUSTRIAL PROGRAMMING TECHNOLOGY, UNDECLARED CAPABILITIES, AND DON'T CARE

Verification of computational processes with graphical-analytical models driven by partially defined Boolean functions is considered. The problem under study consists in application of Boolean control box and cubic coatings to searching of undeclared capabilities and dead code as a result of *don't care*. Examples of coatings for Boolean graph are presented, as well as verification of *don't care* as a coating conjunction of relations-inequalities.

Keywords: programming technology, undeclared capabilities, verification, dead code, security threats.

Data on authors

- Oleg F. Nemolochnov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Informatics and Applied Mathematics; E-mail: nof@ipmi.ifmo.ru
- Leonid G. Osovetsky** — Dr. Techn. Sci., Professor; Central Research Institute of Communication, St. Petersburg; E-mail: leoned.osovetsky@gmail.com

P. 47—50.

APPLICATION OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES FOR EVALUATION OF GRANULAR SUBSTANCE FLOW

A method is proposed for estimation of dependence between primary measuring capacitor sensor output signal and density of grain flow based on neural network technologies. Description of the method and results of investigation are presented.

Keywords: flow measuring, grain, primary capacitor sensor, neural network technologies.

Data on authors

- Vyacheslav S. Afonin** — Cand. Techn. Sci.; I. I. Polzunov Altai State Technical University, Department of Information Technologies, Barnaul; E-mail: afonin@mail.altstu.ru
- Dmitry E. Krivobokov** — Cand. Techn. Sci.; I. I. Polzunov Altai State Technical University, Department of Information Technologies, Barnaul; E-mail: dmitrikrivobokov@mail.ru

P. 51—56.

ALGORITHM FOR ADJUSTMENT OF COMPOUND MIRRORS OF LARGE-APERTURE TELESCOPES

Peculiarities of adjustment of compound mirrors of large-aperture telescopes are considered. A mathematical model and an algorithm of compound mirror adjustment with the use of calibration method are proposed.

Keywords: high NA telescope, main mirror, aperture, wave front, normal, adjustment, calibration, algorithm, model.

Data on authors

- Anatoly V. Demin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Digital Systems and Technologies; Head of the Department; E-mail: dav_60@mail.ru
- Liliya M. Mendeleeva* — Masters Degree; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Digital Systems and Technologies; E-mail: mendeleevalm@gmail.com

P. 56—60.

MODERNIZATION OF ABBE REFRACTOMETER AND THEORETICAL JUSTIFICATION OF INCREASE IN ITS ACCURACY

Abbe refractometer under consideration is improved with the use of contouring method ensuring a clear dividing line between the light and the dark half-planes in the eyepiece. The Monte-Carlo method is applied to derive a theoretical justification of increase in the refractometer accuracy.

Keywords: refractive index, Abbe refractometer, measurement accuracy, simulation, Monte-Carlo method.

Data on authors

- Vladimir K. Kirillovsky* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: vkkir@mail.ru
- Aleksey M. Golubev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: golubev.ifmo@gmail.com

P. 61—64.

OPTICAL-ELECTRONIC GAZ ANALYZER OF NITROGEN DIOXIDE CONTROL

An optical-electronic gas analyzer is developed on the base of optical absorption spectroscopy method for measurement of nitrogen dioxide concentration in motor vehicle emission. Technical characteristics of radiation source and detectors used in the analyzer are outlined; optical scheme of the instrument is presented. Advantages of the new detector over the classical one are described.

Keywords: gas analyzer, emitting diode, photodiode, optical absorption spectroscopy.

Data on authors

- Alexander S. Antonov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: antsasha@mail.ru
- Gennady G. Ishanin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: Ishanin@mail.ru

P. 65—69.

FORMATION OF SiO₂/SI SYSTEM MORPHOLOGY UNDER THE ACTION OF EXCIMER LASER RADIATION

Formation of micro-and nano-scale periodic structures on the surface of SiO₂/Si system with the use of nanosecond laser pulses is investigated. Exposure of experimental samples to ultraviolet ArF laser pulse (193 nm) is shown to produce periodic wave-like structures on the surface. The dependence of the surface topology of SiO₂/Si system on the laser pulse energy density and on the number of pulses is studied.

Keywords: nanosecond laser, nanostructuring, periodic structures, SiO₂/Si system, optical microscopy, probe microscopy.

Data on authors

- Cong Tu Huynh** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Design and Security of Computer Systems; E-mail: Picochip912@yahoo.com
- Albert M. Skvortsov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Design and Security of Computer Systems; E-mail: a-skvortsov@yandex.ru
- Andrey A. Petrov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; E-mail: petrovandrey79@inbox.ru

P. 70—75.

ON POTENTIAL SENSITIVITY OF MAGNETIC SENSORS BASED ON GRANULAR SUPERCONDUCTORS

Potentially achievable sensitivity of magnetic sensors on the base of granular superconductors is predicted from experimental results and theoretical study of the process of magnetic field penetration in HTSC structure YBa₂Cu₃O_{7-x}.

Keywords: granular superconductors, magnetic sensors, sensitivity.

Data on author

- Sergey V. Chernykh** — Cand. Phys.-Math. Sci.; Volgograd State University, Department of Telecommunication Systems; E-mail: schtks@list.ru