

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Хафизов Р. Г., Охотников С. А. Распознавание непрерывных комплекснозначных контуров изображений 3
- Ушаков А. В., Яицкая Е. С. Коммутация структуры пространства линейных устройств рекуррентного преобразования кодов 9
- Пономарев Д. Ю. Тензорная методология в информационных коммуникациях 18

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Красильников А. В. Поворотный гидродинамический стенд и методика оценки его габаритных характеристик 24
- Калявин В. П., Нгуен Ч. В., Та Х. Т. Использование метода чувствительности функции передачи для анализа диагностической модели гребной электрической установки 29

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Мысливцев Т. О. Оценка чувствительности алгоритма вторичной обработки навигационных измерений к возмущениям параметров модели наблюдения 34
- Лестев А. М., Ефимовская А. В. О влиянии нелинейных факторов на динамику микромеханического гироскопа с двухмассовым чувствительным элементом 40

ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

- Рябинин М. А. Сравнительный анализ методов поверхностного упрочнения деталей киноаппаратуры 47
- Виноградова А. А., Есбулатова А. Ж., Войнов К. Н. Использование усовершенствованного прибора ночного видения для обнаружения ненаблюдаемых объектов 52

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Тенденции совершенствования элементной базы инфракрасных систем 3-го поколения 56
- Сушков А. Л. Алгоритм расчета зейделевых aberrаций для оптической среды с распределенным показателем преломления 64
- Гончар И. В., Иванов А. С., Манухов В. В., Федорцов А. Б. Автоматизированный быстродействующий лазерный интерферометр для контроля толщины прозрачных пленок 72
- Иночкин М. В., Назаров В. В., Сачков Д. Ю., Сидорова О. П., Хлопонин Л. В., Храмов В. Ю. Особенности многочастотной генерации излучения эрбиевых лазеров 79
- Демин А. В., Моисеева М. И. Оценка коэффициента пропускания атмосферы на основе экспериментальных данных 85

ИНФОРМАЦИЯ 90

SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича) 92

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

| | |
|---|----|
| Khafizov R. G., Okhotnikov S. A. Recognition of Continuous Complex-Valued Contours of Images..... | 3 |
| Ushakov A. V., Yaitskaya E. S. Structure Switching of the Space of Linear Devices for Recurrent Transformation of Binary Codes | 9 |
| Ponomarev D. Yu. Tensor Methodology for Informational Communications | 18 |

DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

| | |
|---|----|
| Krasilnikov A. V. Rotary Hydrodynamic Test Bench and Technique for Estimation of Its Dimensional Characteristics | 24 |
| Kalyavin V. P., Nguyen Ch. V., Ta H. Th. Analysis of Diagnostic Model of Propulsion Electrical Installation with the Use of the Method of Transfer Function Sensitivity..... | 29 |

GYROSCOPIC AND NAVIGATION SYSTEMS

| | |
|---|----|
| Myslitshev T. O. Estimate of Sensitivity of Algorithm of Secondary Processing of Navigational Measurements to Disturbances of Observation Model Parameters | 34 |
| Lestev A. M., Yefimovskaya A. V. Nonlinear Factors Effect on Dynamics of Micromechanical Gyroscope with Two-Mass Sensitive Element | 40 |

FINE MECHANICS DEVICES

| | |
|--|----|
| Ryabinin M. A. Comparative Analysis of Face-Hardening Methods as Applied to Cinematographic Equipment Components | 47 |
| Vinogradova A. A., Esbulatova A. Zh., Voinov K. N. Application of an Improved Night-Vision Device to Detection of Unobserved Objects..... | 52 |

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

| | |
|--|----|
| Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. Tendencies in Development of Components for 3rd Generation of Infrared Systems | 56 |
| Sushkov A. L. An Algorithm for Seidel Aberrations Calculation in Optical Medium with Arbitrary Refraction Index Distribution | 64 |
| Gonchar I. V., Ivanov A. S., Manukhov V. V., Fedortsov A. B. Computer-Added High-Performance Laser Interferometer for Transparent Films Thickness Measurement..... | 72 |
| Inochkin M. V., Nazarov V. V., Sachkov D. Yu., Sidorova O. P., Khloponin L. V., Khramov V. Yu. Peculiarities of Multifrequency Generation of Erbium Laser Radiation | 79 |
| Demin A. V., Moiseeva M. I. Estimate of Atmospheric Transmittance on the Base of Experimental Data | 85 |

| | |
|--------------------------|----|
| INFORMATION | 90 |
|--------------------------|----|

| | |
|----------------------|----|
| SUMMARY | 92 |
|----------------------|----|

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

Р. Г. ХАФИЗОВ, С. А. ОХОТНИКОВ

РАСПОЗНАВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ КОМПЛЕКСНОЗНАЧНЫХ КОНТУРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Представлена математическая модель непрерывного контура. Исследованы вопросы дискретизации непрерывных контуров изображений. Получены сравнительные характеристики вероятности правильного распознавания непрерывных и дискретных элементарных контуров.

Ключевые слова: непрерывный контур, элементарный контур, дискретизация контура, вероятность правильного распознавания.

Введение. В системах технического зрения обработка изображений и распознавание зрительных образов связаны с решением задач контурного анализа. Изображение, подлежащее обработке, вводится в запоминающее устройство, имеющее матричную организацию. Размер клетки (пиксела) сетчатки обычно выбирается в соответствии с возможностью восстановления исходного изображения $s(x, y)$ по оцифрованному $\omega(m_1, m_2)$. Возникающие при этом ошибки дискретизации обусловлены наличием граничных пикселей, в пределах которых содержатся участки как фона, так и изображения объекта. После оцифровки каждый пиксел однозначно относится либо к фону, либо к изображению. Поэтому изображения $s(x, y)$ и $\omega(m_1, m_2)$ не совпадают. Величина ошибки дискретизации зависит не только от размеров пиксела, но и от критерия принятия решения о принадлежности каждого из пикселей фону или изображению [1].

Для обработки контура аналитическим или компьютерным способом производится его кодирование, т.е. в соответствие каждому контурному элементу ставится определенное число. Контур Γ , состоящий из элементов $\gamma(n)$, $n = 0, 1, \dots, s-1$, описывается выражением

$$\Gamma = \{\gamma(n)\}_{0, s-1} = \{\gamma(0), \gamma(1), \dots, \gamma(s-1)\},$$

где $\gamma(n)$ — элементарный вектор, соединяющий центры или узлы соседних контурных ячеек сетчатки.

Такие элементарные векторы (ЭВ) называют стандартными, в отличие от ЭВ, длина и аргумент которых задаются произвольными числами. Стандартные элементарные векторы формируются естественным образом в соответствии с изображением, введенным в запоминающее устройство.

Полигональное представление контура формируется при его аппроксимации линейными сегментами. Кодирование заключается в фиксации координат концов этих сегментов. Данный способ широко распространен благодаря компактности получаемых описаний [1]. Однако при его реализации возникает проблема сегментации, аналогичная проблеме

дискретизации сигналов. В реальных случаях она обычно связана с потерей информации о форме изображений. Таким образом, при представлении контуров изображений количество элементарных векторов определяется разрешающей способностью датчиков изображений. Как правило, такое представление является избыточным. Влияние дискретизации на качество распознавания контуров изображений и есть предмет исследования в настоящей статье.

Математическая модель непрерывного контура. Представим контур $\mathbf{X} = \{\chi(l)\}_{0,L}$ как непрерывную замкнутую кривую, заданную на комплексной плоскости (рис. 1):

$$\chi(l) = \chi_1(l) + i\chi_2(l) = |\chi(l)| \exp\{i\varphi(l)\}, \quad l \in [0, 2\pi],$$

где $\chi_1(l) = \operatorname{Re} \chi(l)$ и $\chi_2(l) = \operatorname{Im} \chi(l)$ — действительная и мнимая компоненты функции $\chi(l)$; $|\chi(l)| = \sqrt{\chi_1^2(l) + \chi_2^2(l)}$ и $\varphi(l) = \arg \chi(l)$ — амплитудное и фазовое представления функции $\chi(l)$. Примеры непрерывных контуров изображений приведены на рис. 1.

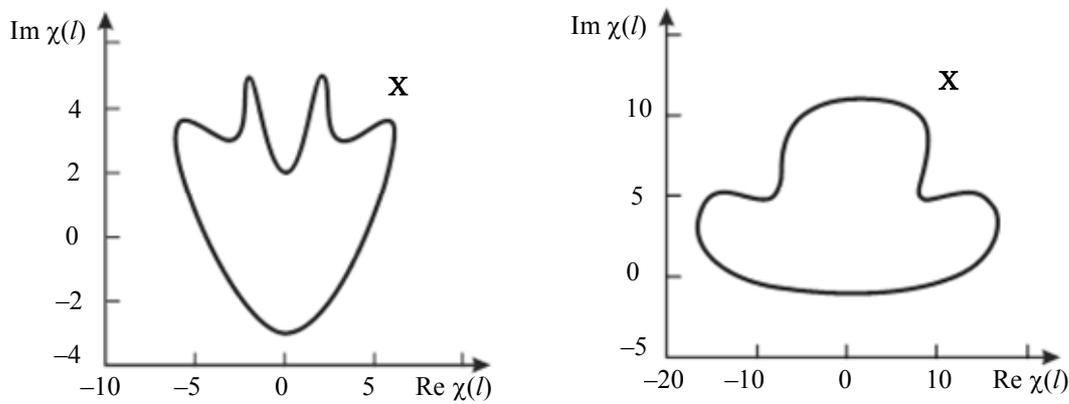


Рис. 1

При многократном обходе вдоль замкнутой кривой контур \mathbf{X} можно представить в виде функции с периодом 2π , т.е. [2]

$$\chi(l) = \chi(l + 2\pi\alpha), \quad \alpha = 0, 1, 2, \dots$$

Таким образом, если функция $\chi(l)$ изменяется, подчинялась тем или иным условиям, например $\mathbf{X} = \{\chi(l)\}_{0,L}$ задает контур изображения, то можно говорить о комплексной переменной, заданной на плоскости S комплексной переменной χ . Представление контуров изображений в виде функции комплексной переменной позволяет использовать для их анализа и обработки теорию функции комплексной переменной. Так, например, дробно-линейное отображение вида

$$v = \frac{a\gamma + b}{c\gamma + d}, \quad bc - ad \neq 0,$$

устанавливает взаимно-однозначное соответствие между точками γ -плоскости и точками v -плоскости. Частный случай дробно-линейного отображения вида $v = a\gamma + b$, где $a = a_1 + ia_2$ и $b = b_1 + ib_2$ — произвольные комплексные числа, соответствующий вращению на угол $\arg a$, растяжению в $|a|$ раз и параллельному сдвигу на вектор b , служит для моделирования процесса формирования наблюдаемого контура $\mathbf{X}^{(c)}$ путем растяжения исходного контура \mathbf{X} в $|\mu|$ раз, поворота на угол $\Delta\varphi$ и сдвига начальной точки на d элементарных векторов, т.е.

$$\mathbf{X}^{(c)} = \left\{ |\mu| \cdot |\chi(l+d)| \exp \left\{ i \left[\varphi(l+d) + \Delta\varphi \right] \right\} \right\}_{0,2\pi}.$$

Шумовой контур $\mathbf{Z} = \{\zeta(l)\}_{0,2\pi} = \{\zeta_1(l) + i\zeta_2(l)\}_{0,2\pi}$ представляет собой комплекснозначный аналог флуктуационного шума, где $\zeta_1(l)$ и $\zeta_2(l)$ — действительные случайные функции действительного аргумента l . Закон распределения функций $\zeta_1(l)$ и $\zeta_2(l)$ предполагается нормальным с математическим ожиданием $M_\zeta = M_{\zeta_1} = M_{\zeta_2} = 0$ и дисперсией $D_\zeta = D_{\zeta_1} + D_{\zeta_2}$ [1].

Зашумленный непрерывный контур $\mathbf{K} = \{\kappa(l)\}_{0,2\pi}$ образуется как аддитивная совокупность исходного $\mathbf{X} = \{\chi(l)\}_{0,2\pi}$ и шумового $\mathbf{Z} = \{\zeta(l)\}_{0,2\pi}$ контуров, т.е. $\kappa(l) = \chi(l) + \zeta(l)$, $l = [0, 2\pi]$. Элемент $\kappa(l)$ представляет собой сумму постоянной составляющей детерминированной функции $\chi(l)$ и случайной функции $\zeta(l)$, имеющей нулевое математическое ожидание, дисперсию D_ζ и подчиняющейся нормальному закону распределения. Поэтому функция $\kappa(l)$ будет распределена по нормальному закону с дисперсией D_ζ и математическим ожиданием $M_\zeta = \chi(l)$.

Дискретизация непрерывных контуров изображений. Если $\mathbf{X} = \{\chi(l)\}_{0,2\pi}$ — произвольный контур, спектр $\mathbf{P} = \{\rho(\omega)\}_{-\omega_B, \omega_B}$ которого отличен от нуля лишь в полосе частот $-\omega_B \leq \omega \leq \omega_B$, то его можно разложить в обобщенный ряд Фурье по базису Котельникова S_n . С учетом комплекснозначного характера функции \mathbf{X} произведем дискретизацию отдельно для действительной и мнимой частей, в результате получим

$$\chi(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{1,n} S_n(l; \omega_B) + i c_{2,n} S_n(l; \omega_B),$$

где $c_{1,n} = (\chi_1(l), S_n(l; \omega_B))$ и $c_{2,n} = (\chi_2(l), S_n(l; \omega_B))$ — коэффициенты ряда, причем величины $c_{1,n}$ и $c_{2,n}$ — не что иное, как $\gamma_1(n) = \chi_1(l_n)$ и $\gamma_2(n) = \chi_2(l_n)$, т.е. мгновенные значения непрерывного контура $\chi(l)$ в n -й отсчетной точке $l_n = n\pi/\omega_B$.

На рис. 2 представлен пример, иллюстрирующий процесс дискретизации непрерывного элементарного контура $\mathbf{X}_m = \{\chi_m(l)\}_{0,2\pi} = \{|\chi| \exp\{iml\}\}_{0,2\pi}$ порядка $m = 1$. Совокупность \mathbf{X}_m при $m = -\infty, \infty$ задает семейство замкнутых непрерывных элементарных контуров. При $|\chi| = 1$ любые два контура из полного семейства непрерывных элементарных контуров являются ортогональными, т.е. скалярное произведение контуров равно

$$(\mathbf{X}_m, \mathbf{X}_n) = \int_0^L \exp\{i(m-n)l\} dl = \begin{cases} 2\pi & \text{при } m = n, \\ 0 & \text{при } m \neq n. \end{cases}$$

В результате дискретизации непрерывного элементарного контура \mathbf{X}_1 порядка $m = 1$ получаем дискретный элементарный контур $\mathbf{\Gamma}_1$ порядка $m = 1$.

На рис. 3 представлены контуры $\mathbf{\Gamma}$, полученные путем дискретизации непрерывных контуров \mathbf{X} (см. рис. 1), при этом $\omega_B = 5$ (рис. 3, а, в) и $\omega_B = 10$ (рис. 3, б, г).

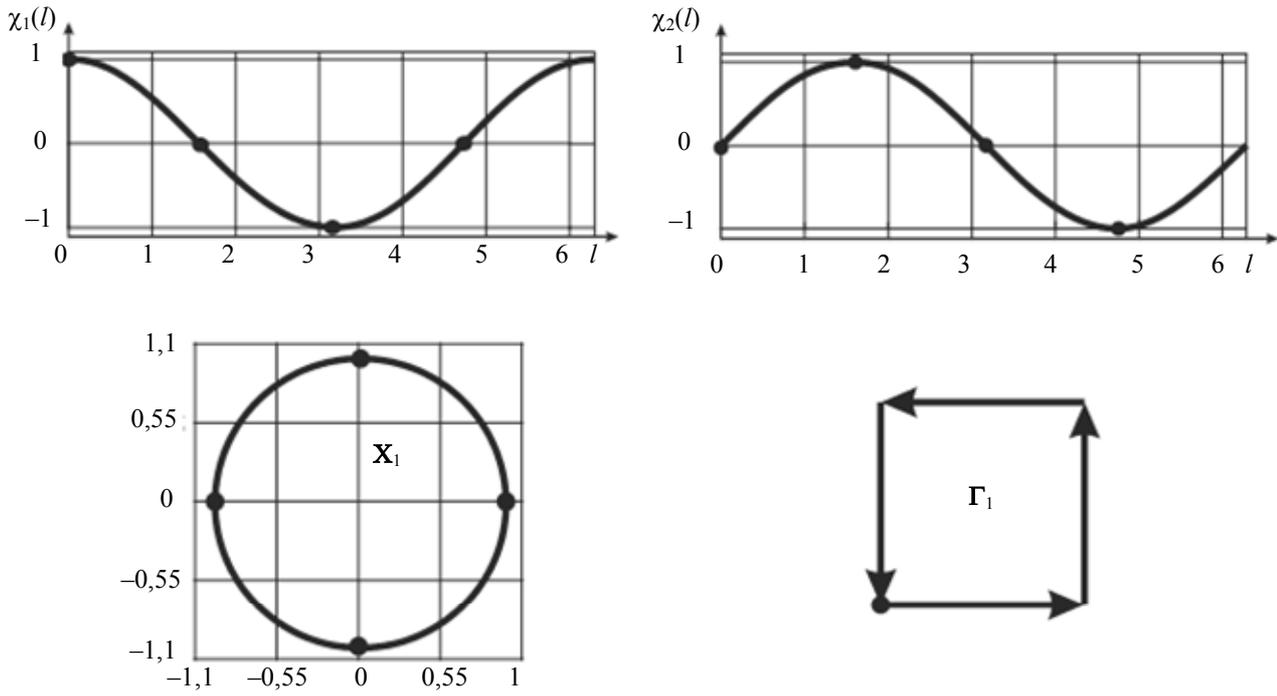


Рис. 2

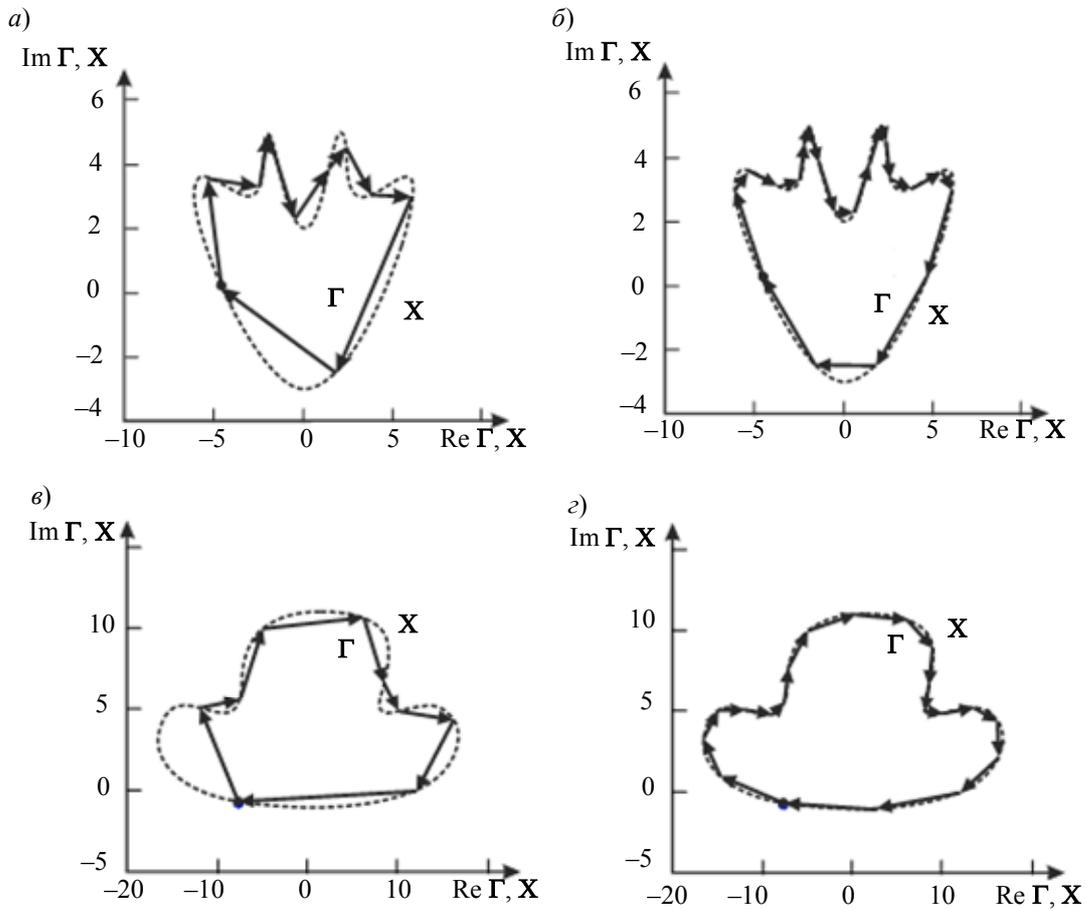


Рис. 3

Распознавание непрерывных контуров изображений. Задача распознавания дискретных контуров изображений достаточно подробно рассмотрена в работах [1, 3]. Задача исследования потенциальной эффективности распознавания дискретных комплекснозначных векторных сигналов решалась в работе [4]. В качестве меры различия двух сигналов было выбрано расстояние между задающими их векторами. Помехоустойчивость распознающей системы характеризовалась вероятностью правильного распознавания $P_{\text{пр}}$ в предположении, что величина $P_{\text{пр}}$ одинакова для всех классов распознаваемых сигналов.

В работе [4] показано, что с практических позиций при обработке комплекснозначных сигналов значительно больший интерес для построения помехоустойчивых систем распознавания представляют семейства элементарных контуров, являющихся ортогональными сигналами. По эффективности распознавания они незначительно проигрывают симплексным сигналам. Однако получаемые результаты распознавания инвариантны к линейным преобразованиям элементарных контуров, а различие значений вероятностей $P_{\text{пр}}$ по сравнению с симплексными контурами уменьшается с ростом размерности s .

Рассмотрим задачу распознавания зашумленных непрерывных контуров на примере двух классов. Пусть $\mathbf{X}_{(1)}^{(c)} = \{\chi_{(1)}(l)\}_{0,L}$ и $\mathbf{X}_{(2)}^{(c)} = \{\chi_{(2)}(l)\}_{0,L}$ — непрерывные контуры соответственно классов A_1 и A_2 . На устройство распознавания подается либо зашумленный контур первого класса $\mathbf{K}_{(1)} = \mathbf{X}_{(1)}^{(c)} + \mathbf{Z}$, либо зашумленный контур второго класса $\mathbf{K}_{(2)} = \mathbf{X}_{(2)}^{(c)} + \mathbf{Z}$.

Задача распознавания заключается в обоснованном отнесении зашумленного контура \mathbf{K} к классу A_1 или A_2 . Для принятия решения необходимо сформировать безусловное отношение правдоподобия и сравнить его с пороговым значением сигнала. Функции правдоподобия контуров $\mathbf{K}_{(1)}$ и $\mathbf{K}_{(2)}$ имеют соответственно следующий вид:

$$\Lambda(\mathbf{K}, |\mu_{(1)}|, \Delta\varphi_{(1)}, d_{(1)}) = \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\|\mathbf{K}\|^2 + \|\mathbf{X}_{(1)}^{(c)}\|^2 - 2\operatorname{Re}(\mathbf{K}, \mathbf{X}_{(1)}^{(c)}) \right]\right\};$$

$$\Lambda(\mathbf{K}, |\mu_{(2)}|, \Delta\varphi_{(2)}, d_{(2)}) = \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\|\mathbf{K}\|^2 + \|\mathbf{X}_{(2)}^{(c)}\|^2 - 2\operatorname{Re}(\mathbf{K}, \mathbf{X}_{(2)}^{(c)}) \right]\right\},$$

тогда логарифм безусловного отношения правдоподобия определяется как

$$\ln \left[\Lambda(\mathbf{K}, |\mu_{(1)}|, |\mu_{(2)}|, \Delta\varphi_{(1)}, \Delta\varphi_{(2)}, d_{(1)}, d_{(2)}) \right] =$$

$$= -\frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \|\mathbf{X}_{(1)}^{(c)}\|^2 - \|\mathbf{X}_{(2)}^{(c)}\|^2 - 2 \left[\operatorname{Re}(\mathbf{K}, \mathbf{X}_{(1)}^{(c)}) - \operatorname{Re}(\mathbf{K}, \mathbf{X}_{(2)}^{(c)}) \right] \right\},$$

где σ^2 — дисперсия шума.

Если на вход распознающего устройства подается зашумленный контур некоторого класса из алфавита объемом Q , то алгоритм распознавания предусматривает многоканальную по числу классов процедуру. В каждом канале находится фильтр, согласованный с эталонным контуром класса, и устройство, вырабатывающее мгновенное значение сигнала с максимальным модулем [5]. Далее отмечается канал, модуль мгновенного значения сигнала на выходе которого превышает модули выходных сигналов остальных каналов. Если величина максимального модуля больше порогового значения, то распознаваемый контур относится к классу, номер которого равен номеру канала.

На рис. 4 приведены графики зависимости вероятности правильного распознавания $P_{\text{пр}}$ зашумленных непрерывных $\mathbf{X}_m = \{\chi_m(l)\}_{0,2\pi} = \{\exp\{iml\}\}_{0,2\pi}$ (сплошные кривые) и дискретных

$\Gamma_m = \{\chi_m(n)\}_{0,s-1} = \{\exp\{imn\}\}_{0,s-1}$ (штриховые кривые) элементарных контуров от отношения сигнал/шум q при объемах алфавита $Q = 5, 10$ и 15 .

Величина q равна отношению средней энергии элементарного вектора элементарного контура к дисперсии шумового контура Z :

— для непрерывного контура X_m $q = \frac{\|X_m\|^2}{2\pi\sigma^2}$,

— для дискретного контура Γ_m $q = \frac{\|\Gamma_m\|^2}{s\sigma^2}$.

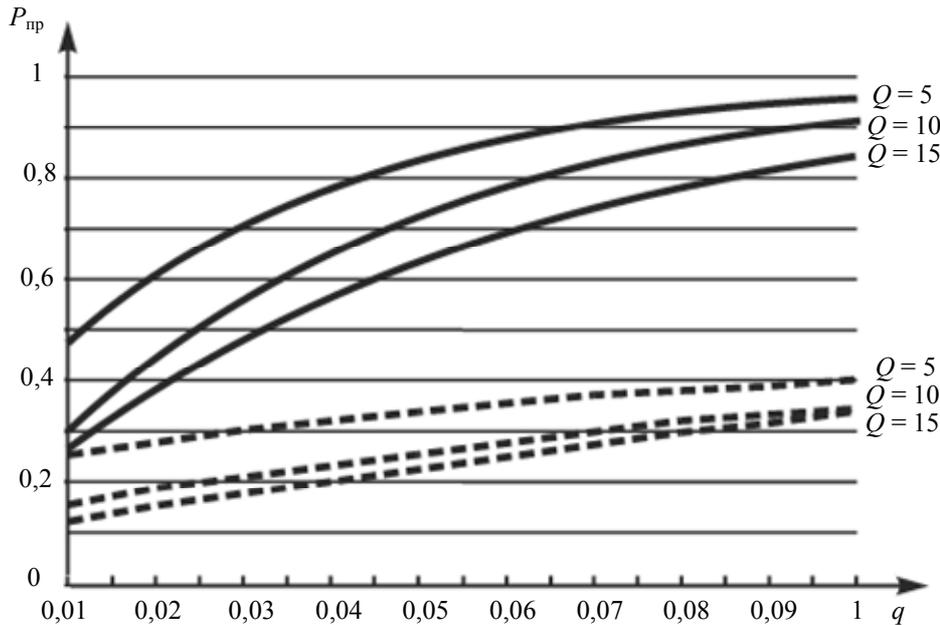


Рис. 4

Скалярное произведение двух элементарных контуров X_m и X_n или Γ_m и Γ_n , являющихся ортогональными сигналами, равно нулю. Поэтому расстояние между нормированными элементарными контурами постоянно. Уменьшение вероятности $P_{пр}$ при распознавании зашумленных элементарных контуров, связанное с увеличением количества Q классов, объясняется возрастанием количества параллельно работающих каналов, для каждого из которых может быть принято ошибочное решение о распознавании.

Заключение. В статье рассмотрены вопросы представления непрерывных контуров изображений, заданных в комплекснозначном виде. Исследованы вопросы дискретизации непрерывных контуров изображений.

Решена задача распознавания непрерывных контуров изображений. При этом считалось, что задан алфавит эталонных изображений всех классов. На устройство распознавания поступает зашумленный непрерывный контур изображения одного из классов алфавита. Устройство распознавания выносит оптимальное по критерию минимального расстояния решение в пользу одного из классов алфавита. Основой устройства служит фильтр, согласованный с непрерывным контуром изображения одного из классов. Реакции всех фильтров анализируются решающим устройством.

Получены сравнительные характеристики вероятности правильного распознавания непрерывных и дискретных элементарных контуров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект №11-07-00585а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Введение в контурный анализ и его приложение к обработке изображений и сигналов / Под ред. Я. А. Фурмана. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 592 с.
2. Хафизов Р. Г. Анализ непрерывных комплекснозначных сигналов, задающих контуры изображений плоских объектов // Вестн. КГТУ им. А. Н. Туполева. 2006. № 4. С. 24—27.
3. Егошина И. Л., Хафизов Р. Г. Распознавание плоских зашумленных изображений по их форме // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 4. С. 46—51.
4. Комплекснозначные и гиперкомплексные системы в задачах обработки многомерных сигналов / Под ред. Я. А. Фурмана. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 456 с.
5. Хафизов Р. Г., Охотников С. А. Линейная фильтрация непрерывных контуров изображений, заданных в комплекснозначном виде // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, № 3. С. 408—416.

Сведения об авторах

- Ринат Гафиятуллович Хафизов** — д-р техн. наук, профессор; Марийский государственный технический университет, кафедра радиотехнических и медико-биологических систем, Йошкар-Ола; E-mail: krtmbs@marstu.net
- Сергей Аркадьевич Охотников** — аспирант; Марийский государственный технический университет, кафедра радиотехнических и медико-биологических систем, Йошкар-Ола; E-mail: krtmbs@marstu.net

Рекомендована кафедрой
радиотехнических и медико-биологических
систем

Поступила в редакцию
13.12.11 г.

УДК [517.938 + 519.713 / .718]: 621.398

А. В. УШАКОВ, Е. С. ЯИЦКАЯ

КОММУТАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВА ЛИНЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ РЕКУРРЕНТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОДОВ

Рассматривается задача коммутации структуры пространства линейных устройств рекуррентного преобразования двоичных кодов с помощью нелинейно формируемого сигнала. Предлагаются алгоритмы синтеза таких устройств.

Ключевые слова: рекуррентное преобразование, структура пространства, матрица коммутирующего входа, сигнал коммутации, основная конъюнкция вектора состояния.

Введение. Постановка задачи. Устройства рекуррентного преобразования двоичных кодов являются двоичными динамическими системами. В теории двоичных динамических систем (ДДС) сформировались два направления [1—3] их синтеза, которые развиваются по законам системной диалектики практически независимо друг от друга.

Первое направление, основанное на теории конечных автоматов, связано с решением задач вычислительной техники при синтезе микропрограммных автоматов, а также частично задач общетехнической дискретной автоматике. С точки зрения общесистемного подхода „автоматная“ ветвь ДДС представляет собой класс нелинейных двоичных динамических систем (НДДС), аналитически описываемых выражениями

$$x(k+1) = \lambda \{x(k), u(k)\}, y(k) = \delta \{x(k), u(k)\}; \quad (1)$$

$$x(k+1) = \lambda \{x(k), u(k)\}, y(k) = \delta \{x(k)\}, \quad (2)$$

где формула (1) предназначена для автоматной логики Мили, а формула (2) — для автоматной логики Мура; здесь x , u , y — соответственно вектор состояния ДДС, входная и выходная последовательности: $\dim x = n_A$, $\dim u = r$, $\dim y = m$; k — дискретное время, выраженное числом интервалов дискретности длительностью Δt ; функции $\lambda(\cdot)$, $\delta(\cdot)$ носят названия функции перехода и функции выхода соответственно.

Отличительной особенностью автоматного представления ДДС в форме (1) или (2) является возможность использования любых типов триггеров. Реализация автоматной логики в виде (1) или (2) в силу последнего обстоятельства требует дополнения их функциями возбуждения информационных входов $v(k)$ используемых триггеров, которые определяются исходным состоянием $x(k)$, состоянием перехода $x(k+1)$ и входной последовательностью $u(k)$:

$$v(k) = \tilde{v}\{x(k+1), x(k), u(k)\}. \quad (3)$$

Если в выражении (3) подставить представления для $x(k+1)$ из формулы (1), то функции возбуждения будут иметь вид

$$v(k) = \tilde{v}\{\lambda\{x(k), u(k)\}, x(k), u(k)\} = \tilde{v}\{x(k), u(k)\}. \quad (4)$$

В результате автоматная реализация двоичной динамической системы, исходное описание функционирования которой задается или графом переходов из состояния в состояние, или граф-схемой алгоритма смены состояний, сводится к реализации двух систем булевых функций:

$$\left. \begin{aligned} v(k) &= \tilde{v}\{x(k), u(k)\}; \\ y(k) &= \begin{cases} \delta\{x(k), u(k)\} & \text{для автоматной логики Мили,} \\ \delta\{x(k)\} & \text{для автоматной логики Мура.} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Следует отметить, что если триггер выбранного типа используется в синхронном режиме, то в булевых функциях (5) должен учитываться синхросигнал.

Второе направление синтеза двоичных динамических систем, основанное на линейном векторно-матричном представлении, формировалась в рамках теории помехозащитного преобразования кодов (ППК) [4] и линейных последовательностных машин [5], получивших впоследствии название линейных двоичных динамических систем (ЛДДС). В этом случае для аналитического описания динамических процессов в ДДС используются рекуррентные векторно-матричные представления вида

$$\left. \begin{aligned} x(k+1) &= \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k), \quad x(0), \\ y(k) &= \mathbf{C}x(k) + \mathbf{H}u(k). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Основная особенность ЛДДС заключается в том, что в них используются D-триггеры, аналитически представляющие собой элементы задержки на интервал длительностью Δt , т.е. на один такт. В выражении (6) переменные x , u , y , k имеют тот же смысл, что и в формулах (1), (2); размерности этих переменных следующие: $\dim x = n$, $\dim u = r$, $\dim y = m$, при этом в общем случае $n \neq n_A$, $n > n_A$; \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{H} — соответственно матрица состояния, матрица входа, матрица выхода и матрица вход—выход, размерности которых согласованы с размерностями переменных. Пошаговое использование модельного представления (6), называемого „рекуррентным“, приводит к „суммарному“ аналитическому представлению ЛДДС, которое также является решением системы (6):

$$\left. \begin{aligned} x(k) &= \mathbf{A}^k x(0) + \sum_{i=0}^{k-1} \mathbf{A}^i \mathbf{B} u(k-1-i), \\ y(k) &= \mathbf{C} x(k) + \mathbf{H} u(k). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Следует заметить, что в теории и практике ДДС существуют „пограничные“ задачи, решение которых обуславливает необходимость изменения структуры пространства ДДС рекуррентного преобразования кодов вида (1), (2) или вида (6). Эти задачи сводятся в основном к организации перехода ДДС из конкретного исходного состояния $x(k)$ в требуемое состояние перехода $x(k+1)$ под действием служебного сигнала коммутации u_k .

Задача коммутации структуры пространства линейных устройств рекуррентного преобразования двоичных кодов, или иначе ЛДДС, решается путем введения в нее с помощью дополнительной матрицы \mathbf{B}_k коммутирующего входа и нелинейно формируемого дополнительного сигнала u_k .

Цель настоящей статьи — построение алгоритмов формирования матрицы \mathbf{B}_k коммутирующего входа и скалярного сигнала коммутации u_k , не привязанного жестко к дискретному времени k , для двух случаев реализации ЛДДС рекуррентного преобразования кодов (6), первый из которых характеризуется условием отсутствия входной последовательности $u(k) = 0$ (автономная версия ЛДДС), а второй — условием ее наличия (версия ЛДДС, возбуждаемой произвольной входной последовательностью $u(k)$).

В соответствии с изложенным описанием ЛДДС с линейно коммутируемой структурой принимает следующий вид:

— для автономной версии системы

$$x(k+1) = \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}_k u_k, \quad (8)$$

— для версии системы, возбуждаемой ненулевой входной последовательностью $u(k)$,

$$x(k+1) = \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k) + \mathbf{B}_k u_k. \quad (9)$$

Рассматриваемыми в статье задачами являются:

1) формирование аналитических представлений

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{B}_k(\mathbf{A}, x(k+1), x(k)) \quad (10)$$

для автономной версии системы и

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{B}_k(\mathbf{A}, x(k+1), x(k), \mathbf{B}, u(k)) \quad (11)$$

для версии системы, возбуждаемой ненулевой входной последовательностью $u(k)$, в предположении, что в выражениях (8) и (9) выполняется условие

$$u_k = 1; \quad (12)$$

2) поиск способов обеспечения выполнения условия (12).

Структура пространства матрицы состояния ЛДДС. В общей постановке структура пространства матрицы состояния ДДС рекуррентного преобразования кодов характеризуется следующими факторами:

- неподвижными состояниями системы при нулевом и единичном значениях входной последовательности;
- наличием собственных векторов матрицы состояния;
- наличием замкнутых циклов;
- состояниями, из которых ЛДДС переходит в нулевое состояние.

Если ЛДДС имеет неприводимый полином степени m в качестве характеристического, то этот полином, а следовательно, и его матрица состояния \mathbf{A} принадлежат показателю μ , так что выполняется соотношение $\mathbf{A}^\mu = \mathbf{I}$, где $\mu = 2^m - 1$. В такой системе структура пространства матрицы состояния может быть представлена:

— неподвижным состоянием $x(k) = 0$ при $u(k) \equiv 0$;

— неподвижным состоянием $x(k) = (\mathbf{I} + \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}$ при $u(k) \equiv 1$;

— двумя замкнутыми циклами максимальной длиной $\mu = 2^m - 1$, каждый со своей структурой (последовательностью перехода из состояния в состояние) при $u(k) \equiv 0$ и при $u(k) \equiv 1$, так что $x(k) = x(k + \mu)$.

Таким образом, ЛДДС с матрицей состояния \mathbf{A} размерности $(m \times m)$ может генерировать периодические последовательности максимальной длиной $L = \mu = 2^m - 1$. Следует заметить, что возможна реализация ЛДДС, при которой будут генерироваться периодические последовательности максимальной длиной L , если характеристический полином матрицы состояния ЛДДС будет иметь вид $\det(\lambda \mathbf{I} + \mathbf{A}) = \lambda^L + 1$, причем значение L может быть произвольным, а не из ряда $L = 2^m - 1$, где m — целое положительное число. Основным недостатком такого класса ЛДДС является увеличенная размерность матрицы \mathbf{A} , которая принимает значение $\dim \mathbf{A} = (L \times L)$.

В настоящей статье рассматриваются в основном проблемы коммутации структуры пространства состояний, принадлежащих указанным выше замкнутым циклам.

Формирование аналитических представлений для матрицы \mathbf{B}_k коммутирующего входа ЛДДС. Для решения задачи линейной коммутации структуры пространства состояний ЛДДС сформулируем следующие утверждения.

Утверждение 1. Если ЛДДС автономна, т.е. описывается соотношением (8), при этом заданы вектор состояния перехода $x(k+1)$ и вектор исходного состояния $x(k)$, а также выполняется условие (12), то матрица \mathbf{B}_k коммутирующего входа, с помощью которой осуществляется переход из $x(k)$ в $x(k+1)$, определяется выражением

$$\mathbf{B}_k = x(k+1) + \mathbf{A}x(k). \quad \square (13)$$

Доказательство утверждения строится на использовании соотношения (8) в предположении заданных значений $x(k+1)$, $x(k)$ и $u_k = 1$ с последующим решением уравнения (8) относительно матрицы \mathbf{B}_k . ■

Примечание 1. Из выражения (13) следует, что переход из состояния $x(k)$ в состояние $x(k+1)$ невозможен, если выполняется условие $x(k+1) + \mathbf{A}x(k) = \mathbf{O}$, т.е. в случае, если $x(k)$ — собственный вектор матрицы \mathbf{A} .

Утверждение 2. Если ЛДДС возбуждается ненулевой входной последовательностью $u(k)$, описываемой соотношением (9), при этом заданы вектор состояния перехода $x(k+1)$ и вектор исходного состояния $x(k)$, а также выполняется условие (12), то матрица \mathbf{B}_k коммутирующего входа, с помощью которой осуществляется переход из $x(k)$ в $x(k+1)$, определяется выражением

$$\mathbf{B}_k = x(k+1) + \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k). \quad \square (14)$$

Доказательство утверждения строится на использовании соотношения (9) в предположении заданных значений $x(k+1)$, $x(k)$ и $u_k = 1$ с последующим решением уравнения (9) относительно матрицы \mathbf{B}_k . ■

Примечание 2. Из выражения (14) следует, что структура матрицы \mathbf{B}_k коммутирующего входа зависит от значения входной последовательности $u(k)$ на момент коммутации, так что при $u(k) = 0$

$$\mathbf{B}_k|_{u(k)=0} = \mathbf{B}_{k0} = x(k+1) + \mathbf{A}x(k), \quad (15)$$

а при $u(k) = 1$ —

$$\mathbf{B}_k|_{u(k)=1} = \mathbf{B}_{k1} = x(k+1) + \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}. \quad (16)$$

Примечание 3. Очевидно, что введение двух матриц коммутации (15) и (16) приводит к тому, что сигнал коммутации u_k становится векторным: $u_k = [u_{k0} \ u_{k1}]^T$, при этом сигнал u_{k0} поступает на вход системы (9) через матрицу \mathbf{B}_{k0} , а сигнал u_{k1} — через матрицу \mathbf{B}_{k1} .

Примечание 4. Из выражения (14) следует, что переход из состояния $x(k)$ в состояние $x(k+1)$ невозможен, если выполняется условие $x(k+1) + \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k) = \mathbf{O}$, т.е. если $x(k)$ — собственный вектор матрицы \mathbf{A} при $u(k) = 0$, и если $\{x(k+1), x(k)\} = \arg\{x(k+1) + \mathbf{A}x(k) = \mathbf{B}\}$ при $u(k) = 1$.

Формирование сигналов коммутации структуры пространства состояний ЛДДС.

Определение 1. Основной конъюнкцией $\&\{(\cdot)\}$ набора $(\cdot) = (x_1, x_2 \dots x_i \dots x_n)$ двоичных переменных называется конъюнкция, которая для данного набора принимает единичное значение $\&\{(\cdot)\} = 1$. □

Используем это определение для набора булевых переменных применительно к вектору, составленному из тех же переменных.

Определение 2. Основной конъюнкцией $\&\{(*)\}$ вектора $(*) = (x(k))$, составленного из элементов $x_i \in \text{GF}(2) = \{0; 1\}$, называется конъюнкция, которая для данного набора двоичных переменных, образующих вектор $x(k)$, принимает единичное значение $\&\{(*)\} = 1$. □

Сформулируем утверждения для сигнала коммутации u_k различных ДДС рекуррентного преобразования кодов: автономной системы и системы, возбуждаемой входной последовательностью.

Утверждение 3. Сигнал коммутации u_k для автономной ДДС может быть сформирован в виде основной конъюнкции исходного вектора состояния $x(k)$. □

Доказательство. Рассмотрим автономную систему (8) с формируемым в ней сигналом коммутации u_k . На момент коммутации, т.е. на момент начала перехода из исходного состояния $x(k)$, только оно представлено сигналом. Формируя основную конъюнкцию для вектора $x(k)$, гарантированно можно получить скалярный сигнал единичного значения: $u_k = \&\{x(k)\}$. ■

Утверждение 4. Компоненты сигнала коммутации $u_k = [u_{k0} \ u_{k1}]^T$ для версии ЛДДС (9) при наличии входной последовательности $u(k)$ могут быть сформированы в виде

$$u_{k0} = \&\{\bar{u}(k), \&\{x(k)\}\}, \quad u_{k1} = \&\{u(k), \&\{x(k)\}\}. \quad \square(17)$$

Доказательство утверждения строится по аналогии с доказательством утверждения 3. ■

Схема формирования сигнала коммутации для версии ЛДДС (9) представлена на рис. 1 (здесь D — многомерный D-триггер).

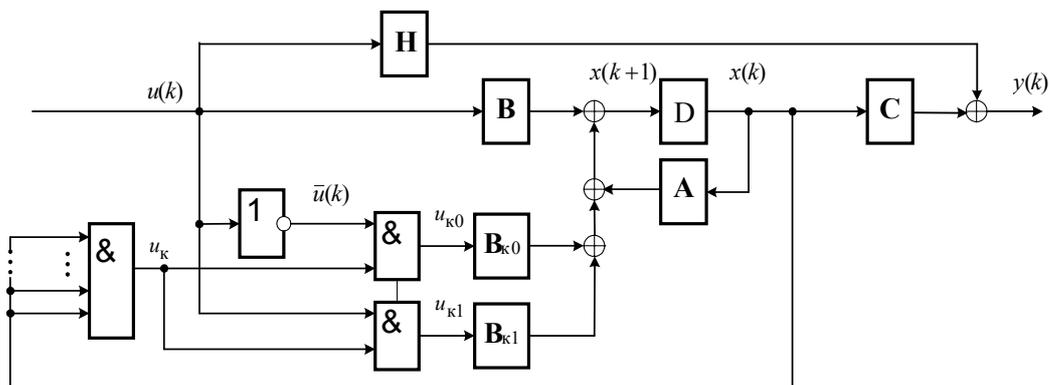


Рис. 1

Представим алгоритмы формирования матрицы B_k коммутирующего входа и скалярного сигнала коммутации u_k для двух случаев реализации ЛДДС.

Алгоритм (А1) формирования матрицы B_k и сигнала u_k для автономной версии ЛДДС.

1. Составить структуру циклов и неподвижных состояний системы по исходному векторно-матричному описанию (ВМО) автономной версии ЛДДС $x(k+1) = Ax(k)$ с помощью графа переходов или таблицы состояний.

2. Задать два набора векторов состояний: один — набор векторов $\{x(k)\}$ исходных состояний $x(k)$, из которых требуется осуществить переход, а другой — набор векторов $\{x(k+1)\}$ требуемых состояний перехода $x(k+1)$, и сформировать для этих наборов пары, задействованные в переходах.

3. Сформировать согласно утверждению 3 набор $\{u_k\}$ сигналов коммутации $u_k = \&\{x(k)\}$.

4. Вычислить набор $\{B_k\}$ матриц B_k коммутирующих входов в форме (13).

5. Составить векторно-матричное описание полученного устройства коммутации в форме (8).

6. Осуществить проверку правильности функционирования устройства.

7. Осуществить техническую реализацию.

Алгоритм (А2) формирования матрицы B_k и сигнала u_k для версии ЛДДС, возбуждаемой произвольной входной последовательностью $u(k)$.

1. Составить структуры циклов и неподвижных состояний системы по исходному ВМО версии ЛДДС $x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$ с помощью графов переходов или таблиц состояний для случаев $u(k) = 0$ и $u(k) \neq 0$ ($u(k) = 1$).

2. Задать два набора векторов состояний: один — набор векторов $\{x(k)\}$ исходных состояний $x(k)$, из которых требуется осуществить переход, а другой — набор векторов $\{x(k+1)\}$ требуемых состояний перехода $x(k+1)$, и сформировать для этих наборов пары, задействованные в переходах.

3. Сформировать согласно утверждению 4 набор $\{u_{k0}\}$ сигналов коммутации в форме (17) для случая $u(k) = 0$.

4. Вычислить набор $\{B_{k0}\}$ матриц B_{k0} коммутирующего входа в форме (15).

5. Сформировать согласно утверждению 4 набор $\{u_{k1}\}$ сигналов коммутации в форме (17) для случая $u(k) \neq 0 (u(k) = 1)$.

6. Вычислить набор $\{B_{k1}\}$ матриц B_{k1} коммутирующего входа в форме (16).

7. Составить векторно-матричное описание полученного устройства коммутации в форме (9).

8. Осуществить проверку правильности функционирования устройства.

9. Осуществить техническую реализацию.

Пример. Рассмотрим устройство управления приемом помехозащищенного кода (ПЗК), помехозащита которого реализуется в режиме „обнаружение“, причем формат кода составлен из помехозащищенных кодовых компонентов, сформированных в соответствии с рис. 2, где СИ — синхроимпульс; $\kappa\{N_{\text{КП}}\} = (n_1, k_1)$ — код номера (N) контролируемого пункта (КП); $\kappa\{\text{ФА}\} = (n_2, k_2)$ — код функционального адреса (ФА); $\kappa\{\text{ОТМ}\} = (n_3, k_3)$ — код номера объекта телемеханизации (ОТМ); $\kappa\{\text{ХК}\} = (n_4, k_4)$ — код характера команды (ХК); КВ — квитанция; М — маркер; n_i — полное число разрядов кода, k_i — число информационных разрядов кода.

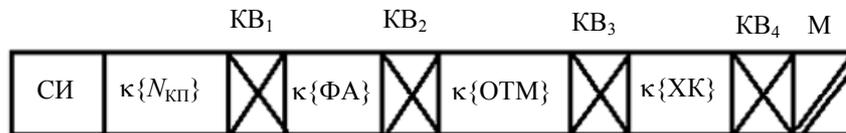


Рис. 2

Приведенный формат ПЗК рассчитан на следующие исходные данные: число КП на один пункт управления (ПУ) $N_{\text{КП}}/\text{ПУ}$ — 15; число ОТМ — 35; число уставок, передаваемых ОТМ (характер команды), — 3; категория системы телемеханики — III ($P_{\text{доп}} \leq 10^{-7}$); модель двоичного канала связи — $p_{10} = 5 \cdot 10^{-5}$, $p_{01} = 10^{-5}$; структура кода — произвольная. В результате: $(n_1, k_1) = (7, 4)$, $(n_2, k_2) = (6, 3)$, $(n_3, k_3) = (10, 6)$, $(n_4, k_4) = (5, 2)$, число служебных разрядов кода (четыре квитанции и маркер) составляет величину $n_{\text{сл}} = 5$, полное число разрядов кода $n_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 n_i + n_{\text{сл}} = 33$.

Нетрудно видеть, что разрабатываемое устройство управления приемом помехозащищенного кода по существу является распределителем импульсов (РИ), представляющим собой двоичную динамическую систему, генерирующую на n_{Σ} выходах n_{Σ} -разрядные распределительные коды. РИ дополнен линейными цепями коммутации структуры пространства посредством нелинейно формируемого сигнала в связи с характером приема ПЗК в режиме обнаружения.

Базовая структура устройства генерирует последовательность длиной n_{Σ} и строится в виде автономной ЛДДС рекуррентного вида $x(k+1) = Ax(k)$, где матрица состояния

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{32 \times 1} & \mathbf{I}_{32 \times 32} \\ 1 & \mathbf{O}_{1 \times 32} \end{bmatrix}.$$

В результате решения, основанного на использовании алгоритма **A1**, сформированы:

1) таблица состояний, в которой отражена структура циклов и неподвижных состояний системы;

| k | $x^T(k)$ | k | $x^T(k)$ | k | $x^T(k)$ |
|-----|--|-----|---|-----|--|
| 0 | $[\mathbf{O}_{1 \times 33}]^T$ | ... | ... | 27 | $[\mathbf{O}_{1 \times 6} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 26}]^T$ |
| 1 | $[\mathbf{O}_{1 \times 32} \ 1]^T$ | 14 | $[\mathbf{O}_{1 \times 19} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 13}]^T$ | ... | ... |
| 2 | $[\mathbf{O}_{1 \times 31} \ 1 \ 0]^T$ | 15 | $[\mathbf{O}_{1 \times 18} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 14}]^T$ | 31 | $[0 \ 0 \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 30}]^T$ |
| ... | ... | 16 | $[\mathbf{O}_{1 \times 17} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 15}]^T$ | 32 | $[0 \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 31}]^T$ |
| 7 | $[\mathbf{O}_{1 \times 26} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 6}]^T$ | ... | ... | 33 | $[1 \ \mathbf{O}_{1 \times 32}]^T$ |
| 8 | $[\mathbf{O}_{1 \times 25} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 7}]^T$ | 25 | $[\mathbf{O}_{1 \times 8} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 24}]^T$ | — | — |
| 9 | $[\mathbf{O}_{1 \times 24} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 8}]^T$ | 26 | $[\mathbf{O}_{1 \times 7} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 25}]^T$ | — | — |

Примечание. Фоном выделены служебные разряды кода, рамкой — неподвижное состояние.

2) набор векторов исходных состояний $\{x(8), x(15), x(26), x(32), x(33)\}$, из которых требуется осуществить переход; набор векторов требуемых состояний $\{x(1), x(9), x(16), x(27), x(0)\}$;

3) набор сигналов коммутации:

$$u_{k1} = \&\{x(8)\} = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \dots x_{26} \bar{x}_{27} \dots \bar{x}_{33};$$

$$u_{k2} = \&\{x(15)\} = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \dots x_{19} \bar{x}_{20} \dots \bar{x}_{33};$$

$$u_{k3} = \&\{x(26)\} = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \dots x_8 \bar{x}_9 \dots \bar{x}_{33};$$

$$u_{k4} = \&\{x(32)\} = \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 \dots \bar{x}_{33};$$

$$u_{k5} = \&\{x(33)\} = x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \dots \bar{x}_{33};$$

4) набор матриц коммутирующих входов:

$$\mathbf{B}_{k1} = [\mathbf{O}_{1 \times 24} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 7} \ 1]^T;$$

$$\mathbf{B}_{k2} = [\mathbf{O}_{1 \times 17} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 6} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 8}]^T;$$

$$\mathbf{B}_{k3} = [\mathbf{O}_{1 \times 6} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 10} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 15}]^T;$$

$$\mathbf{B}_{k4} = [1 \ \mathbf{O}_{1 \times 5} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 26}]^T;$$

$$\mathbf{B}_{k5} = [\mathbf{O}_{1 \times 632} \ 1]^T;$$

5) векторно-матричное описание полученного устройства коммутации:

$$x(k+1) = Ax(k) + \mathbf{B}_{k1}u_{k1} + \mathbf{B}_{k2}u_{k2} + \mathbf{B}_{k3}u_{k3} + \mathbf{B}_{k4}u_{k4} + \mathbf{B}_{k5}u_{k5}.$$

Проверка правильности функционирования полученного устройства осуществляется на базе гипотезы о том, что при передаче кода функционального адреса и кода характера коман-

ды произошла ошибка. Очевидно в этом случае прием кода ФА должен сопровождаться запросом на повторение передачи этого кода, что обеспечивается переходом из состояния $x(15)$ в $x(9)$, т.е.

$$x(k+1) = Ax(k) + B_{k2}|_{k=15} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{32 \times 1} & \mathbf{I}_{32 \times 32} \\ 1 & \mathbf{O}_{1 \times 32} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{18 \times 1} \\ 1 \\ \mathbf{O}_{14 \times 1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{17 \times 1} \\ 1 \\ \mathbf{O}_{6 \times 1} \\ 1 \\ \mathbf{O}_{8 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{24 \times 1} \\ 1 \\ \mathbf{O}_{8 \times 1} \end{bmatrix} = x(9).$$

Аналогично запрос на повторение кода ХК сопровождается переходом из состояния $x(32)$ в $x(27)$, т.е.

$$x(k+1) = Ax(k) + B_{k4}|_{k=32} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{32 \times 1} & \mathbf{I}_{32 \times 32} \\ 1 & \mathbf{O}_{1 \times 32} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \mathbf{O}_{31 \times 1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{O}_{5 \times 1} \\ 1 \\ \mathbf{O}_{26 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{6 \times 1} \\ 1 \\ \mathbf{O}_{26 \times 1} \end{bmatrix} = x(27).$$

Заключение. Предложенная в статье алгоритмическая среда позволяет конструктивно расширить функциональные возможности линейных двоичных динамических систем путем введения дополнительных линейных цепей коммутации структуры пространства состояний ЛДДС рекуррентного преобразования кодов с помощью нелинейно формируемых сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков А. В., Яицкая Е. С. Рекуррентное систематическое помехозащитное преобразование кодов: возможности аппарата линейных двоичных динамических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 3. С. 17—25.
2. Баранов С. И. Синтез микропрограммных автоматов. Л.: Энергия, 1979.
3. Бохман Д., Постхофф Х. Двоичные динамические системы. М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1976. 600 с.
5. Гилл А. Линейные последовательностные машины. М.: Наука, 1974. 288 с.

Сведения об авторах

- Анатолий Владимирович Ушаков** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: ushakov-AVG@yandex.ru
- Елена Сергеевна Яицкая** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: yaitskayaes@mail.ru

Рекомендована кафедрой
систем управления и информатики

Поступила в редакцию
25.04.11 г.

Д. Ю. ПОНОМАРЕВ

ТЕНЗОРНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ КОММУНИКАЦИЯХ

Предложен метод оценки вероятностно-временных характеристик сетей массового обслуживания с использованием математического аппарата тензорного исчисления, позволяющего исследовать указанные сети при их большой размерности.

Ключевые слова: информационно-коммуникационные сети, качество обслуживания, тензорный анализ, среднее время задержки пакета.

Одна из актуальных задач развития современных информационно-коммуникационных сетей — исследование вероятностно-временных характеристик IP-узлов, так как именно данные характеристики позволяют оценить качество обслуживания (QoS — Quality of Service) информационных потоков в этих сетях. Оцениваемыми параметрами при этом являются [1, 2] вероятность потери пакета, среднее время его задержки в системе, дисперсия времени задержки пакета. Однако проектирование рассматриваемых сетей может быть осложнено трудоемкостью расчетов параметров оборудования, позволяющего обеспечить необходимый уровень качества обслуживания, а также топологией сетей и использованием дополнительных протоколов обработки информационных потоков на различных уровнях модели взаимодействия открытых систем (ВОС) [3].

В настоящей статье для оценки вероятностно-временных характеристик (ВВХ) сетей связи предлагается применить математический аппарат преобразования координат (т.е. тензорный анализ сетей), при этом сети рассматриваются как геометрические объекты, проекции которых в различных системах координат различны, но физические свойства самих объектов не изменяются.

Основоположником тензорного анализа сетей является Г. Крон, который впервые использовал тензорный анализ и применительно к теории электрических сетей [4]. Дальнейшее развитие идеи тензорного анализа, в том числе и для информационных систем, получили в работах А. Е. Петрова, А. Е. Арменского, М. Н. Петрова и др. В теории Г. Крона основополагающими являются два постулата, смысл которых заключается в следующем: во-первых, объединение элементов не вносит никаких новых физических явлений, не наблюдаемых в примитивном элементе, а уравнение, описывающее поведение сложной системы, записывается аналогично уравнению состояния примитивного элемента, но в матричном виде; во-вторых, при изменении структуры сложной системы изменяются только элементы матричного уравнения, а переход к описанию новой структуры осуществляется с помощью матрицы перехода C (или A) [4].

Для использования тензорного подхода в задачах информационных коммуникаций необходимо определить модели процессов и систем исследуемых сетей. В соответствии с работой [3] и общей моделью взаимодействия открытых систем можно определить следующие уровни, на которых необходимо исследовать схемы связи элементов сети: физический, канальный, сетевой. Следовательно, можно выделить несколько различных структур, которые в совокупности будут определять общую модель обработки информационных потоков в исследуемой сети.

Развитие технологий пакетной коммутации привело к тому, что основой для построения современных информационно-коммуникационных сетей является протокол IP, а концепция построения сетей следующего поколения получила название IMS (IP Multimedia Subsystem —

система обработки разнородных информационных потоков с использованием IP) [5]. В сети IMS основными элементами являются функциональные объекты (ФО) управления соединениями (CSCF — Call Session Control Function): прокси P-CSCF (Proху-CSCF), взаимодействия I-CSCF (Interrogating-CSCF) и обслуживания S-CSCF (Serving-CSCF); различные серверы (в том числе, HSS — Home Subscriber Server: сервер пользовательской базы данных); ФО распределения ресурсов среды (MRF — Media Resource Function). Взаимодействие ФО позволяет определить политику обработки информационных потоков и обеспечить заданное качество обслуживания.

Рассматривая интерфейсный уровень взаимодействия узлов, любое устройство IP-сети можно представить в виде сети массового обслуживания, каждая система которой будет моделировать отдельный физический интерфейс устройства передачи информации. Этот интерфейс, в свою очередь, можно представить в виде одноканальной системы массового обслуживания (СМО) с условными потерями. Пример модели такого устройства представлен на рис. 1, а.

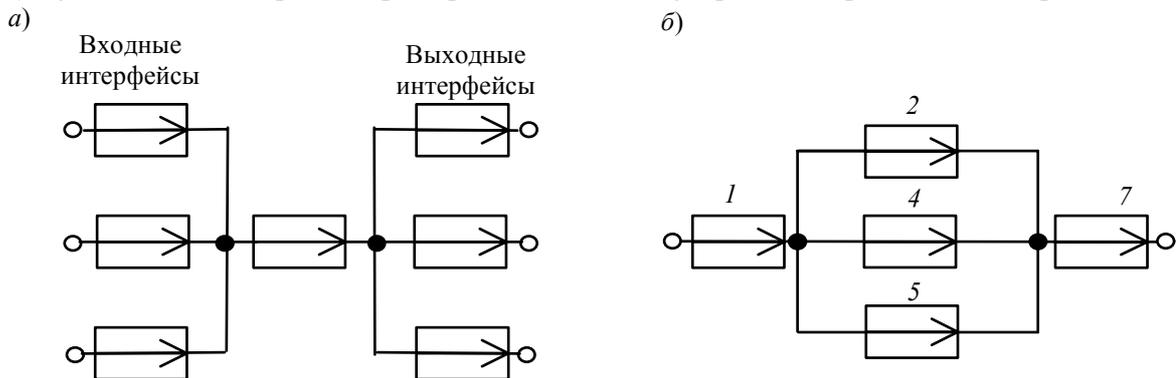


Рис. 1

На следующем уровне можно рассматривать уже не только физические соединения, существующие между узлами, а учитывать направления передачи информации к узлам сети. Каждое направление задается СМО, тип которой определяется дисциплиной обслуживания реальной системы обработки информационных потоков. Кроме того, необходимо отметить, что основные зависимости исследуемых показателей являются функциями от загрузки системы: вероятность потерь $P_{\Pi} = f(\rho)$ и время задержки $T_3 = \varphi(\rho)$, т.е. достаточно знать загрузку системы для определения искомых ВВХ.

На рис. 1, б представлена модель обработки информационных потоков на сетевом уровне модели ВОС для сети IMS, где СМО 1 моделирует процесс обслуживания ФО P-CSCF; СМО 2, 4, 5 — ФО I-CSCF, S-CSCF и MRF соответственно, а СМО 7 — обработку запросов в сервере HSS.

Значения ВВХ можно использовать для определения показателей качества обслуживания на следующем уровне, так как в реальной сети распределение потоков по узлам подчиняется таблице маршрутизации. В целях расчета ВВХ для каждого маршрута можно записать:

$P_{\Pi} \approx \sum_{i=1}^m P_{\Pi,i}$ (при малых потерях); $T_3 = \sum_{i=1}^m T_{3,i}$, где m определяется числом систем, составляющих данный маршрут передачи информации.

Тензорный анализ ВВХ информационно-коммуникационных систем основан на следующих предположениях.

1. Поток вызовов с одной и той же интенсивностью (λ) поступления определяет при неизменной интенсивности обслуживания одинаковую загрузку (ρ) устройств при изменении структуры сети; таким образом, можно считать, что будет выполняться соотношение (инвариант) [6, 7]:

$$\rho\lambda = \rho'\lambda', \quad (1)$$

где переменные $\rho\lambda$ соответствуют одной (исходной) структуре сети, а $\rho'\lambda'$ — другой (примитивной).

2. Объединение систем в единую сеть не вызывает никаких изменений процесса обслуживания информационного потока, т.е. анализ любой сложной системы (сети) связан с определением простейшего элемента, его свойств и переносом алгоритма анализа на сложную систему (сеть) в целом.

3. Изменение структуры сети не предполагает качественного изменения основных соотношений между физическими величинами, описывающими простейший элемент, а определяет только их численное изменение [4, 6—8].

Исходя из уравнения (1) и применяя соотношение между интенсивностями исходной и примитивной сетей: $\bar{\lambda}' = \bar{C}\bar{\lambda}$, можно записать: $\bar{\rho}'\bar{C}\bar{\lambda} = \bar{\rho}\bar{\lambda}$, где C — матрица перехода.* Далее, находим соотношение между нагрузками примитивной и исходной сетей как $\bar{\rho} = \bar{C}^T \bar{\rho}'$ или $\bar{\rho}' = (\bar{C}^T)^{-1} \bar{\rho}$. Следовательно, подставив полученное соотношение в выражение $\rho = \lambda T$, получим $(\bar{C}^T)^{-1} \bar{\rho} = \bar{T}' \bar{C} \bar{\lambda}$. Таким образом, можно записать $\bar{\rho} = \bar{C}^T \bar{T}' \bar{C} \bar{\lambda}$ и окончательно

$$\bar{C}^T \bar{\rho}' = (\bar{C}^T \bar{T}' \bar{C}) \bar{\lambda}. \quad (2)$$

Далее, решая полученное уравнение относительно $\bar{\lambda}$, находим коэффициенты использования устройств в исходной сети. Применительно к сетям связи, исходя из решения уравнения (2), можно найти как вероятность потерь пакетов и время их задержки (и его дисперсию), так и оценить пропускную способность сети в целом.

На рис. 2 представлена модель взаимодействия двух коммутаторов (физический уровень), при этом задержки канала связи не учитываются как величины, несоизмеримо малые относительно времени задержки в интерфейсах и в коммутационных элементах. На данном рисунке: СМО 1 и 5 (СМО 7 и 9) обозначают интерфейсы подключения внешних пользователей к исследуемой сети; СМО 3 и 8 являются моделями внутренних коммутационных элементов; СМО 2 и 4 образуют интерфейс подключения к одному коммутатору, а СМО 6 и 10 — к другому, при этом СМО 4 и 6 — входящие интерфейсы, а СМО 2 и 10 — исходящие. Пути передачи информации: 5-3-1 или 5-3-2-6-8-9, 7-8-9 или 7-8-10-4-3-1.

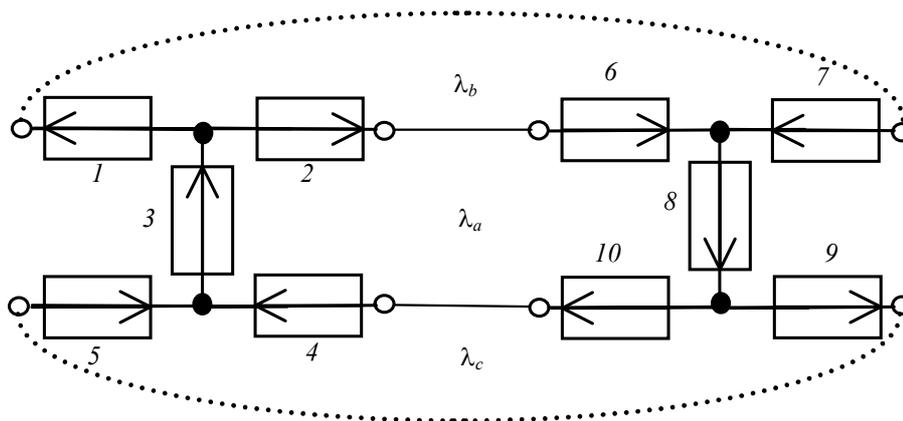


Рис. 2

Для применения контурного метода тензорного анализа ВВХ вводятся контурные интенсивности $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$, необходимые для определения связей между СМО в исследуемой сети. В данном случае, задавая направление контурных интенсивностей, определяем матрицу

* Здесь и далее черта над символами означает матрицу.

перехода \bar{C} как соотношение между контурными интенсивностями и интенсивностями в ветвях. Тогда, используя выражение (2), можно записать матричное уравнение, позволяющее определить распределение интенсивностей потоков в сети:

$$\begin{pmatrix} \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_6 + \rho_8 + \rho_{10} \\ \rho_1 - \rho_2 - \rho_6 + \rho_7 \\ -\rho_4 + \rho_5 + \rho_9 - \rho_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_g & -T_2 - T_6 & -T_4 - T_{10} \\ -T_2 - T_6 & T_1 + T_2 + T_6 + T_7 & 0 \\ -T_4 - T_{10} & 0 & T_4 + T_5 + T_9 + T_{10} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{pmatrix},$$

где $T_g = T_2 + T_3 + T_4 + T_6 + T_8 + T_{10}$.

Таким образом, определив временные параметры T_i , $i = 1 \dots 10$, и предварительное распределение загрузок ρ_i , $i = 1 \dots 10$, находим одно из возможных распределений интенсивностей в сети как интенсивность ветви: $\bar{\lambda}_b = \bar{C}\bar{\lambda}$, где $\bar{\lambda}^T = (\lambda_a \ \lambda_b \ \lambda_c)$. В данном случае для размерности множества контурных интенсивностей, равной трем, тензорный подход позволяет получить множество решений, характеризуемых различным распределением загрузки узлов. Далее, используя известные дисциплины обслуживания (M/M/1, M/D/1, M/M/s/N, M/D/1/N и т.д.), можно найти ВВХ отдельной СМО, а следовательно, и вышеуказанных маршрутов передачи информации в целом.

Для решения задачи обеспечения качества обслуживания и управления распределением потоков рассмотрим на примере сети IMS узловой метод тензорного анализа информационно-коммуникационных сетей, основанный на условии $\lambda = \mu\rho$ (где μ — интенсивность обслуживания пакетов в СМО). Ранее [6] было показано, что, определяя соответствие между нагрузками исходной ($\bar{\rho}$) и примитивной ($\bar{\rho}'$) сетей через матрицу перехода \bar{A} как $\bar{\rho}' = \bar{A}\bar{\rho}$ и используя выражение (1), можно записать: $\bar{\lambda}'\bar{A}\bar{\rho} = \bar{\lambda}\bar{\rho}$. Далее, находим соотношение между интенсивностями примитивной ($\bar{\lambda}'$) и исходной ($\bar{\lambda}$) сетей как $\bar{\lambda}' = (\bar{A}^T)^{-1}\bar{\lambda}$. Следовательно, вектор интенсивностей поступления вызовов в примитивной сети можно определить как $(\bar{A}^T)^{-1}\bar{\lambda} = \bar{\mu}'\bar{A}\bar{\rho}$. Окончательно уравнение для узлового метода будет иметь вид

$$\bar{A}^T\bar{\lambda}' = (\bar{A}^T\bar{\mu}'\bar{A})\bar{\rho}. \quad (3)$$

Решая полученное уравнение относительно $\bar{\rho}$, находим коэффициенты использования узлов в сети (при загрузке ветвей $\bar{\rho}_b = \bar{A}\bar{\rho}$), что позволяет определить качественные показатели (например, время задержки для маршрута) и распределение интенсивностей потоков по узлам сети как $\bar{\lambda}_b = \bar{\mu}_b\bar{\rho}_b$.

Преобразуем модель, представленную на рис. 1, б, к узловому виду (рис. 3): в местах образования контуров произведем „размыкание“ связей между СМО, но в дальнейшем необходимо учитывать равенство интенсивностей поступления вызовов в соответствующих ветвях, для чего введены мнимые СМО 3 и б; зададим „узловые загрузки“. Узловые загрузки $\rho_a \dots \rho_g$, представленные на рис. 3, являются элементами вектора $\bar{\rho}$, относительно которого решается уравнение (3). Связь загрузок ρ_i , $i = 1 \dots 10$, и узловых загрузок $\rho_a \dots \rho_g$ устанавливается матрицей перехода \bar{A} . Находя соответствие между нагрузками в исходной и примитивной сетях, определяем матрицу A согласно [9] (ввиду большой размерности здесь не приводится). При этом левая часть уравнения (3) преобразуется к виду (с учетом $\lambda_1 = \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5$, $\lambda_7 = \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_6$ и $\lambda_2 = \lambda_3$, $\lambda_5 = \lambda_6$)

$$A^T \bar{\lambda}' = (0 \quad \lambda_2 \quad -\lambda_2 \quad 0 \quad \lambda_5 \quad -\lambda_5 \quad \lambda_7)^T.$$

Кроме того, так как генератором трафика является СМО 1, то все интенсивности поступления вызовов в остальные СМО могут быть определены через λ_1 . С этой целью в уравнение вводятся коэффициенты p_i , определяющие долю трафика, поступающего на i СМО. При этом, исходя из структуры модели сети, необходимо учитывать, что $p_2 + p_4 + p_5 = 1$. Используя вектор управления, содержащий вероятности разделения нагрузки по узлам $(p_2 \quad p_4 \quad p_5)$, можно управлять распределением трафика по узлам сети в целях обеспечения определенного значения среднего времени задержки по заданному маршруту при установленном значении интенсивности потоков. Например, при заданном λ_1 , определенных значениях интенсивности обслуживания в каждой системе и использовании интерфейса системы массового обслуживания вида М/М/1 в качестве модели можно, изменяя значения коэффициентов p_2 , p_4 и p_5 , определить общее среднее время задержки в сети как $T_3 = \sum_{i=1}^7 \frac{1/\mu_i}{1-\rho_i}$ (без учета мнимых ветвей); ρ_i определяется как нагрузка узлов $\bar{\rho}_y = \bar{A}\bar{\rho}$ согласно решению уравнения (3) относительно $\bar{\rho}$. Следует отметить, что зависимость распределения загрузки от λ_1 можно получить выбором другого базиса (набора других „узловых загрузок“).

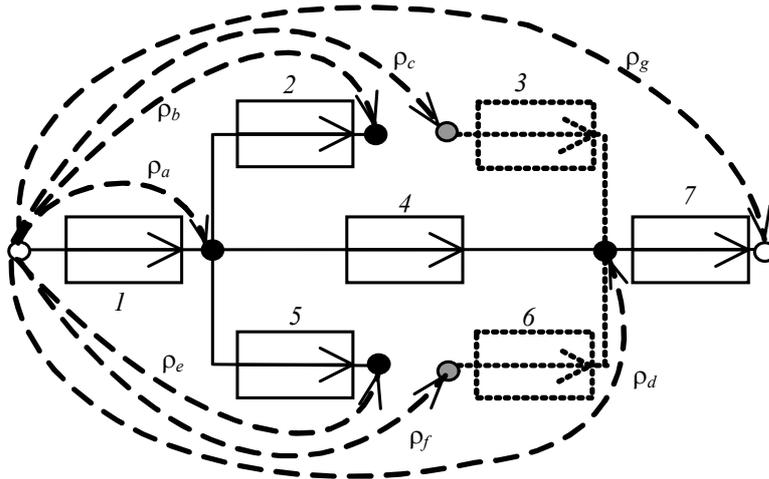


Рис. 3

В качестве преимущества тензорного анализа необходимо также отметить невысокую сложность вычислительного алгоритма. В соответствии с [8] мощность пространства состояний для однородных замкнутых сетей составляет Q_{N+M-1}^{M-1} (M — число центров обслуживания, N — количество требований в сети), что естественно приводит к резкому увеличению сложности расчетов показателей работы информационно-коммуникационных сетей, особенно при современном уровне глобализации. Использование вычислительных алгоритмов позволяет снизить сложность определения исследуемых параметров. Например, в работе [8] оценка сложности итерационного алгоритма представлена как $2NM(N+1)$ арифметических операций для определения нормализующей константы, с помощью которой находятся остальные параметры: средняя очередь, среднее время задержки, стационарные вероятности. При определении вероятностно-временных характеристик сети с применением тензорного анализа вычислительная сложность алгоритма обуславливается только количеством узлов и связана с перемножением матриц в соответствии с выражением (2) или (3) в зависимости от метода. Например, при использовании контурного метода количество операций можно оце-

нить как $(M - k)(2M^2 + M - 1)$, где k — количество контуров. Однако в отличие от вычислительных методов тензорный подход сохраняет возможность аналитического исследования информационно-коммуникационной сети и позволяет использовать полученные результаты для оптимизации сети и управления качеством обслуживания информационных потоков без ограничения на классы потоков и дисциплин обслуживания [9].

В заключение можно сделать следующий вывод: в связи с необходимостью управления большим количеством устройств и обработки множества информационных потоков с заданным качеством обслуживания решение задачи эффективного управления ресурсами сети значительно усложняется. Тензорный анализ сетей — как метод, обладающий возможностями учета взаимодействия процессов и структур и гибкостью применения, — позволяет снизить вычислительные затраты на решение задачи, уменьшить задержки при динамическом управлении информационно-коммуникационными системами и обеспечить хорошую масштабируемость сети как при внедрении новых услуг, так и при изменении структуры и технологий сети. Кроме того, тензорный анализ позволяет достаточно просто формализовать проектные процедуры в целях автоматизации процесса проектирования сетей IMS [10], что обеспечивает повышение качества обслуживания информационных потоков в сетях, работающих на базе стека протоколов TCP/IP, равномерную загрузку устройств сети и снижение времени задержки, обусловленной сетевыми приложениями в транзитных и оконечных узлах сети связи.

Работа выполнена при поддержке Президента Российской Федерации, грант МК-2070.2008.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клейнрок Л. Коммуникационные сети. М.: Наука, 1970.
2. Яновский Г. Г. Качество обслуживания в IP сетях // Вестник связи. 2008. № 1. С. 65—74.
3. Braun T., Diaz M., Gabeiras J., Staub T. End-to-End Quality of Service over Heterogeneous Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
4. Крон Г. Тензорный анализ сетей. М.: Сов. радио, 1978.
5. Гольдштейн А. Б., Гольдштейн Б. С. SOFTSWITCH. СПб: БХВ, 2006.
6. Пономарев Д. Ю. Тензорная методология в телекоммуникациях // Системы управления и информационные технологии. 2006. 1.1(23). С. 161—165.
7. Пономарев Д. Ю. Исследование возможностей тензорного анализа сетей массового обслуживания // Имитационное моделирование. Теория и практика / ИММОД—2007: Сб. докл. Третьей Всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. СПб: ЦНИИТС, 2007. Т. 1. С. 205—209.
8. Вишневецкий В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003.
9. Пономарев Д. Ю. Исследование возможности использования тензорного анализа сетей к управлению качеством обслуживания в сети IMS // Тр. Третьей Междунар. конф. „Системный анализ и информационные технологии“, САИТ – 2009. М.: ИСА РАН, 2009. С. 722—728.
10. Пономарев Д. Ю. Исследование характеристик пакетных сетей узловым методом тензорного анализа // Программные продукты и системы. 2009. № 4. С. 65—69.

Сведения об авторе

Дмитрий Юрьевич Пономарев

— канд. техн. наук, доцент; Институт инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета, кафедра инфокоммуникаций, Красноярск; E-mail: DPonomarev@sfu-kras.ru

Рекомендована кафедрой
инфокоммуникаций

Поступила в редакцию
19.03.10 г.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 623.5

А. В. КРАСИЛЬНИКОВ

ПОВОРОТНЫЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЕГО ГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Представлено схемотехническое решение гидродинамического стенда для опытной отработки пусковых устройств необитаемых малогабаритных подводных аппаратов в условиях производственных помещений, обеспечивающего возможность имитации глубоководного пуска подводного аппарата под углом к горизонту. Рассматривается проектная методика оценки габаритных характеристик стенда.

Ключевые слова: автономные необитаемые подводные аппараты, динамический пуск, испытания, гидродинамический стенд, габаритные характеристики.

Опыт создания современной подводной техники показывает, что из-за трудностей с получением корректного теоретического описания иногда до 40 % возникающих проблем решаются с помощью испытаний. Это позволяет говорить о том, что организация испытаний опытных и серийных образцов техники является одной из ключевых технологических задач при создании технически сложной продукции. Проведение, в частности, испытаний пусковых устройств подводных аппаратов (ПА) в натуральных условиях действующих подводных и надводных кораблей требует, помимо привлечения значительных финансовых и кадровых ресурсов, учета постоянно изменяющихся внешних факторов, из-за чего своевременное планирование исследований во многих случаях невозможно (подробнее о задачах испытаний необитаемых ПА см. работу [1]). Поэтому для решения указанных проблем разрабатываются специализированные гидродинамические стенды (ГДС), которые по завершении проектных исследований используются как технологические при сдаче пусковых систем подводных аппаратов заказчику.

При участии автора был разработан [2] вариант схемотехнического оформления такого стенда, обеспечивающего возможность имитации пуска подводного аппарата под углом к горизонту. Схема продольного сечения стенда приведена на рис. 1.

Стенд содержит прочный резервуар-имитатор 1, включающий обечайку 2, замыкаемую днищами 3 и 4, стянутыми при помощи штанг 5. Резервуар заполнен жидкостью 6, так что в верхней его части образуется демпфирующая полость 7. На днище 3 герметично установлены шлюзовая камера 8 с откидывающейся крышкой 9 и пусковой блок 10, обеспечивающий пуск макета 11 подводного аппарата. На штангах 5 неподвижно закреплены рамочные кронштейны 12 с направляющими элементами, а также тормозное устройство 13, задняя часть которого размещена в установленной в днище 4 технологической камере 14, обеспечивающей доступ к задней крышке устройства 13. Объем демпфирующей полости 7 частично оформлен в виде

баллона-ресивера 15, который через невозвратный клапан 16 соединен с полостью стенда. Днище 3 снабжено опорной тележкой 17 с возможностью ее перемещения относительно обечайки 2 резервуара по неподвижно установленным направляющим 18. К обечайке 2 приварены оси, шарнирно закрепленные в основаниях 19, что позволяет осуществить поворот стенда на угол от 0 до 90° в вертикальной плоскости. Поворот стенда обеспечивается работой гидравлического привода 20. Для работы стенда в вертикальной плоскости под углом к горизонту предусмотрена технологическая щель 21, крышка 22 которой с помощью оси 23 выполнена поворотной, что позволяет разместить в щели 21 пусковое устройство 10. На схеме показаны также датчики 24 положения макета 11, снабженного кольцевой магнитной меткой 25, относительно переднего среза пускового блока 10; кабель 26 связи датчиков 24 с измерительно-регистрирующей и управляющей аппаратурой 27; узел 28 герметизации кабеля 26. Тормозное устройство 13 имеет направляющий блок 29, обтюрирующие переборки 30, буфер 31 и прочную крышку 32, доступ к которой осуществляется через горловину 33 технологической камеры 14.

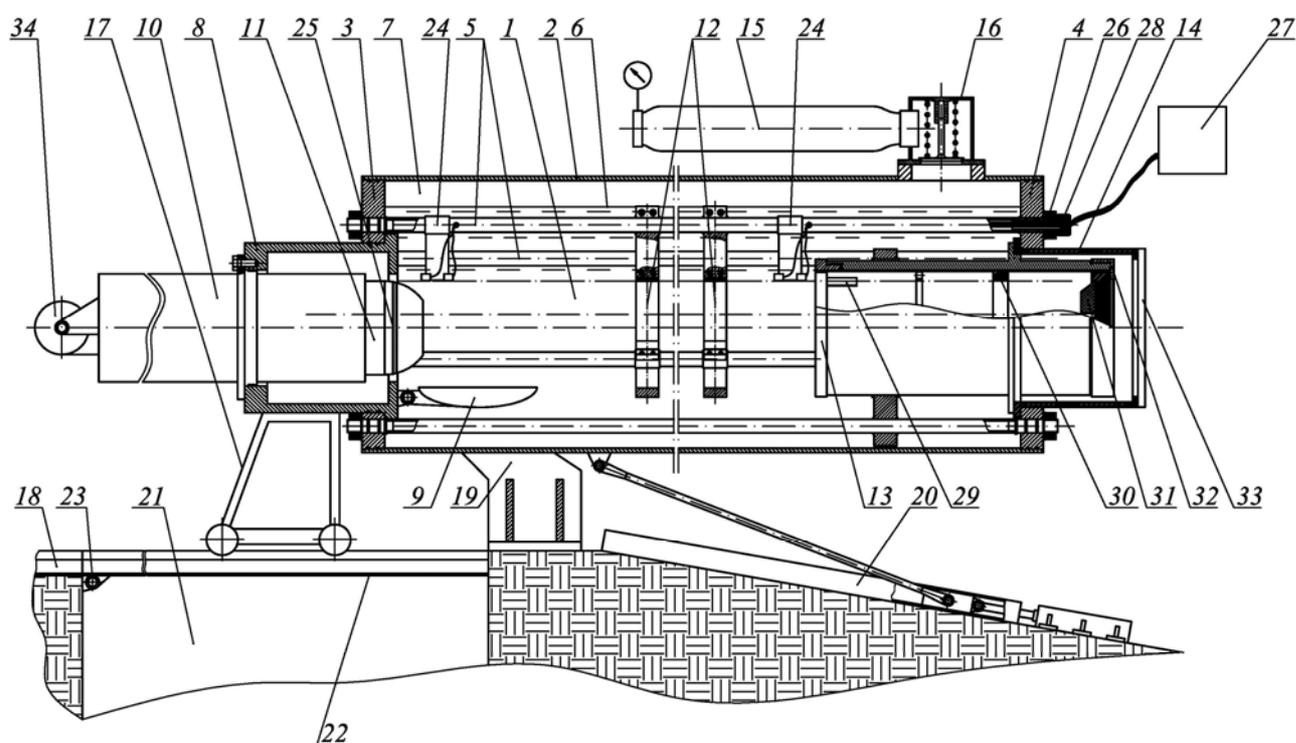


Рис. 1

Установка и настройка аппаратуры стенда под параметры исследуемого конкретного образца пускового устройства осуществляются при его подготовке к работе. Для этого днище 3 совместно с элементами 8, 5, 12, 24 и 13 с помощью тележки 17 выдвигается из обечайки 2 и перемещается по направляющим 18 до положения, обеспечивающего свободный доступ ко всем перечисленным узлам стенда. После этого к шлюзовой камере 8 с помощью крепежного устройства, например болтов, подсоединяется испытываемое пусковое устройство с обеспечением соосности с ним направляющих элементов кронштейнов 12 и обтюрирующих колец 30 тормозного устройства 13. Датчики 24 устанавливаются по месту для регистрации динамических выходных характеристик макета подводного аппарата. По окончании монтажа собранная конструкция перемещается внутрь обечайки до упора тормозного устройства 13 его бортиком в технологическую камеру 14. При этом концы штанг 5 входят в отверстия днища 4 и закрепляются гайками.

Перед началом испытаний все полости стенда находятся под атмосферным давлением. С помощью заливного устройства и системы вентиляции (на схеме не показаны) внутренняя полость резервуара-имитатора заполняется жидкостью (используемым в пусковом блоке ингибитором или водой). Посредством клапанов системы воздуха среднего давления (не обозначены на схеме) в демпфирующую полость подается воздух (также может использоваться инертный газ, например азот) до достижения установочного давления, имитирующего внешние условия работы пускового блока на глубине. Стенд подготовлен к работе.

По команде от аппаратуры 27 срабатывает пусковой блок 10, макет 11 выталкивается в резервуар, что сопровождается увеличением давления в демпфирующей полости 7. Под действием разности давлений в резервуаре-имитаторе 1 и в ресивере 15 открывается невозвратный клапан 16, в результате чего давление в одной части демпфирующей полости (внутри резервуара) уравнивается с давлением в другой ее части (внутри ресивера). После этого клапан закрывается, разъединяя две части демпфирующей полости, что позволяет в случае снятия давления в резервуаре сохранять давление в ресивере и тем самым способствовать экономии сжатого газа. Перемещение макета фиксируется аппаратурой 27 с помощью датчиков 24.

После полного выхода макета подводного аппарата из пускового блока его носовая часть входит в тормозное устройство 13. За счет обтюрации макета в переборках 30 давление в полости тормозного устройства возрастает, что обуславливает торможение макета (подробнее см. работу [3]). После обеспечиваемого катушкой 34 возврата подводного аппарата в пусковое устройство и восполнения энергетического запаса последнего в демпфирующей полости заново формируется требуемое давление. Стенд готов к следующему срабатыванию.

В случае необходимости имитации пуска макета подводного аппарата под углом к горизонтальной плоскости опорная тележка 17 отсоединяется от шлюзовой камеры 8 и перемещается по направляющим 18 в крайнее левое (см. рис. 1) по отношению к стенду положение. Затем часть направляющих убирается внутрь технологической щели 21 за счет поворота вокруг оси 23. После этого с помощью гидравлического привода 20 готовый к срабатыванию стенд разворачивается на требуемый угол и фиксируется относительно горизонта, при этом пусковое устройство 10 может частично или полностью входить в технологическую щель 21.

Для проведения диагностики пускового блока 10 или его замены аналогичным по массогабаритным характеристикам пусковым устройством шлюзовая камера закрывается крышкой, затем давление в шлюзовой камере снимается и находящаяся в ней жидкость удаляется с помощью системы заполнения/осушения (на схеме не показана). После этого пусковой блок может быть демонтирован.

При замене пускового блока 10, требующей корректировки состава и расположения внутренних элементов стенда, снимается давление в демпфирующей полости и производится слив жидкости из резервуара 1. После этого на стенде может быть смонтировано новое пусковое устройство в соответствии с описанной выше последовательностью работ.

Рассмотрим методику проектной оценки габаритных размеров такого стенда. Исходя из габаритных размеров подводных аппаратов, предполагаемых к испытаниям, оценим значения основных конструктивных параметров ГДС (рис. 2).

Объем воздушной демпфирующей полости ГДС вычисляется как

$$V_{в.п} = V_1 + V_2,$$

где V_1 — объем воздушной демпфирующей полости камеры-имитатора, m^3 ; V_2 — дополнительный объем демпфирующей полости, m^3 .

При этом исходя из полученных автором эмпирических данных площадь f_1 поперечного сечения воздушной подушки камеры-имитатора должна составлять от двух до трех площадей поперечного сечения подводного аппарата ($f_{ПА}$), т.е.

$$f_1 \geq (2,0 \dots 3,0) f_{ПА}.$$

Расстояния a_2 и a_3 (см. рис. 2) должны быть приблизительно, как минимум, равны диаметру подводного аппарата:

$$a_2 \cong a_3 \cong d_{\text{ПА}}.$$

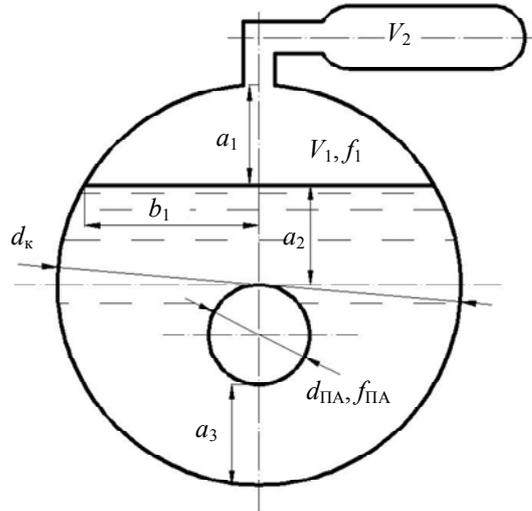


Рис. 2

Основываясь на диаметре ПА, можно произвести оценку высоты a_1 воздушной демпфирующей полости и диаметра d_k камеры-имитатора. Для этого систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} f_1 &\cong \frac{2}{3} a_1 2b_1, \\ b_1^2 &= a_1 3d_{\text{ПА}} \end{aligned} \right\}$$

следует решить относительно a_1 :

$$a_1 \cong \sqrt[3]{\frac{3f_1^2}{16d_{\text{ПА}}}},$$

тогда

$$d_k = a_1 + 3d_{\text{ПА}} \cong \sqrt[3]{\frac{3f_1^2}{16d_{\text{ПА}}}} + 3d_{\text{ПА}}.$$

Для оценки объема демпфирующей полости ГДС необходимо оценить длину L_k камеры-имитатора. Основные размеры стенда, используемые для такой оценки, показаны на рис. 3, где 1 — подводный аппарат, 2 — пусковое устройство, 3 — камера-имитатор, 4 — тормозное устройство.

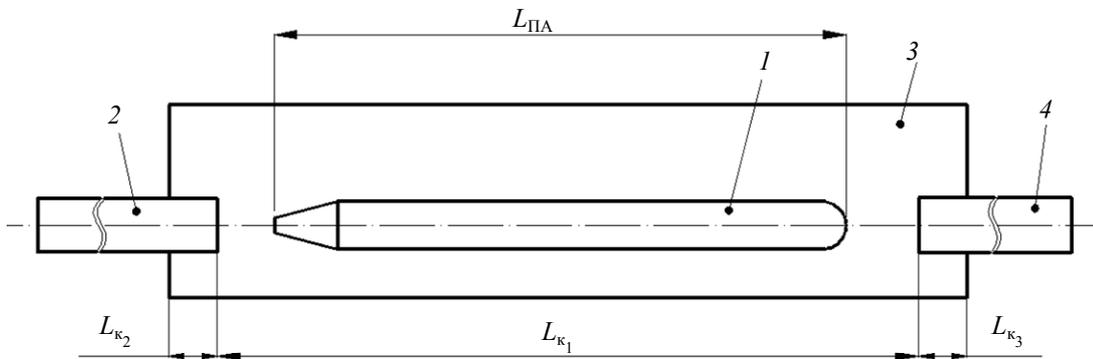


Рис. 3

Длина L_k камеры-имитатора определяется как (см. рис. 3)

$$L_k = L_{k1} + L_{k2} + L_{k3},$$

при этом длина $L_{к1}$ может быть определена из соотношения $L_{к1} \geq L_{ПА} + 3d_{ПА}$, а длины $L_{к2}$ и $L_{к3}$ оцениваются из конструктивных соображений: $L_{к2} \geq d_{ПА}$, $L_{к3} \geq d_{ПА}$. Таким образом, общая длина камеры-имитатора ориентировочно составляет

$$L_{к} \geq L_{ПА} + 5d_{ПА}.$$

Объем воздушной демпфирующей полости камеры-имитатора определяется как $V_1 = f_1 L_{к}$, а дополнительный объем формируется путем включения в состав демпфирующей полости стандартного баллона, выпускаемого промышленностью, и может быть оценен как $V_2 > V_1$. Тогда объем камеры-имитатора

$$V_{к} = \frac{\pi}{4} d_{к}^2 L_{к} + V_2.$$

Использование предложенной конструкции гидродинамического стенда позволяет повысить производительность опытных работ, качественно сократить финансовые, трудовые и временные затраты и расширить сферу исследовательских возможностей гидродинамических стендов. Представленные аналитические зависимости позволяют, при наличии данных о характеристиках предполагаемых к испытаниям подводных аппаратов, определить основные габаритные размеры гидродинамического стенда рассмотренной конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников А. В. Разработка методик и аппаратуры для технической диагностики и прогнозирования работоспособности пусковых устройств подводных аппаратов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.
2. Гидродинамический стенд / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников. Заявка на изобретение № 2011120959, 2011.
3. Пат. 87510 РФ. Устройство торможения движущегося в жидкости тела. Полезная модель / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников. 2009.

Сведения об авторе

Антон Валентинович Красильников

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения;
E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
03.10.11 г.

В. П. КАЛЯВИН, Ч. В. НГУЕН, Х. Т. ТА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРЕБНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Рассматривается возможность применения метода чувствительности функции передачи для анализа диагностической модели гребной электрической установки в целях построения алгоритма проверки степени ее работоспособности.

Ключевые слова: гребная электрическая установка, диагностическая модель, диаграмма прохождения сигналов, диагностическое обеспечение.

Разработка диагностического обеспечения при проектировании гребной электрической установки (ГЭУ) начинается с выбора типа или построения ее диагностической модели, метод анализа которой с использованием теории чувствительности функции передачи является возможным перспективным направлением исследований.

В настоящей статье рассматривается метод анализа диагностической модели ГЭУ в виде диаграммы прохождения сигналов (ДПС) ориентированного графа. Использование для анализа модели теории чувствительности функции передачи [1] позволяет на основе функциональной схемы ГЭУ построить ДПС; на следующем этапе выбираются контрольные точки и диагностические признаки модели; далее определяется последовательность проверок блоков модели по частотным характеристикам ГЭУ и на последнем этапе составляется алгоритм проверки степени ее работоспособности.

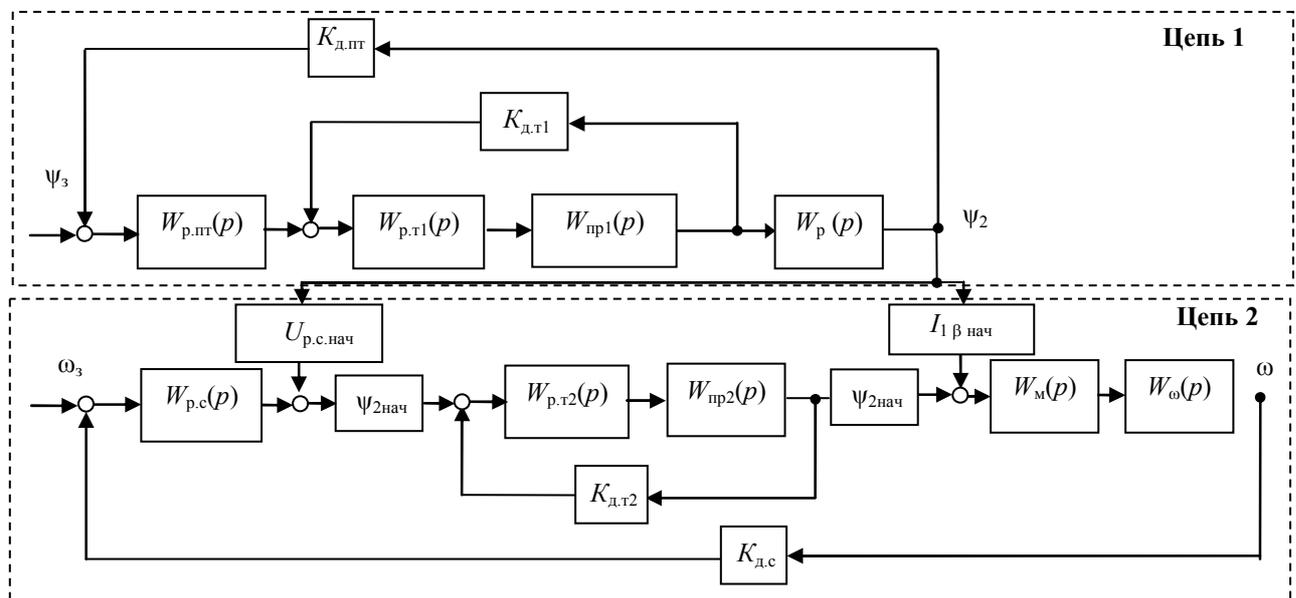


Рис. 1

Функциональная схема гребной электрической установки [2] представлена на рис. 1, где цепь 1 — схема регулирования потокосцепления, цепь 2 — схема регулирования частоты вращения; $W_{p.пт}(p)$, $W_{p.т1}(p)$, $W_{p.т2}(p)$, $W_{p.с}(p)$ — передаточные функции (ПФ) регуляторов потокосцепления, токов и скорости вращения вала гребного электродвигателя (ГЭД) соответственно; $K_{д.пт}$, $K_{д.т1}$, $K_{д.т2}$, $K_{д.с}$ — коэффициенты датчиков; $W_{п.ч}(p)$ — передаточная функция преобразователя частоты; $W_p(p)$, $W_m(p)$, $W_\omega(p)$ — передаточные функции цепи ротора, электромагнитного момента и частоты вращения ГЭД соответственно; Ψ_2 , Ψ_3 — потокосцепление и

заданное значение потокосцепления; ω, ω_3 — частота вращения вала ГЭД и ее заданное значение; $\psi_{2\text{нач}}, U_{p.c.\text{нач}}$ — начальные значения потокосцепления и напряжения регулятора скорости вращения ГЭД (в настоящей работе эти значения будем считать равными единице); $W_{\text{пр1}}(p), W_{\text{пр2}}(p)$ — передаточные функции преобразователя тока; $I_{1\beta\text{нач}}$ — начальное значение составляющей тока статора по оси β .

В схеме учитывается возможность регулирования не только потокосцепления, но и частоты вращения вала гребного винта по принципу векторного управления. В данном случае системе стабилизации потокосцепления ротора обеспечивается условие автономности [2].

Диаграмма прохождения сигналов представляет собой ориентированный граф — графическое изображение соотношений между несколькими переменными. Для построения диагностической модели ГЭУ в виде ДПС (рис. 2) на основе функциональной схемы принято следующее:

— вершины диаграммы (0...5, 0...7) соответствуют переменным (параметрам ГЭУ) и обозначаются индексом соответствующего сигнала;

— ветви диаграммы ($w_{1...7}, a_{1...9}$) имеют операторы (передаточные функции), обозначенные соответствующей зависимостью с указанием направления;

— физические величины, приведенные на функциональной схеме ГЭУ (см. рис. 1) обозначены как напряжения сигналов, проходящих в ветвях диаграммы: $U_{3.t1}, U_{3.t2}, U_{3.c}$ — сигналы задания тока и скорости вращения ГЭД соответственно; U_α, U_β — сигналы составляющих тока по осям α и β соответственно; $U_{п.ч.\alpha}, U_{п.ч.\beta}$ — сигналы преобразователя частоты по осям α и β ; $U_{i.d}$ — сигнал тока статора.

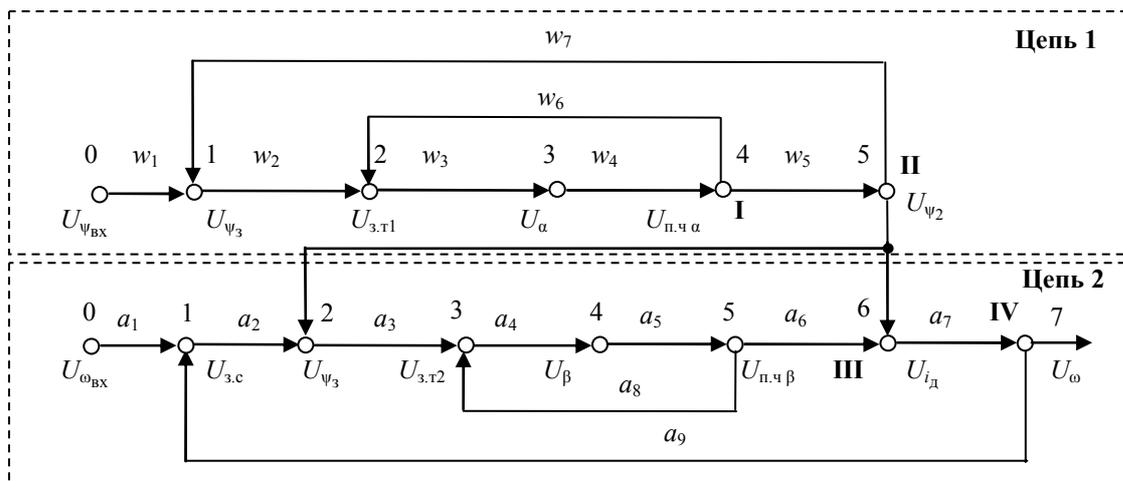


Рис. 2.

Анализ диагностической модели показывает, что операторы в разной степени влияют на работоспособность системы в зависимости от их местоположения на диаграмме. Степень влияния можно оценивать абсолютной и относительной чувствительностью функции передачи ГЭУ к изменению операторов.

Абсолютная чувствительность определяется по формуле [3]

$$F_{W_{ij}}^{T_{0k}} = \frac{\partial T_{0k}}{\partial W_{ij}} = \frac{\partial}{\partial W_{ij}} \left(P_k \frac{\Delta_k}{\Delta} \right);$$

на практике чаще применяется формула для относительной чувствительности функции передачи:

$$S_{W_{ij}}^{T_{0k}} = \frac{\partial \ln T_{0k}}{\partial \ln W_{ij}} = \frac{\partial T_{0k}}{\partial W_{ij}} \frac{W_{ij}}{T_{0k}} = \frac{F_{W_{ij}}^{T_{0k}} W_{ij}}{T_{0k}},$$

где T_{0k} — функция передачи в цепи (от входа к выходу k); P_k — „прямой“ путь прохождения сигнала; Δ — определитель подграфа; Δ_k — определитель подграфа „не охватывающего“ прямой путь P_k .

Выбор необходимых контрольных точек осуществляется с помощью анализа таблиц чувствительности функций [4]. Анализ таблиц сводится к сравнению функций $S_{W_{ij}}^{T_{0k}}$ и нахождению в результате функции передачи, которая является наилучшей согласно следующему правилу: функция передачи T_n важнее функции T_m , если чувствительность $S_{W_{ij}}^{T_n} > S_{W_{ij}}^{T_m}$.

В результате анализа таблиц выбираются контрольные точки (на рис. 2 эти точки обозначены как I, II, III, IV) и строится алгоритм проверок контроля состояния ГЭУ в случае снижения степени ее работоспособности.

Контрольные точки определяют порядок проверок и соответствуют следующим параметрам: напряжению преобразователя частоты $U_{п.ч.}$, потокосцеплению ψ_2 , току статора i_d и частоте вращения грибоного винта $\omega_{г.в.}$. Таким образом, совокупность диагностических признаков для ГЭУ формируется как

$$\Xi_{ГЭУ} = (U_{п.ч.}, \psi_2, i_d, \omega_{г.в.}).$$

Для разработки алгоритма поиска причин, приводящих к снижению степени работоспособности ГЭУ, применяется метод чувствительности функции передачи к изменениям отдельных операторов в разных контрольных точках по частотным характеристикам [1], в результате чего определяется последовательность проверки всех операторов ГЭУ.

Заменив оператор интеграла p в каждой ПФ на $j\omega$, можно определить (на фиксированных частотах) логарифмические чувствительности [1]:

$$\frac{\partial \ln A(\omega)}{\partial \ln A_l(\omega)} = \left| \frac{\partial A(\omega)}{\partial A_l(\omega)} \frac{A_l(\omega)}{A(\omega)} \right|; \quad \frac{\partial \ln \varphi(\omega)}{\partial \ln \varphi_l(\omega)} = \left| \frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \varphi_l(\omega)} \frac{\varphi_l(\omega)}{\varphi(\omega)} \right|,$$

где $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ и $A_l(\omega)$, $\varphi_l(\omega)$ — амплитудная и фазовая частотные характеристики соответственно ГЭУ и l -го оператора.

В этом случае применяется критерий

$$u_l = \left| \frac{\partial A(\omega_i)}{\partial A_l(\omega_i)} \frac{A_l(\omega_i)}{A(\omega_i)} \right| + \left| \frac{\partial \varphi(\omega_i)}{\partial \varphi_l(\omega_i)} \frac{\varphi_l(\omega_i)}{\varphi(\omega_i)} \right|,$$

где l — номер оператора, для которого вычисляется u_l .

При этом частотные характеристики определяются следующим образом:

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{a^2(\omega) + b^2(\omega)}{c^2(\omega) + d^2(\omega)}}; \quad \varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{b(\omega)c(\omega) - a(\omega)d(\omega)}{a(\omega)c(\omega) + b(\omega)d(\omega)} \right),$$

где

$$a(\omega) = \cos(\Sigma_0 \Pi_0); \quad b(\omega) = \sin(\Sigma_0 \Pi_0); \quad \Pi_0 = \prod_{i \in N_k} A_i(\omega); \quad \Sigma_0 = \sum_{i \in N_k} \varphi_i(\omega);$$

$$c(\omega) = 1 + \sum_{k=1}^n \Pi_k \cos \Sigma_k; \quad d(\omega) = \sum_{k=1}^n \Pi_k \sin \Sigma_k; \quad \Pi_k = \prod_{i \in N_k} A_i(\omega); \quad \Sigma_k = \sum_{i \in N_k} \varphi_i(\omega),$$

здесь N_k — множество индексов вершин на прямом пути P_k .

В зависимости от расположения оператора на диаграмме значение критерия u_l будет определяться различными выражениями [1].

Алгоритм вычислений критерия u_i для нахождения причины снижения степени работоспособности ГЭУ разработан на основе программы языка Visual C (рис. 3). Алгоритм используется для ГЭУ переменного тока, в которой присутствуют четыре контура в диаграмме прохождения сигналов. Возможно применение алгоритма для любого объекта, имеющего более одного контура, диагностическая модель которого описывается в виде ДПС. Исходными данными для алгоритма являются:

- заданная функциональная схема для расчета в виде файла .txt, в том числе, количество операторов в схеме (G) и число замкнутых контуров (C);
- диаграмма прохождения сигналов по прямым путям и обратным связям;
- число контрольных точек ($КТ_i$) и их расположение на схеме;
- фиксированная частота ω_i .

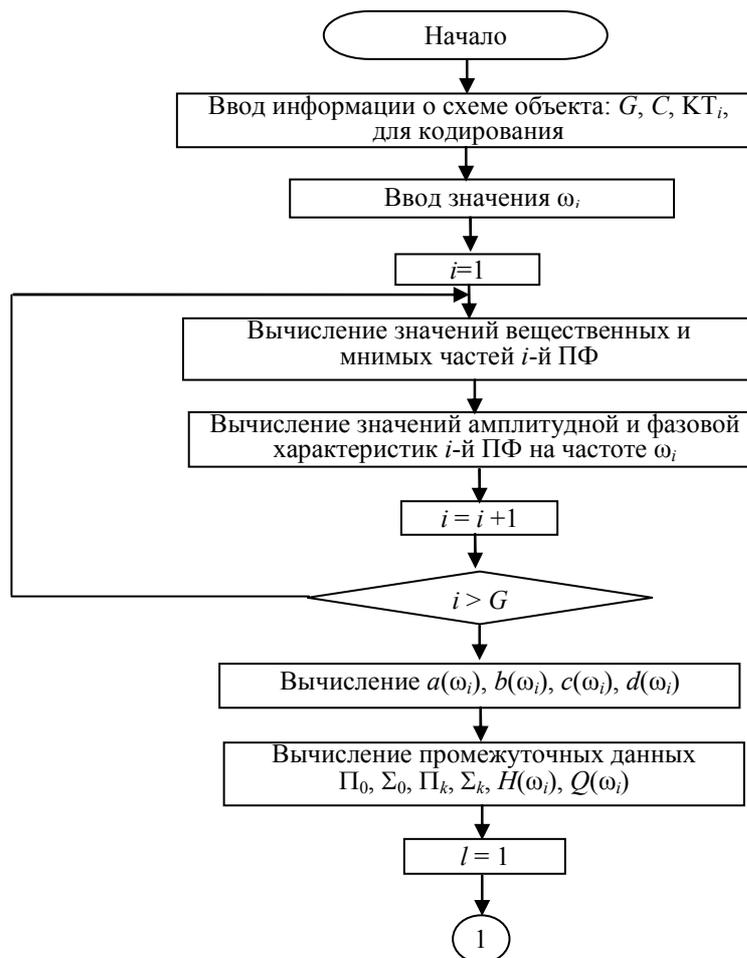
Алгоритм предусматривает последовательное вычисление:

- значений вещественных $Re(\omega_i)$ и мнимых $Im(\omega_i)$ частей всех ПФ в комплексной форме: $Re(\omega_i) + j Im(\omega_i)$;

- значений амплитудной A_i и фазовой φ_i характеристик i -й ПФ на частоте ω_i ;

- значений частотных характеристик $a(\omega_i)$, $b(\omega_i)$, $c(\omega_i)$, $d(\omega_i)$ и промежуточных коэффициентов $H(\omega_i)$, $Q(\omega_i)$.

Далее, в зависимости от положения операторов на диаграмме выделяются три варианта (обозначаемые как Index=1, 2, 3) вычисления критерия u_i , после чего осуществляется упорядочение его значения по убыванию.



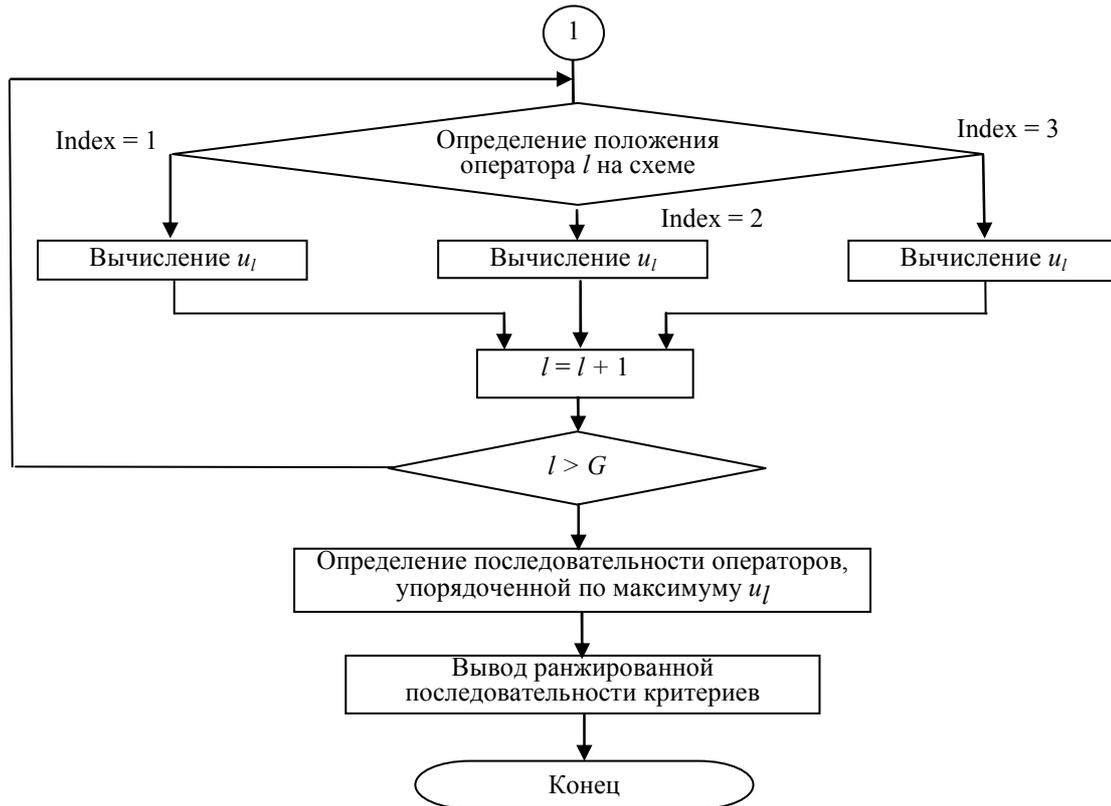


Рис. 3

Представленные в статье метод определения контрольных точек для гребной электрической установки и алгоритм вычисления чувствительности всех ПФ ГЭУ по критерию частотных характеристик позволяют оценить состояние ГЭУ и реализовать алгоритм поиска причины снижения ее степени работоспособности, что обеспечивает частичное решение задачи разработки диагностического обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мозгалецкий А. В., Калявин В. П., Костанди Г. Г. Диагностирование электронных систем / Под ред. А. В. Мозгалецкого. Л.: Судостроение, 1984.
2. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами: Учеб. пособие. Л.: Энергоиздат, 1982.
3. Ким Р. П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
4. Калявин В. П., Рыбаков Л. М. Надежность и диагностика элементов электроустановок: Учеб. пособие. СПб: Элмор, 2009.

Сведения об авторах

- Владимир Петрович Калявин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматического управления
- Чьен Ван Нгуен** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматического управления; E-mail: qc_etu@yahoo.com
- Хай Тхань Та** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматического управления; E-mail: thanhhai136@yahoo.com

Рекомендована кафедрой
систем автоматического управления

Поступила в редакцию
15.04.11 г.

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.197

Т. О. МЫСЛИВЦЕВ

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АЛГОРИТМА ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ НАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ К ВОЗМУЩЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ НАБЛЮДЕНИЯ

Предлагается методика оценки чувствительности алгоритма вторичной обработки навигационных измерений в радиолокационной системе к возмущениям параметров модели наблюдения и погрешностям в исходных данных. Использование приведенной методики позволяет сделать вывод об объеме и качестве требуемых исходных данных, необходимых при решении задачи вторичной обработки.

Ключевые слова: вторичная обработка, модель наблюдения, навигационные параметры, матрица наблюдений.

Одним из примеров навигационной задачи, часто возникающей на практике, является задача определения параметров движения искусственного спутника Земли (ИСЗ) по данным навигационных измерений. Эта радионавигационная задача решается, как правило, с использованием сложных многопараметрических радиолокационных станций (РЛС). Окончательная оценка параметров движения формируется после вторичной обработки (ВО) измерений текущих параметров движения объекта, по результатам которой определяются параметры его траектории. В качестве таких параметров обычно используются либо значения координат и составляющих вектора скорости ИСЗ в выбранной системе отсчета в некоторый начальный момент времени, либо оскулирующие параметры орбиты [1, 2]. При этом на точность решения оказывают влияние следующие факторы:

- точность описания модели движения ИСЗ;
- корректность модели описания связи пространства измерений и пространства состояний системы;
- состав и объем измерительной выборки;
- погрешность измерения навигационных параметров;
- выбранная система координат, точность задания констант, геодезическая привязка фазового центра антенны и ряд других параметров.

Влияние указанных факторов на окончательное решение, как правило, неравномерно. Так, неполный состав измерительной выборки может привести к тому, что матрица, описывающая связь пространства измерений и пространства состояний объекта, будет плохо обусловленной, что, в свою очередь, вызовет существенные погрешности при решении задачи. При этом увеличение объема измерений, не связанное с улучшением наблюдаемости навигационных параметров, практически не повлияет на окончательное решение. К такому же ре-

зультату могут привести погрешности в задании этой матрицы, вызванные недостаточной информативностью модели. Кроме того, при больших погрешностях измерений существенное увеличение точности описания модели движения ИСЗ практически не повлияет на итоговое решение, но приведет к увеличению вычислительных затрат. Таким образом, для оценки эффективности алгоритма вторичной обработки навигационных измерений необходимо проанализировать чувствительность решения к ошибкам задания исходных данных и на основе полученных точностных оценок сделать вывод об объеме и качестве требуемой исходной информации применительно к конкретной РЛС.

При решении навигационной задачи измеряемыми параметрами сигнала $S(t, v)$ являются: время запаздывания сигнала (τ), доплеровский сдвиг частоты (F_d), разность времен запаздывания ($\Delta\tau$) и разность доплеровских сдвигов частоты (ΔF_d). В общем виде их можно представить вектором $v = [\tau, F_d, \Delta\tau, \Delta F_d]^T$. Параметры сигнала однозначно связаны с навигационными параметрами объекта: $r = [R, \dot{R}, \alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}]^T$, где R — дальность до объекта, \dot{R} — его радиальная скорость, α — угол азимута, β — угол места, $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$ — их производные.

Не останавливаясь подробно на задаче вторичной обработки, приведем основные соотношения, применяемые для ее решения.

При погрешностях измерений, распределенных по нормальному закону, максимально правдоподобная оценка параметров траектории q , в общем случае, определяется как результат решения итерационной задачи с использованием, например, метода Гаусса — Ньютона:

$$\hat{q}_N = \hat{q}_{N-1} + (A^T K^{-1} A)^{-1} A^T K^{-1} \Delta r, \quad (1)$$

где \hat{q}_N — оценка параметров траектории при N -й итерации; $A = \frac{\partial r(\hat{q}_{N-1})}{\partial q^T}$ — $n \times m$ -матрица

частных производных от измеряемых навигационных параметров r по параметрам траектории q в точке \hat{q}_{N-1} ; K — корреляционная $n \times n$ -матрица погрешностей измерения навигационных параметров; Δr — разность измеренных и расчетных значений навигационных параметров.

Основной особенностью данной задачи является ее итерационный характер, так как выбранный алгоритм оптимизации проводит линеаризацию целевой функции вблизи истинного решения (метод Гаусса — Ньютона) либо аппроксимирует ее квадратичной зависимостью (метод Ньютона — Рафсона). Таким образом, для отдельных итераций задача ВО в общем случае сводится к решению операторного уравнения первого рода в дискретной форме [3]:

$$Ax = b, \quad (2)$$

где в качестве вектора x выступает вектор поправок к начальным условиям движения объекта, а в качестве вектора b — вектор Δr .

Если измерения не коррелированы и равноточны, то решение представляет собой оценку минимума второй нормы невязки:

$$\|b - Ax\|_2 = \min_{g \in \mathbb{R}(A)} \|b - Ag\|_2. \quad (3)$$

Задача состоит в определении неизвестного вектора x по известному вектору b и матрице A . В силу ограниченности знаний о законах движения ИСЗ и факторах, влияющих на параметры его движения, практически всегда приходится решать задачу определения траектории при неточно заданной матрице A . Кроме того, погрешности определения матрицы A могут быть обусловлены приближенным описанием связи пространства измерений и пространства состояний объекта. Речь, прежде всего, идет о некомпенсируемых тропосферной и

ионосферной погрешностях измерений текущих навигационных параметров. Таким образом, особенность данной задачи заключается в том, что вектор b исходных данных и матрица A известны с некоторой погрешностью; в этом случае линейная система (2) примет следующий вид:

$$A_{\delta}x = b_{\delta}, \quad (4)$$

где $A_{\delta} = A + \delta A$ — возмущенная матрица системы (в общем случае размерности $n \times m$), A — точная матрица системы, δA — матрица возмущения; $b_{\delta} = b + \delta b$ — вектор измерения навигационных параметров, δb — вектор погрешностей задания исходных данных, который не может быть рассмотрен отдельно от вектора b , поэтому $b_{\delta} = Ax + \delta b$.

Как правило, при накоплении большого числа статистических данных матрица A становится переопределенной, и классическое решение уравнения (4) формируется с помощью обобщенной обратной матрицы [3].

Положим, что матрица A_{δ} не вырождена, а вектор b отличен от нуля, при этом $n \geq m$. Тогда в соответствии с выражением (4) можно записать уравнение

$$A_{\delta}^T A_{\delta}x = A_{\delta}^T b_{\delta}, \quad (5)$$

решение которого, в отличие от решения уравнения (4), как правило, существует, т.е. существует такой вектор $\hat{x} = x + \delta x$, что

$$A_{\delta}^T A_{\delta}\hat{x} = A_{\delta}^T b_{\delta} \quad (6)$$

или, раскрывая соответствующие параметры, $(A + \delta A)^T (A + \delta A)(x + \delta x) = (A + \delta A)^T (b + \delta b)$.

Поскольку $A_{\delta}^T A_{\delta}$ — квадратная $m \times m$ -матрица, то решение уравнения (6) примет следующий вид:

$$\hat{x} = (A_{\delta}^T A_{\delta})^{-1} A_{\delta}^T b_{\delta}. \quad (7)$$

Матрица $(A_{\delta}^T A_{\delta})^{-1} A_{\delta}^T$ называется обобщенной обратной матрицей для матрицы A_{δ} .

Можно показать [4, 5], что относительная норма погрешности решения уравнения $A_{\delta}\hat{x} = b_{\delta}$ при ошибках в исходных данных будет удовлетворять неравенству

$$\frac{\|\hat{x} - x\|}{\|x\|} = \frac{\|\delta x\|}{\|x\|} \leq \frac{2\text{cond}_2(A) \|\delta b\|}{\cos \theta \|b\|} + 2(\text{cond}_2(A)^2 \text{tg } \theta + \text{cond}_2(A)) \frac{\|\delta A\|}{\|A\|} + O(\varepsilon^2), \quad (8)$$

где $\text{cond}_2(A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\|$ — число обусловленности матрицы A , рассчитанное по второй норме (всюду в выражении используется вторая норма), которое характеризует близость матрицы A к вырожденной матрице; θ — угол между векторами b и Ax , рассчитываемый из соотношения $\|Ax\| = \|b\| \cos \theta$ и определяющий меру того, насколько хорошо решение задачи согласуется с исходными данными [4]; $O(\varepsilon^2)$ — малая величина порядка ε^2 при $\varepsilon = \max\{\|\delta A\|/\|A\|, \|\delta b\|/\|b\|\}$.

Соотношение (8) определяет верхнюю границу погрешностей вычисления поправок к начальным условиям движения объекта, оценив которую, можно сделать вывод об эффективности решения задачи вторичной обработки.

Для существующих РЛС, которые определяют параметры движения ИСЗ, решается задача калибровки и юстировки измерительных каналов. При решении этой задачи устраняют-

ся систематические составляющие погрешности измерений. Поэтому вектор b и его погрешности δb , как правило, остаются постоянными (изменяются в незначительных пределах), и при анализе чувствительности алгоритма ВО их значения можно зафиксировать на уровне технических характеристик измерительных каналов РЛС.

Рассмотрим матрицу наблюдения $A_\delta = A + \delta A$, которая характеризует связь пространства измерений и пространства состояний системы. Если эта связь некорректно описывает физические процессы, определяющие движение объекта и функции погрешностей измерений навигационных параметров, то ошибки решения могут быть существенными. Это следует из анализа выражения (8), где погрешности определения матрицы наблюдения связаны с квадратом числа обусловленности $\text{cond}(A)$.

Погрешности определения матрицы A можно разделить на две группы. К первой группе относятся погрешности, обусловленные неточностью описания модели движения ИСЗ. Величину этих погрешностей будем задавать исходя из количества используемых гармоник геопотенциала при интегрировании уравнений движения ИСЗ. Ко второй группе следует отнести некомпенсируемые погрешности определения навигационных параметров, вызванные влиянием среды распространения сигнала, прежде всего тропосферы и ионосферы.

Рассмотрим задачу ВО при следующих параметрах орбиты ИСЗ: наклонение $98,01^\circ$; прямое восхождение $45,46^\circ$; эксцентриситет $0,0042$; аргумент перигея $288,58^\circ$; средняя аномалия $71,07^\circ$, среднее количество движения (оборотов в сутки) $14,54907930242273$. РЛС расположена в пункте с координатами (59,9 с.ш. 30,3 в.д.). Измерительная выборка содержит четыре текущих навигационных параметра: $\mathbf{r} = [R, \dot{R}, \alpha, \beta]^T$, и состоит из 150 измерений каждого из них с шагом измерения 1 с. Погрешности измерений представлены двумя вариантами задания СКО: 1 — $\sigma_R = 10$ м, $\sigma_{\dot{R}} = 0,15$ м/с, $\sigma_{\alpha, \beta} = 1'$; 2 — $\sigma_R = 100$ м, $\sigma_{\dot{R}} = 1$ м/с, $\sigma_{\alpha, \beta} = 3'$.

Относительная погрешность при задании измерительной выборки определяется как $\varepsilon_b = \|\delta b\|/\|b\| = 5,67e-006$ для первого варианта и $\varepsilon_b = 7,94e-005$ — для второго.

В рассматриваемых условиях относительная погрешность задания матрицы A , вызванная неточностью описания модели движения ИСЗ, определяется как

$$\varepsilon_{A(36)} = \frac{\|\delta A\|}{\|A\|} = \frac{\|A_{36, \Delta} - A_{36}\|}{\|A_{36, \Delta}\|} = 7,79e-009,$$

где цифровой индекс (36) при матрице показывает количество гармоник геопотенциала, используемых при интегрировании уравнения движения спутника, а Δ характеризует учет параметров сопротивления атмосферы и лунно-солнечные возмущения. Для модели, в которой учитываются 16 гармоник геопотенциала, относительная погрешность $\varepsilon_{A(16)} = 2,24e-008$, при учете трех гармоник — $\varepsilon_{A(3)} = 2,75e-007$.

Для простоты оценку верхней границы погрешностей будем производить для первой поправки выражения (1), так как при последующих итерациях оценки будут совпадать с учетом масштаба поправки. Исходя из постановки задачи, для достаточно хорошего соответствия исходных данных их модельному описанию, угол θ примем равным $6,97^\circ$.

На рис. 1 представлен график зависимости числа обусловленности матрицы A от количества обрабатываемых измерений (Q). При построении графика изменялось количество измерений азимута, угла места и радиальной скорости при фиксированном ($Q = 150$) количестве измерений дальности до ИСЗ.

На рис. 2, а, б представлены графики рассчитываемой по соотношению (8) зависимости верхней границы погрешностей вычисления поправок к вектору начальных условий движения

объекта ($\|\delta x\|/\|x\|$) от количества измерений при различных параметрах описания модели движения ИСЗ и точности задания исходных данных.

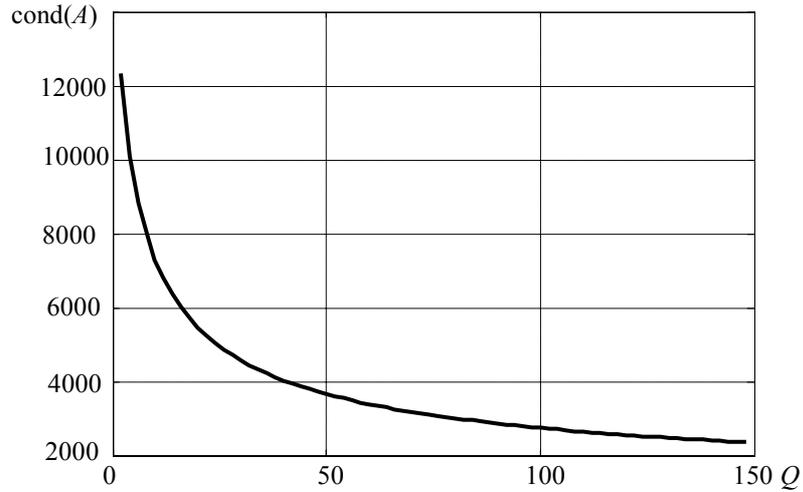
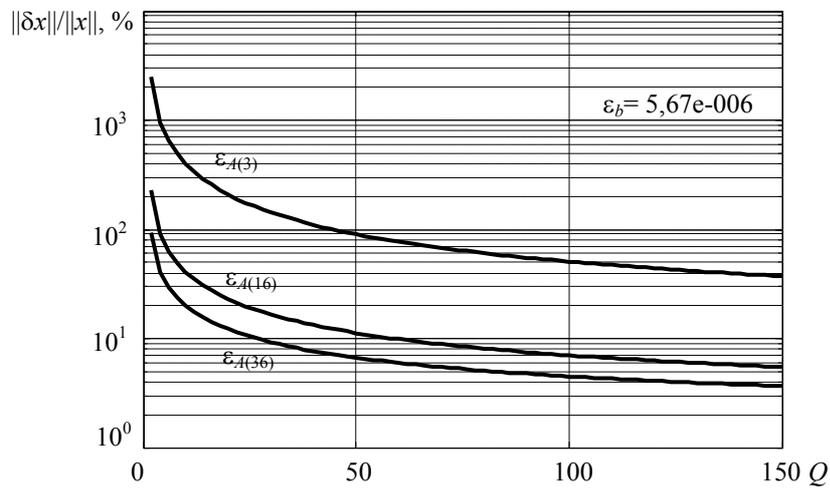


Рис. 1

а)



б)

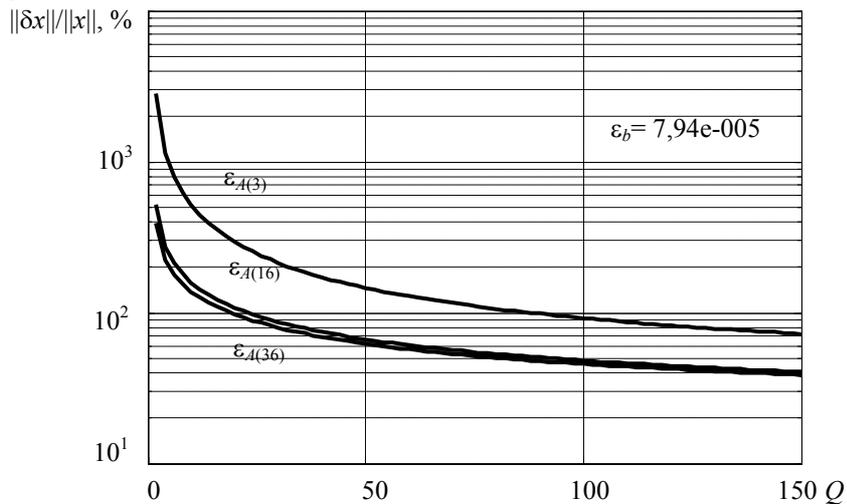


Рис. 2

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

1. Точность получаемых оценок существенно зависит от параметров модели наблюдения и состава измерительной выборки.

2. При достаточно высокой точности измерений точное описание модели движения ИСЗ имеет определяющее значение. Так, для получения оценок с точностью не хуже 10 % модель, в которой используются три гармоники геопотенциала, неприемлема. При полной измерительной выборке (150 измерений всех параметров) верхняя граница погрешностей вычисления поправок к вектору начальных условий достигает 37 % (см. рис. 2, а). В то же время при низкой точности измерений повышение точности описания матрицы системы не приводит к увеличению точности решения. При полной измерительной выборке верхняя граница погрешностей достигает 38 % при использовании 36 гармоник и 40 % — при использовании 16 гармоник (см. рис. 2, б).

3. В рассмотренном примере для получения оценок параметров орбиты ИСЗ с точностью не хуже 10 % необходимо проведение 60 измерений ($\varepsilon_b = 5,67e-006$) при использовании 16 гармоник геопотенциала в описании модели движения ИСЗ. Если погрешность задания исходных данных велика ($\varepsilon_b = 7,94e-005$, см. рис. 2, б), то единственный способ повышения точности решения — компенсация погрешности на основе анализа геофизической обстановки в зоне функционирования РЛС либо переход к методам смещенного оценивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы радионавигационных измерений: Учебник для вузов / В. А. Губин, А. А. Костылев, Б. Г. Мельников и др.; Под ред. Н. Ф. Клюева. МО СССР, 1987. 430 с.
2. Космические траекторные измерения / П. А. Агаджанов, Н. М. Барабанов, Н. И. Буренин и др.; Под ред. П. А. Агаджанова, В. Е. Дулевича, А. А. Коростелева. М.: Сов. радио, 1969. 352 с.
3. Костылев А. А., Степанов М. Г. Смещенные оценки и метод регуляризации в радиотехнических задачах. МО СССР, 1984. 84 с.
4. Уоткинс Д. С. Основы матричных вычислений: Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 664 с.
5. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. Матричные вычисления: Пер. с англ. М.: Мир, 1999. 548 с.

Сведения об авторе

Тимофей Олегович Мысливцев — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра антенно-фидерных, передающих устройств и средств СЕВ, Санкт-Петербург; E-mail: tim33@list.ru

Рекомендована кафедрой
антенно-фидерных, передающих
устройств и средств СЕВ

Поступила в редакцию
11.07.11 г.

А. М. ЛЕСТЕВ, А. В. ЕФИМОВСКАЯ

О ВЛИЯНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С ДВУХМАССОВЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Анализируется влияние нелинейных факторов на динамику двухмассового и одномассового микромеханических гироскопов типа L-L. Обосновывается более высокая стабильность технических характеристик двухмассовой конструкции по сравнению с одномассовой.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, нелинейные факторы, стабильность технических характеристик, резонансные кривые.

Повышение точности и надежности технических характеристик микромеханических гироскопов (ММГ) — актуальная научно-техническая проблема современной микросистемной техники [1]. Решение этой проблемы осуществляется конструкторско-технологическими и схемотехническими методами [2]. Одно из направлений повышения точности и стабильности технических характеристик ММГ — разработка многомассовых конструкций приборов этого типа (некоторые конструктивные схемы многомассовых ММГ представлены в работе [3]). В настоящей статье приводятся результаты исследований влияния нелинейных факторов — нелинейной зависимости сил упругости подвеса инерционных масс и электростатических сил контура подстройки частот колебательной системы ММГ — на динамику чувствительного элемента ММГ типа L-L [4] и обосновывается более высокая стабильность технических характеристик ММГ с двумя инерционными массами по сравнению с одномассовой конструкцией прибора. В линейной постановке аналогичная задача рассматривалась в работе [5].

Описание конструкции ММГ приведено в патенте [4]. Конструкция прибора содержит две инерционные массы, подвешенные на упругих элементах в рамке, которая, в свою очередь, упругими элементами связана с корпусом прибора. Конструкция упругого подвеса обеспечивает перемещение рамки вместе с инерционными массами вдоль оси X (первичные колебания), а инерционных масс относительно рамки — вдоль оси Y (вторичные колебания). Ось чувствительности ММГ ортогональна плоскости рамки. В конструкции прибора предусмотрена система вибровозбуждения и стабилизации параметров первичных колебаний чувствительного элемента ММГ и контур подстройки частот, позволяющий электростатическим способом осуществлять изменение спектра частот колебательной системы ММГ.

Кинематическая схема и конечно-элементная модель колебательной системы ММГ в программном комплексе ANSYS приведены на рис. 1, *а*, *б*, соответственно. На основе конечно-элементной модели производится выбор параметров конструкции ММГ [6]. Первые три собственные частоты колебательной системы ММГ равны 5 659, 6 920 и 6 936 Гц.

Приведем дифференциальные уравнения движения инерционных масс ММГ при вращении основания прибора вокруг оси чувствительности с угловой скоростью Ω . С рамкой ММГ свяжем систему координат $OXYZ$, направив ось X в направлении перемещения рамки, ось Y — в направлении перемещений инерционных масс, ось Z — вдоль оси чувствительности прибора. Примем, что рамка ММГ вместе с инерционными массами приводится электростатическим виброприводом в колебания вдоль оси по закону $x = -a_x \sin \omega t$ и реализуется режим стабилизации параметров колебаний рамки. Обозначим через y_1 и y_2 перемещения инерционных масс вдоль оси Y относительно рамки, отсчитываемые от положений статического равновесия. Силы упругости подвеса инерционных масс определим выражениями

$C_{yj}(y_j) = C_{yj}y_j + \chi_{yj}y_j^3$, $j = 1, 2$, где C_{yj} и χ_{yj} — коэффициенты линейной и нелинейной составляющих сил упругости. Учитывая введенные обозначения, дифференциальные уравнения движения инерционных масс запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} m_1\ddot{y}_1 + \mu_{y1}\dot{y}_1 + (C_{y1} + C_{y2} - m_1\Omega^2)y_1 - C_{y2}y_2 &= 2m_1\Omega a_x \omega \cos \omega t - (\chi_{y1} + \chi_{y2})y_1^3 + \chi_{y2}y_2^3; \\ m_2\ddot{y}_2 + \mu_{y2}\dot{y}_2 + (C_{y2} - m_2\Omega^2)y_2 - C_{y2}y_1 &= 2m_2\Omega a_x \omega \cos \omega t - \chi_{y2}y_2^3 + \chi_{y2}y_1^3 - \\ &- E(\Delta - y_2) + E(\Delta + y_2), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где m_1, m_2 — массы инерционных элементов, μ_{y1}, μ_{y2} — коэффициенты демпфирования, а электростатические силы контура подстройки частот ММГ определяются выражениями [3]

$$E(\Delta \pm y_2) = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2(\Delta \pm y_2)^2},$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная вакуума, ε — относительная диэлектрическая постоянная среды между электродами датчика силы, S — площадь взаимного перекрытия электродов датчика силы, U — напряжение, подаваемое на электроды датчика силы, Δ — номинальный зазор между электродами датчика силы.

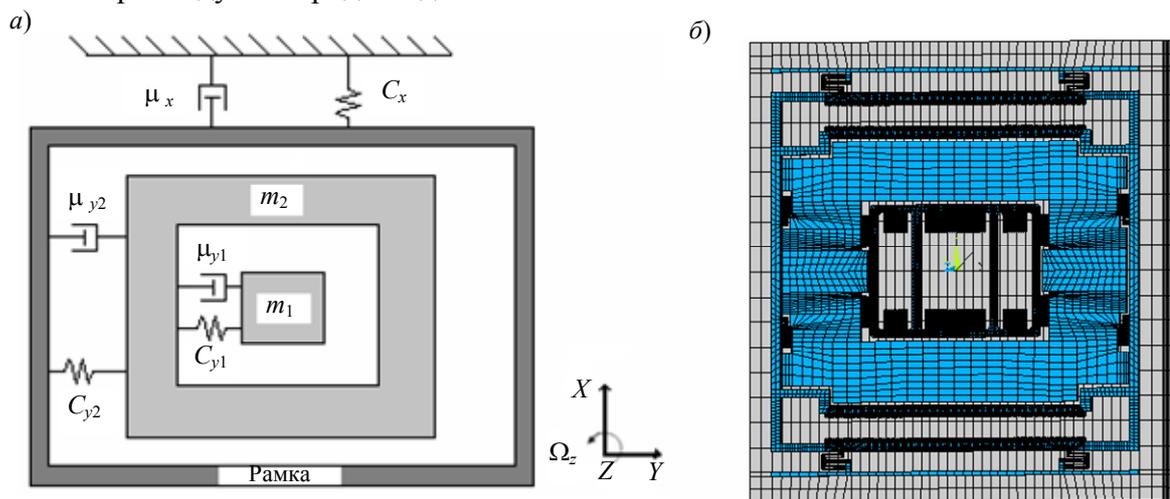


Рис. 1

Учитывая, что параметры ММГ удовлетворяют условию $y_2/\Delta < 1$, разложим функции $E(\Delta \pm y_2)$ в степенные ряды и ограничимся членами не выше третьего порядка по отношению к y_2/Δ :

$$E(\Delta + y_2) - E(\Delta - y_2) = \frac{4l_0}{\Delta^3} y_2 + \frac{8l_0}{\Delta^5} y_2^3, \quad l_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S U^2}{2}. \quad (2)$$

Решение системы уравнений (1) с учетом выражения (2) найдем в виде $y_j = A_j \sin \omega t + \varphi_j$, $j = 1, 2$, используя метод гармонической линеаризации [7] и полагая $y_j^3 = q_j y_j$, $q_j = \frac{3}{4} A_j^2$. Введем оператор дифференцирования по времени $p \equiv \frac{d}{dt}$ и представим систему дифференциальных уравнений движения инерционных масс ММГ в виде векторного уравнения

$$f(p)Y = 2a_x \omega \Omega \cdot \operatorname{Re} \left\{ \left\| \begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} \right\| e^{i\omega t} \right\}, \quad (3)$$

где

$$Y = \left\| \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \end{matrix} \right\|, \quad f(p) = \left\| \begin{matrix} p^2 + 2h_1 p + n_1^2 & -s_1 \\ -s_2 & p^2 + 2h_2 p + n_2^2 \end{matrix} \right\|;$$

$$n_1^2 = \frac{1}{m_1} \left(C_{y1} + C_{y2} + \frac{3}{4} \chi_{y1} A_1^2 \right), \quad n_2^2 = \frac{1}{m_2} \left[C_{y2} - \frac{4l_0}{\Delta^3} + \frac{3}{4} \left(\chi_{y2} - \frac{8l_0}{\Delta^5} \right) A_2^2 \right];$$

$$s_1 = \frac{1}{m_1} \left(C_{y2} + \frac{3}{4} \chi_{y2} A_2^2 \right), \quad s_2 = \frac{1}{m_2} \left(C_{y2} + \frac{3}{4} \chi_{y2} A_1^2 \right), \quad 2h_j = \frac{\mu_j}{m_j}, \quad j = 1, 2.$$

При записи уравнения (3) учтено, что для реальных конструкций ММГ и условий эксплуатации $\Omega/\omega \ll 1$.

Из уравнения (3) следует

$$Y = 2a_x \omega \Omega \cdot \operatorname{Re} \left\{ \frac{F(p)}{D(p)} \left\| \begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} \right\| e^{i\omega t} \right\}, \quad (4)$$

где $F(p)$ — присоединенная матрица для матрицы $f(p)$:

$$F(p) = \left\| \begin{matrix} p^2 + 2h_2 p + n_2^2 & s_2 \\ s_1 & p^2 + 2h_1 p + n_1^2 \end{matrix} \right\|;$$

$$D(p) \equiv \det f(p) = \sum_{j=0}^4 d_j p^{4-j}, \quad d_0 = 1, \quad d_1 = 2(h_1 + h_2), \quad d_2 = n_1^2 + n_2^2 + 4h_1 h_2,$$

$$d_3 = 2(h_1 n_2^2 + h_2 n_1^2), \quad d_4 = n_1^2 n_2^2 - s_1 s_2.$$

Выполнив вычисления в соответствии с выражением (4), получим уравнения, определяющие резонансные кривые колебаний инерционных масс ММГ:

$$\left. \begin{aligned} A_1 \left[(\omega^4 - d_2 \omega^2 + d_4)^2 + \omega^2 (d_3 - d_1 \omega^2)^2 \right] &= 2a_x \omega \Omega \left\{ \left[(n_2^2 + s_2 - \omega^2)(\omega^4 - d_2 \omega^2 + d_4) + \right. \right. \\ &\left. \left. + 2h_2 \omega^2 (d_3 - d_1 \omega^2) \right]^2 + \left[2h_2 \omega (\omega^4 - d_2 \omega^2 + d_4) - \omega (d_3 - d_1 \omega^2) (n_2^2 + s_2 - \omega^2) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \\ A_2 \left[(\omega^4 - d_2 \omega^2 + d_4)^2 + \omega^2 (d_3 - d_1 \omega^2)^2 \right] &= 2a_x \omega \Omega \left\{ \left[(n_2^2 + s_1 - \omega^2)(\omega^4 - d_2 \omega^2 + d_4) + \right. \right. \\ &\left. \left. + 2h_1 \omega^2 (d_3 - d_1 \omega^2) \right]^2 + \left[2h_1 \omega (\omega^4 - d_2 \omega^2 + d_4) - \omega (d_3 - d_1 \omega^2) (n_2^2 + s_1 - \omega^2) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Если во втором из уравнений системы (1) положить $y_1 = 0$, получим уравнение движения чувствительного элемента одномассового ММГ типа L-L по оси измерения параметров колебаний, а из выражений (5) — уравнение резонансной кривой колебаний инерционной массы:

$$A_2 \left\{ \left[\hat{n}_2^2 - \omega^2 - \frac{3}{4m_2} \left(\chi_{y2} - \frac{8l_0}{\Delta^5} \right) A_2^2 \right]^2 + 4h_2^2 \omega^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = 2a_x \omega \Omega, \quad (6)$$

$$\text{где } \hat{n}_2^2 = \frac{1}{m_2} \left(C_{y2} - \frac{4l_0}{\Delta^3} \right).$$

Определяемые уравнением (6) периодические движения с частотой ω инерционной массы ММГ устойчивы [8] при

$$Q \equiv \left[\hat{n}_2^2 - \omega^2 - \frac{3}{4m_2} \left(\chi_{y2} - \frac{8l_0}{\Delta^5} \right) A_2^2 \right] \left[\hat{n}_2^2 - \omega^2 - \frac{9}{4} \left(\chi_{y2} - \frac{8l_0}{\Delta^5} \right) A_2^2 \right] + 4h_2^2 \omega^2 > 0$$

и неустойчивы при $Q < 0$.

На рис. 2 приведены резонансные кривые ($A_2(\omega)$) колебаний инерционной массы одно-массового гироскопа ($m_2=1,02e-6$ кг), полученные численным решением уравнения (6) в пакете программ MatLab. На рисунке область неустойчивости ($Q < 0$) выделена штриховкой. Части резонансной кривой, расположенные в области $Q > 0$, соответствуют устойчивым периодическим движениям с частотой ω инерционной массы ММГ, а части резонансной кривой, расположенные в области $Q < 0$, — неустойчивым движениям. При изменении частоты возбуждения от значения $\omega > \omega_1$ (рис. 2, а) или значения $\omega < \omega_1$ (рис. 2, б) инерционная масса ММГ совершает колебания с амплитудами, соответствующими верхним частям резонансных кривых. При значении $\omega = \omega_1$ происходит скачкообразное изменение амплитуды и инерционная масса при дальнейшем уменьшении (рис. 2, а) или увеличении (рис. 2, б) частоты ω совершает движения с амплитудами, соответствующими нижним частям резонансных кривых. Таким образом, нелинейная зависимость сил упругости подвеса и электростатических сил контура подстройки частот в одномассовой конструкции ММГ приводит к появлению неустойчивых ветвей резонансных кривых, срывам колебаний и скачкам амплитуд колебаний чувствительных элементов прибора.

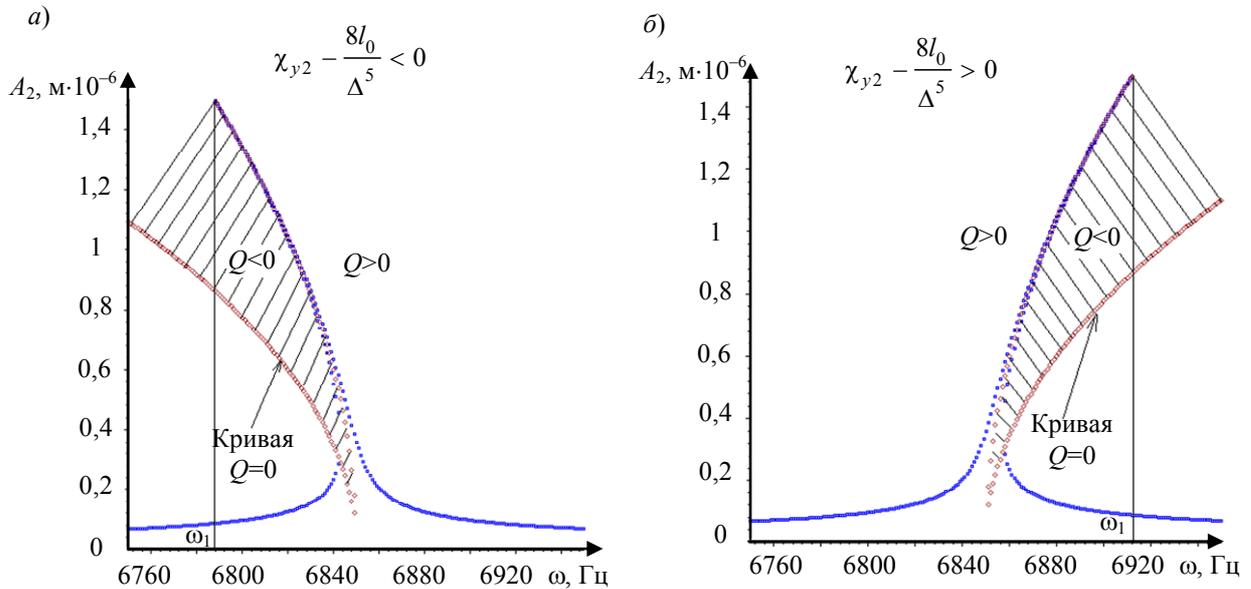


Рис. 2

На рис. 3 представлены резонансные кривые ($A_2(\omega)$) колебаний инерционной массы двухмассового ММГ ($m_1=3,95e-6$ кг, $m_2=1,02e-6$ кг), полученные численным решением уравнений (5). Здесь сплошными линиями показаны резонансные кривые линейной системы ($\chi_{y1}, \chi_{y2}, l_0 = 0$), точками — резонансные кривые нелинейной системы. Резонансные кривые $A_2(\omega)$ приведены в окрестностях значений частот вибрационного воздействия, близких к главным частотам колебательной системы ММГ. Резонансные кривые $A_1(\omega)$ аналогичны кривым $A_2(\omega)$. Нелинейная зависимость сил упругости подвеса инерционных масс и электростатических сил контура подстройки частот ММГ приводит к деформациям резонансных

кривых и смещению максимумов амплитуд колебаний инерционных масс в направлении возрастания частот ω вибрационного возбуждения при $\chi_{y2} - \frac{8l_0}{\Delta^5} > 0$ и в направлении уменьшения частот ω при $\chi_{y2} - \frac{8l_0}{\Delta^5} < 0$.

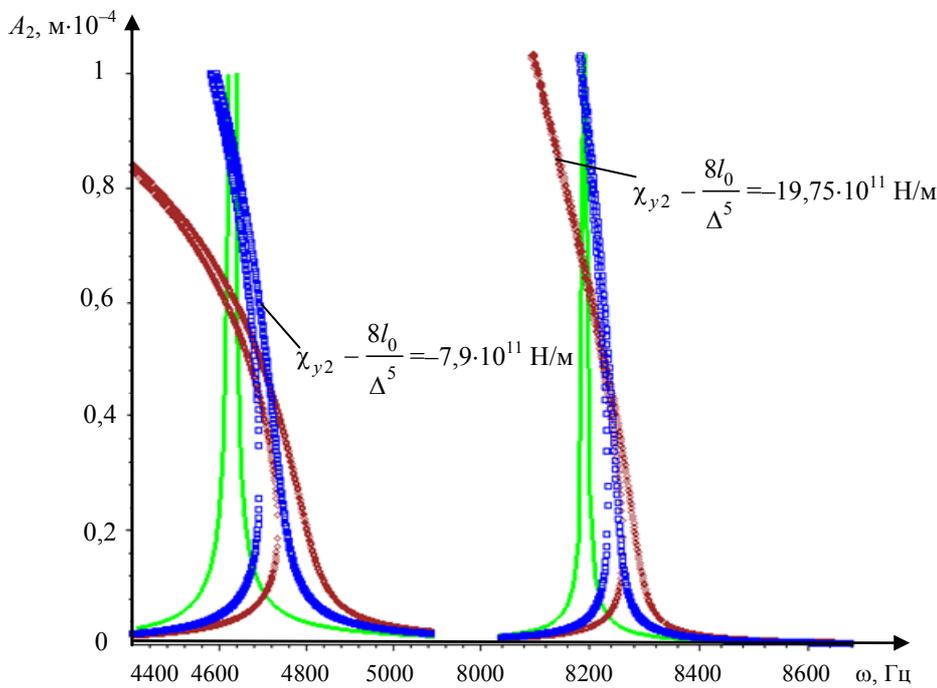
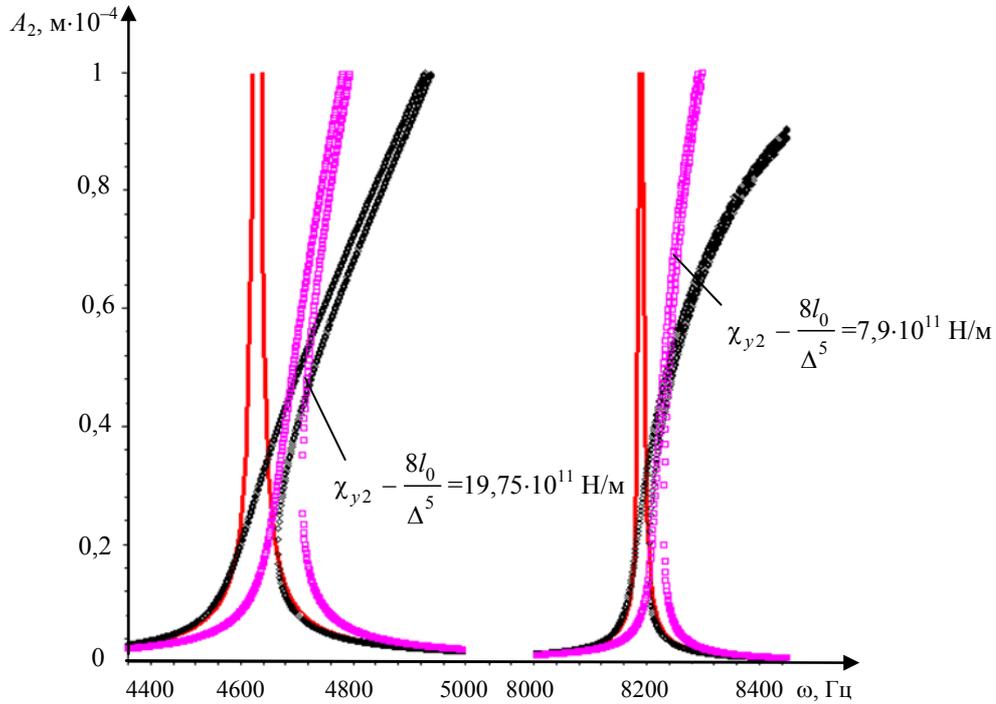


Рис. 3

При проектировании ММГ и выборе параметров конструкции прибора частота ω^* вибрационного возбуждения первичных колебаний чувствительного элемента выбирается между значениями парциальных частот n_1 и n_2 ($n_1 < \omega^* < n_2$) колебательной системы прибора. Вид резонансных кривых $A_2(\omega)$ в окрестности частоты ω^* при указанных ранее параметрах ММГ

приведен на рис. 4. Изменение частоты вибрационного воздействия в окрестности значения ω^* не приводит к скачкам амплитуд колебаний A_2 инерционной массы. Изменения напряженно-деформированного состояния конструкции чувствительного элемента ММГ и коэффициентов демпфирования, вызванные температурными или механическими воздействиями, а также технологические погрешности изготовления элементов конструкции прибора приводят к незначительному изменению вида резонансной кривой в окрестности частоты ω^* (см. рис. 4).

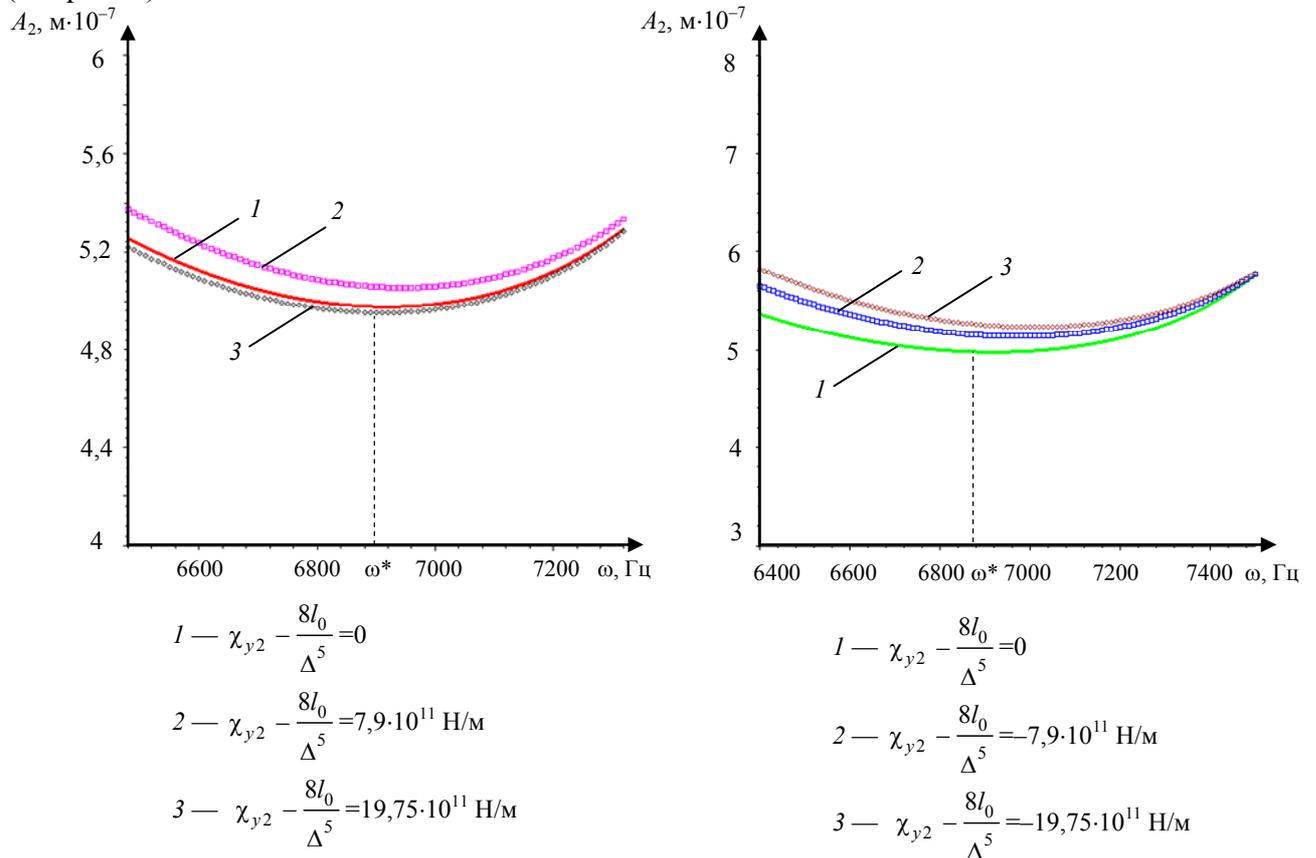


Рис. 4

Таким образом, рассматриваемая конструкция ММГ, содержащая две инерционные массы, обладает большей стабильностью технических характеристик по сравнению с одно-массовой конструкцией ММГ L-L типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пешехонов В. Г. Проблемы и перспективы современной гироскопии // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 1—2. С. 48—55.
2. Микромеханические гироскопы: конструкции, характеристики, пути развития / Л. А. Северов, В. К. Пономарев, А. И. Панферов, С. Г. Кучерков и др. // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. Т. 41, № 1—2. С. 57—73.
3. Распопов В. Я. Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
4. Пат. 84541 РФ, G 01 С 19/56. Микромеханический гироскоп / А. М. Лестев, И. В. Попова, А. В. Ефимовская, М. В. Федоров // Бюл. № 19. Оpubл. 10.07.2009.
5. Acar C., Shkel A. M. Inherently robust micromachined gyroscope with 2-DOF sense-mode oscillator // J. of Micromechanical Systems. 2006. Vol. 15, N 2. P. 380—387.
6. Ефимовская А. В., Федоров М. В. О результатах разработки и исследования микромеханического гироскопа // Сб. докл. XI конф. молодых ученых „Навигация и управление движением“. СПб, 2009. С. 372—378.

7. Попов Е. П. Прикладная теория управления в нелинейных системах. М.: Наука, 1973. 587 с.
8. Карелин А. П., Лестев М. А. Влияние электростатической составляющей жесткости на динамику и погрешности микромеханического гироскопа // Сб. материалов Третьего Междунар. симп. „Аэрокосмические приборные технологии“. СПб, 2004. С. 285—287.

Сведения об авторах

- Александр Михайлович Лестев* — д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра механики; E-mail: list_@inbox.ru
- Александра Васильевна Ефимовская* — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра механики; E-mail: lcaleksandra@gmail.com

Рекомендована кафедрой
механики

Поступила в редакцию
25.04.11 г.

М. А. РЯБИНИН

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ КИНОАППАРАТУРЫ

Предложен комбинированный метод выглаживания поверхностного слоя деталей индентором с наложением ультразвуковых колебаний и последующим нанесением регулярного микрорельефа вибронакатыванием. Приводятся результаты сравнительных испытаний данного метода и ранее предложенных технологий упрочнения деталей.

Ключевые слова: регулярный микрорельеф, равновесная шероховатость, поверхностно-пластическое деформирование, выглаживание, вибронакатывание.

Качество изделий кинотехники, их эксплуатационные свойства и надежность работы в значительной степени зависят от технологии чистовой отделочной обработки, в процессе которой формируется поверхностный слой деталей. Среди множества отделочных операций, формирующих на поверхности деталей микрорельеф с заданными параметрами оптимальной „равновесной“ шероховатости [1, 2], а также позволяющих существенно снизить время приработки, повысив при этом износостойкость деталей [3], широкое распространение получила обработка поверхностного слоя посредством холодного пластического деформирования [4]. Кроме того, разработаны и внедрены новые способы, позволяющие повысить прочность и срок службы деталей путем нанесения на их поверхность регулярного микрорельефа (РМР) [5].

В настоящей статье предложен комбинированный метод выглаживания поверхностного слоя индентором с наложением ультразвуковых колебаний (УЗК) и последующим нанесением РМР вибронакатыванием. Приведены результаты экспериментального исследования качества поверхностного слоя, полученного с использованием предложенного метода, а также результаты сравнительных испытаний данного метода и ранее предложенных технологий упрочнения деталей с наложением УЗК.

Опыты проводились на образцах из стали 45, которые в первом случае были отожжены, а во втором — упрочнены закалкой до HRC 45—50.

Таким образом, были проведены четыре серии экспериментов по двум технологиям поверхностно-пластического деформирования (ППД).

1. Пластическое деформирование незакаленной поверхности, обработанной чистовым точением резцом из сплава ВК8 в режимах резания, обеспечивающих приближение к показателям „равновесной“ шероховатости по шагу и высоте [6]. Выглаживание поверхностного слоя проводилось индентором радиусом $R=2$ мм с наложением УЗК амплитудой $A_k=15$ мкм и частотой $f=18,5$ кГц.

2. Пластическое деформирование незакаленной поверхности по технологии, предложенной в п. 1, с последующим формированием РМР типа IV [4] в целях создания дополнительных масляных карманов.

3. Пластическое деформирование закаленной поверхности, полученной в результате чистового точения микрорезцами из Эльбора-Р в режимах резания, обеспечивающих приближение по шагу и высоте микронеровности поверхности к показателям „равновесной“ шероховатости, с последующим выглаживанием поверхностного слоя индентором ($R=2$ мм) с наложением УЗК ($A_k=15$ мкм, $f=18,5$ кГц).

4. Пластическое деформирование закаленной поверхности, обработанной по технологии, приведенной в п. 3, с последующим формированием РМР типа IV.

Для обработки поверхностей деталей киноаппаратуры путем поверхностно-пластического деформирования использовалась установка, состоящая из генератора УЗГ-4 с магнестрикционным преобразователем типа ПМС-15 и специального устройства для создания регулярного микрорельефа (рис. 1, здесь $n_{дв.х}$ — число двойных ходов инструмента, $мин^{-1}$; n_3 — число оборотов заготовки, $мин^{-1}$; λ — осевой шаг неровностей, мм).

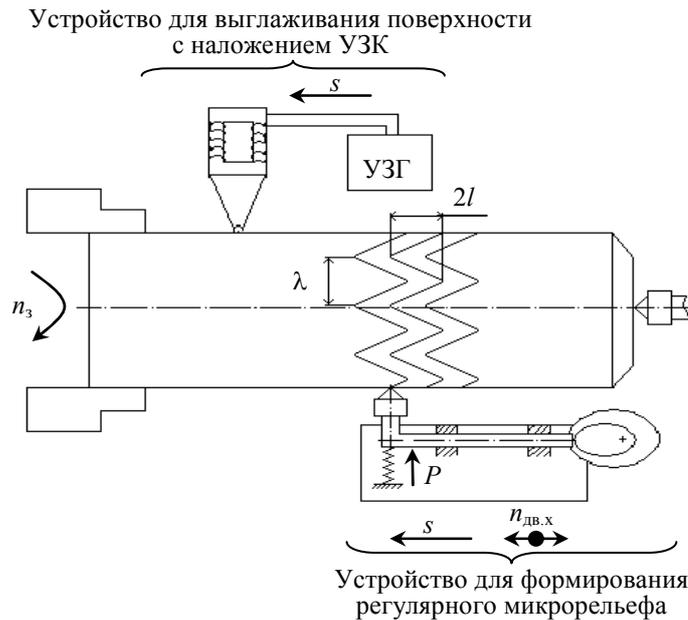


Рис. 1

В качестве усилителя амплитуды использовался концентратор экспоненциальной формы (с коэффициентом усиления $N=3,25$), на конце которого впаян твердосплавный сферический индентор радиусом 2 мм. Общий вид установки приведен на рис. 2, где

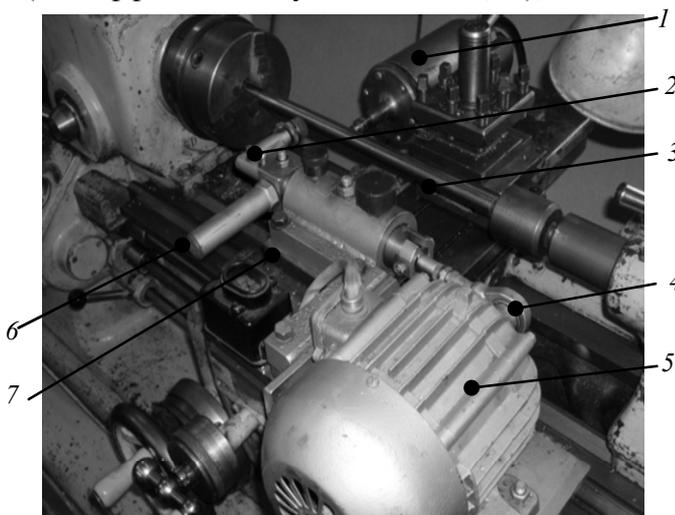


Рис. 2

1 — УЗ-головка для выглаживания поверхностного слоя; 2 — индентор для формирования РМР; 3 — обрабатываемая деталь; 4 — эксцентрик; 5 — электродвигатель; 6 — пружина для создания силы нормального давления; 7 — направляющая.

На первом этапе по методике, изложенной в работе [6], оценивалась топология микротвердости HV незакаленной и закаленной поверхностей, обработанных по традиционной и комбинированной УЗ-технологиям. По

результатам статистической обработки значений HV не были выявлены изменения микротвердости поверхности при нанесении РМР, однако испытания на износостойкость показали,

что поверхности с нанесенным РМР изнашивались медленнее. Это подтверждается представленными на рис. 3 и 4 графиками, демонстрирующими изменение износа поверхности детали (I_h) в зависимости от времени ее работы (t): на рис. 3, 4 показаны результаты соответственно для незакаленной и закаленной (HRC 40—50) стали, где *a* соответствует обработке поверхности чистовым точением с наложением УЗК, *б* — обработке комбинированным способом с наложением УЗК и нанесением регулярного микрорельефа.

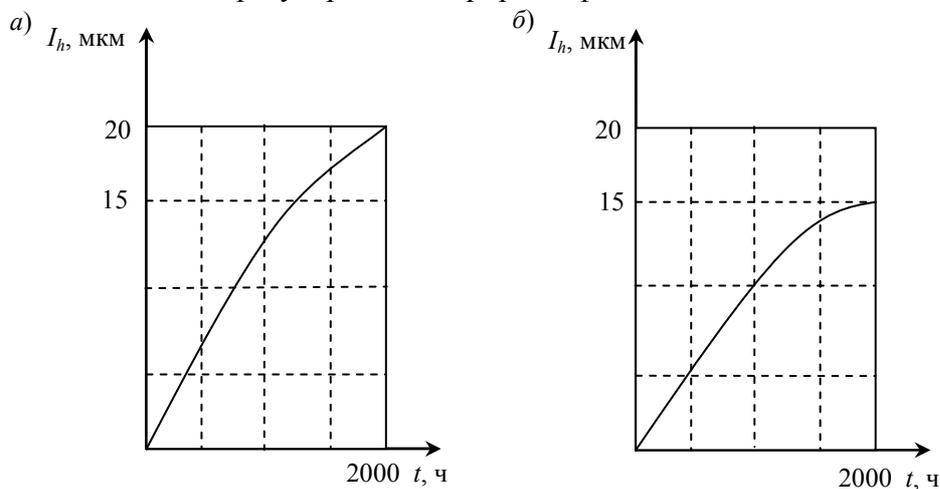


Рис. 3

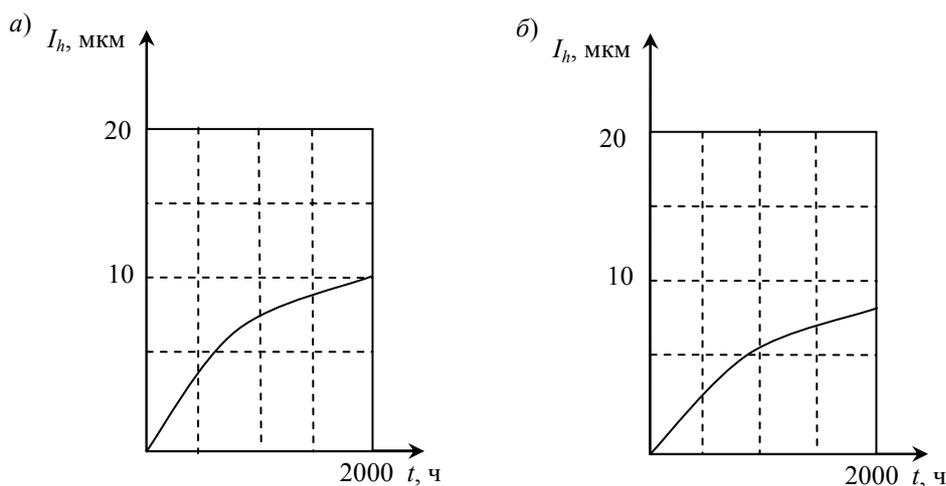


Рис. 4

Ресурсные испытания деталей проводились по изложенной в работе [7] методике ускоренных испытаний при следующих параметрах вибронакатывания:

- подача (линейное перемещение инструмента за один оборот детали) $s=0,078$ мм/об;
- амплитуда осцилляции деформирующего элемента $2l=2,5$ мм;
- количество волн канавки, образуемых за один оборот заготовки, $i=62,25$;
- усилие прижима $P=590$ Н.

Как показали результаты испытаний, при нанесении регулярного микрорельефа на упрочненную ультразвуковыми колебаниями поверхность износостойкость деталей повышается в среднем на 20—30 %.

Особый интерес представляет формирование сравнительных математических моделей рассмотренных процессов поверхностного упрочнения с использованием методик, предложенных в работах [8, 9]. При этом, учитывая оптимальные значения технологических параметров обработки, можно выявить и оценить количественно преимущества одной технологии по сравнению с другой.

Например, задавшись для экспериментов 3 и 4 (см. выше) значениями, близкими к параметрам оптимальной шероховатости, получим два аналитических выражения в виде квадратичной функции:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{m=1}^k b_m x_m + \sum_{m < n} b_{mn} x_m x_n + \sum_{m=1}^k b_{mm} x_m^2,$$

где \hat{y} — значение параметра оптимизации y ; b_0 , b_m , b_{mn} , b_{mm} — выборочные коэффициенты регрессии; x_m , x_n — независимые переменные, которые можно варьировать при постановке эксперимента.

Обозначим исследуемые факторы: количество волн канавки i , образуемых за один оборот заготовки, как x_1 ; усилие прижима P как x_2 ; подачу s как x_3 ; для параметра оптимизации — высоту микронеровностей R_a как y_1 ; радиус закругления выступов и впадин $r \cdot 10^{-3}$ как y_2 ; угол наклона образующих микронеровности у их основания β как y_3 ; относительную опорную поверхность (часть площади поверхности, не занятой канавкой) $F_{оп}$ как y_4 ; микротвердость поверхностного слоя HV как y_5 . На основе ротатбельного планирования эксперимента выразим зависимости этих параметров в виде математических моделей:

— УЗ-упрочнение закаленной поверхности без нанесения РМР:

$$y_1 = 2,9 - 0,19x_1 - 0,35x_2 + 0,36x_3 + 0,6x_1^2 + 0,54x_2^2 + 0,03x_3^2,$$

$$y_2 = 9,1 + 0,9x_1 + 0,54x_2 - 0,74x_3 - 0,98x_1^2 - 1,05x_2^2 + 0,01x_3^2,$$

$$y_3 = 1,6 - 0,02x_1 + 0,33x_2 + 0,19x_3 + 0,1x_1x_2 - 0,2x_2x_3 + 0,24x_1^2 + 0,42x_2^2 - 0,02x_3^2,$$

$$y_4 = 49,5 + 2,4x_1 + 3,6x_2 - 4,1x_3 - 0,5x_1x_2 - 0,15x_1x_3 - 0,25x_2x_3 - 3,6x_1^2 - 5,9x_2^2 - 0,16x_3^2,$$

$$y_5 = 312 + 17,2x_1 + 24,2x_2 + 14,7x_3 + 2,11x_1x_3 + 2,1x_2x_3 - 26,8x_1^2 - 8,4x_2^2 - 10,1x_3^2;$$

— УЗ-упрочнение закаленной поверхности с нанесением РМР:

$$y_1 = 2,8 - 0,26x_1 - 0,78x_2 + 0,35x_3 + 0,58x_1^2 + 0,54x_2^2 + 0,001x_3^2,$$

$$y_2 = 8,5 + 0,9x_1 + 0,54x_2 - 0,75x_3 + 0,22x_1^2 + 0,86x_2^2,$$

$$y_3 = 1,4 - 0,19x_1 - 0,04x_2 + 0,15x_3 + 0,1x_1x_2 - 0,02x_1x_3 + 0,27x_1^2 + 0,14x_2^2 - 0,02x_3^2,$$

$$y_4 = 49,5 + 5,2x_1 + 3,1x_2 - 4,2x_3 - 1,0x_1x_2 - 0,6x_1x_3 - 0,25x_2x_3 - 3,3x_1^2 - 5,0x_2^2 - 0,3x_3^2,$$

$$y_5 = 314 + 5,1x_1 + 20,1x_2 - 9,7x_3 - 1,1x_1x_2 - 0,9x_2x_3 - 10,1x_1^2 - 2,3x_2^2 - 9,8x_3^2.$$

Результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментально полученных данных представлены в таблице.

| Метод | | R_a , мкм | | $r \cdot 10^{-3}$, мкм | | β , ...° | | HV, Н/мм ² | | $F_{оп}$, % | |
|--|-------------------|-------------|-------|-------------------------|-------|----------------|-------|-----------------------|-------|--------------|-------|
| | | Расч. | Эксп. | Расч. | Эксп. | Расч. | Эксп. | Расч. | Эксп. | Расч. | Эксп. |
| Ультразвуковое упрочнение закаленной поверхности | без нанесения РМР | 2,7 | 2,5 | 18,5 | 16 | 1,46 | 1,5 | 205 | 200 | 36 | 38 |
| | с нанесением РМР | 2,65 | 2,5 | 15,8 | 16 | 1,34 | 1,4 | 213 | 206 | 56 | 60 |

Результаты сравнительных испытаний предложенного в статье комбинированного метода обработки поверхностного слоя деталей киноаппаратуры с известными технологиями упрочнения позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработанные математические модели технологических процессов показали эффективность как обычных, так и комбинированных методов поверхностно-пластического деформирования с нанесением УЗ-колебаний (что подтверждается хорошим совпадением, в пределах доверительных интервалов, расчетных и экспериментально полученных результатов).

2. Детали, обрабатываемые по комбинированной схеме ППД, обладают более высокой износостойкостью: для закаленных образцов — на 20...30 %, для незакаленных — на 60...80 %.

3. Повышенная износостойкость деталей, полученных комбинированным методом, обусловлена существенным (почти в 2 раза) увеличением относительной опорной поверхности $F_{оп}$ (см. таблицу).

4. Очевидно, что комбинированный метод ППД позволяет „тонко“ регулировать значение $F_{оп}$, например, задавая, в соответствии с рекомендациями [5], различные виды регулярно-микро рельефа деталей и подбирая их оптимальные характеристики исходя из конкретных условий работы.

5. Полученные математические зависимости могут быть использованы для моделирования процессов износа деталей (что позволит исключить длительные ресурсные испытания), проводимого, например, по плану размерности Бокса — Бенкина [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комбалов В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974.
2. Крагельский И. В., Комбалов В. С., Добычин А. П. Основы расчетов на трение и износ. М.: Наука, 1972.
3. Кулаков А. К., Рябинин М. А. Оценка износа деталей КПА в процессе приработки // Сб. науч. тр. СПбГУ КиТ. 2004. № 13.
4. Одинцов Л. Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. М.: Машиностроение, 1985.
5. Шнейдер Ю. Г. Технология финишной обработки давлением: Справочник. СПб: Политехника, 1998.
6. Коломенский Н. Н., Кулаков А. К., Нестерова Е. И., Рябинин М. А. Топология микротвердости поверхности деталей КВА при отделочно-упрочняющей обработке // Сб. науч. тр. СПбГУ КиТ. 2006. № 19.
7. Коломенский Н. Н., Кулаков А. К., Рябинин М. А. Методы ускоренных испытаний на износ деталей и узлов киноаппаратуры // Там же. 2006. № 20.
8. Налимов В. В., Голикова Т. И. Логические основания планирования эксперимента. М.: Металлургия, 1980.
9. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980.
10. Box G. E. P., Behnken D. W. Some new three level designs for the study of quantitative variables // Technometrics. 1960. Vol. 2, N 4.

Сведения об авторе

Максим Александрович Рябинин — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения, кафедра прецизионных технологий и сертификации киноаппаратуры; E-mail: ryabinin_08@mail.ru

Рекомендована кафедрой
прецизионных технологий и
сертификации киноаппаратуры

Поступила в редакцию
10.03.09 г.

А. А. ВИНОГРАДОВА, А. Ж. ЕСБУЛАТОВА, К. Н. ВОЙНОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ПРИБОРА НОЧНОГО ВИДЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕНАБЛЮДАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассматривается возможность использования усовершенствованного прибора ночного видения для диагностического контроля ненаблюдаемых объектов при дневном или искусственном освещении. Предложены варианты оцифровки получаемых изображений с использованием пакета прикладных программ MatLab.

Ключевые слова: диагностика, изображение, приборы.

В современных научных исследованиях часто приходится изучать как технические характеристики объектов (твердость поверхности, ее шероховатость, волнистость, структуру и т.п.), так и сам объект, который по какой-то причине скрыт или находится за перегородкой/стенкой (как, например, в пассажирском вагоне, где порой транспортируются нелегальные товары/грузы). Для обнаружения таких скрытых объектов используются различные приборы, например: стереомикроскоп фирмы “Nikon” для изучения структуры материала, флюоресцентный наномикроскоп, поляризационный микроскоп Leica DMRX, микроскоп фирмы “Carl Zeiss”, портативные рентгенофлюоресцентные анализаторы химического состава сплавов X-MET 5000 и X-MET 3000TX и др. В отдельных случаях анализ осуществляется в течение 5—10 с. Так, система LET (Light Element Treatment) позволяет точно определять наличие легких элементов (Al, Si, Mg) в сплавах и производить их автоматический количественный учет. Отдельную измерительную линейку составляют дальномеры и приборы ночного видения, например: лазерные дальномеры Leica Rangemaster 1200 CRF и Newcon LRM 2000 PRO, прибор ночного видения NVMT SPARTAN.

В настоящей статье предлагается для обнаружения ненаблюдаемых объектов (в частности, нелегальных грузов, скрытых в межстенном пространстве пассажирского вагона) использовать усовершенствованный прибор ночного видения (ПНВ)[1]. Этот прибор предназначен для обнаружения скрытого объекта при дневном или искусственном освещении, что позволяет осуществлять оцифровку получаемых изображений на компьютере с помощью пакета прикладных программ MatLab.

Для исследования возможности визуализации скрытого объекта использовались цифровая видеокамера SONY DCR-SR87E (Digital Video Camera Recorder) и прибор ночного видения, состыкованные вместе как единое целое. Основные технические характеристики видеокамеры следующие: формат сигнала — цветной, стандарт PAL CCIR; формат видеоизображения — MPEG2-PS, максимальное разрешение составляет 1 070 000 пикселей, для фотографий — 750 000 пикселей; объектив Carl Zeiss Vario-Tessar 2000^x (цифровой). Полученные с использованием ПНВ и цифровой видеокамеры изображения объектов, скрытых за непрозрачной для человеческого глаза стенкой/перегородкой, представлены на рис. 1.

Проведем вейвлет-анализ изображений в пакете программ MatLab и выявим возможность его использования при обработке изображений, полученных тепловизионными датчиками.

Предварительно перед обработкой необходимо загрузить изображение (представленное на рис. 1, а) в рабочее окно программы, т.е. оцифровать его (в эксперименте изображение загружалось дважды). После ввода команды Wavemenu открывается рабочая область вейвлетов. В программе представлены несколько видов вкладок для вейвлет-обработки различных вход-

ных файлов: сигналов и изображений разного формата. В ходе исследований использовались все виды вкладок, применимые к изображениям [2].

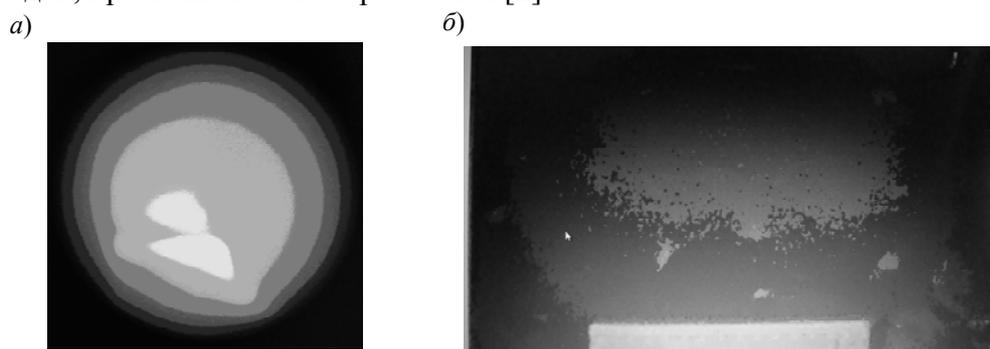


Рис. 1

Рассмотрим вкладку Image Fusion (сочетание изображений), в которой производится декомпозиция двух изображений, их сложение и восстановление. Необходимым условием данной операции является одинаковый размер изображений. Результаты обработки изображения (см. рис. 1, а) с помощью вейвлета Добеши 1-го порядка представлены на рис. 2.

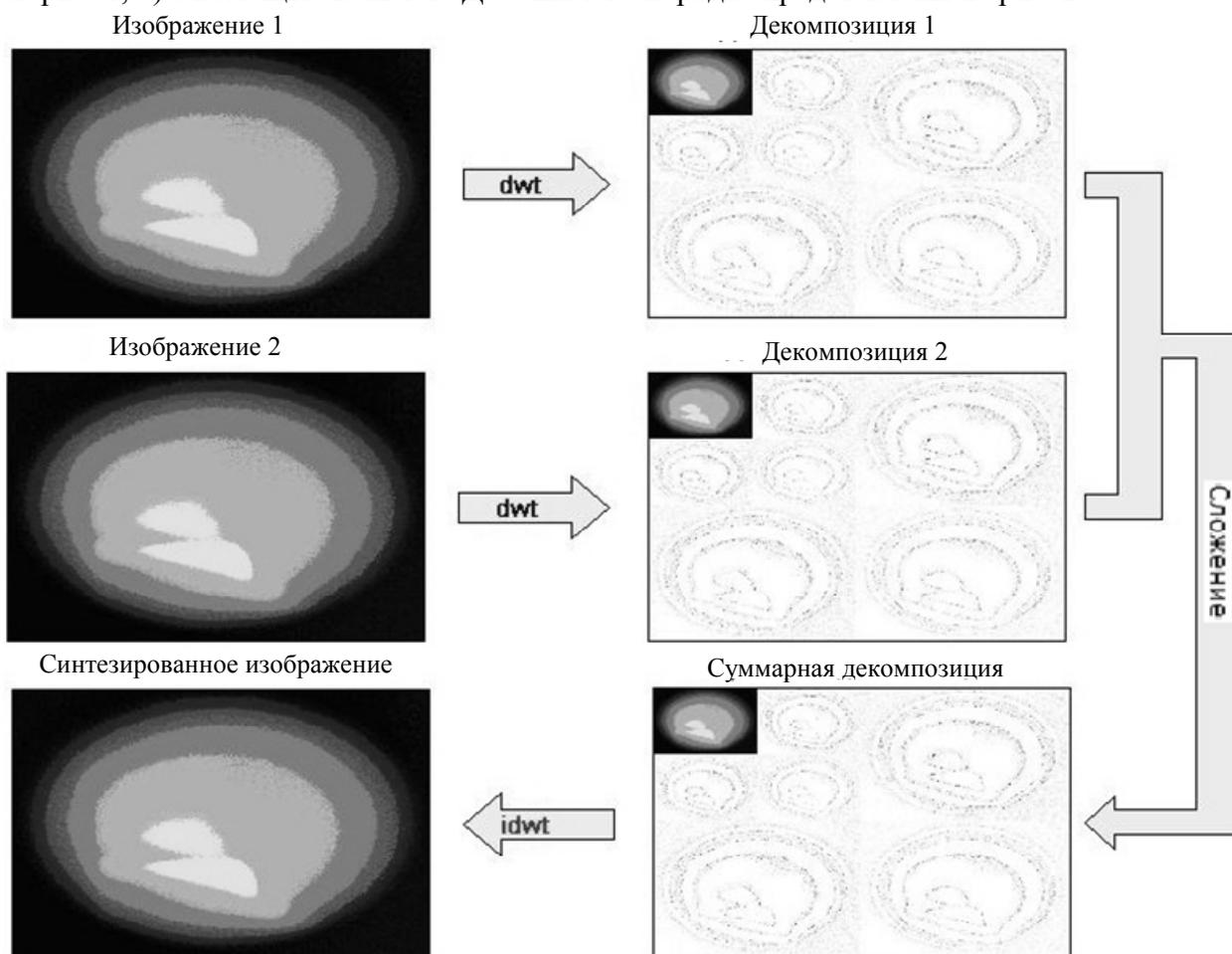


Рис. 2

Анализ результатов показывает, что использование вкладки Image Fusion не позволяет определить, какой именно предмет находится за преградой.

В следующем эксперименте осуществлялась детализация изображения, приведенного на рис. 1, б, с использованием его цветовой гаммы. При исследовании изображение, как и в предыдущем случае, загружается в рабочее окно программы, а затем пересохраняется файлом формата .mat. Этот файл импортируется во вкладку трехмерного вейвлета. Далее осуществляется

анализ оригинального изображения с помощью вейвлета Добеши 1-го порядка. Проводится декомпозиция файла (рис. 3). Совокупность проведенных операций позволяет более четко определить контур объекта, но не позволяет, однако, точно идентифицировать предмет, находящийся за перегородкой. Следует отметить, что даже смена вейвлета (например, использование вейвлета *biog* 1.1 вместо Добеши) не обеспечивает точной идентификации объекта. Для повышения точности распознавания полученных данных существует возможность изменения цветовой гаммы в рабочей области.

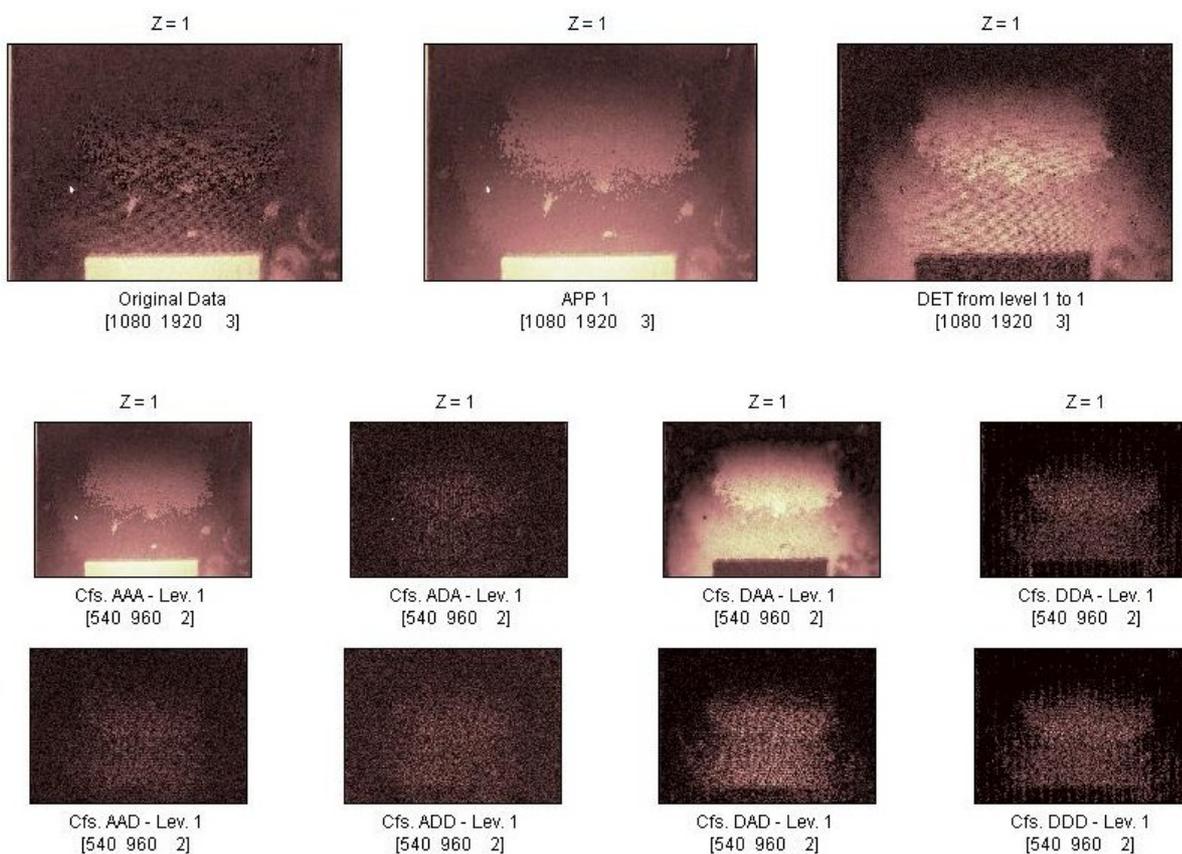


Рис. 3

Таким образом, в результате выполненных преобразований полученных изображений скрытых объектов установлено, что во всех случаях абсолютно точно констатирован факт наличия некоторого объекта, спрятанного от глаз наблюдателя при обычном освещении. Для органов пограничного и таможенного контроля, в частности, не требуется повышенная детализация скрытого объекта, так как важно установить сам факт его наличия.

Рассмотренные способы обработки можно использовать при анализе любых изображений, получаемых с помощью усовершенствованного прибора ночного видения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прибор ночного видения / К. Н. Войнов, З. А. Докучаева, А. Ж. Есбулатова. Заявка на полезную модель, № 2011117746/28(026305) РФ, МПК G02B 23/00(2006/01). Полож. реш. от 12.07.2011.
2. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2005. 304 с.

Сведения об авторах

Алла Алексеевна Виноградова — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: vinogradova_a@list.ru

- Алтын Жоламановна Есбулатова** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения, кафедра теории механизмов и робототехнических систем; E-mail: ktmrs@pgups.edu
- Кирилл Николаевич Войнов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения, кафедра теории механизмов и робототехнических систем; E-mail: forstar@mail.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
24.10.11 г.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.384

В. В. ТАРАСОВ, Ю. Г. ЯКУШЕНКОВ

ТЕНДЕНЦИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ИНФРАКРАСНЫХ СИСТЕМ 3-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Описываются тенденции совершенствования важнейших элементов инфракрасных систем 3-го поколения — фотоприемных устройств, систем охлаждения, оптических систем.

Ключевые слова: инфракрасная система, фотоприемное устройство, оптическая система.

В настоящее время продолжается активное совершенствование инфракрасных систем (ИКС) 3-го поколения, работающих в двух или более спектральных диапазонах и имеющих в своем составе матричные фотоприемные устройства (ФПУ). Наряду с ИКС, работающими на нескольких участках инфракрасного (ИК) спектра, создаются оптико-электронные системы (ОЭС), способные принимать оптические сигналы в ультрафиолетовом (УФ), видимом и ИК-диапазонах. Появилось достаточно много ОЭС круглосуточного действия, при работе которых в дневное время используется канал видимого излучения, а ночью или в условиях плохой видимости — инфракрасный канал. В некоторых системах эти каналы работают одновременно.

Совершенствование оптико-электронных и инфракрасных систем осуществляется в основном за счет новой элементной базы — новых оптических систем, фотоприемных устройств, систем охлаждения, схем обработки сигналов, систем отображения и др.

Ведущие компании США и других стран активно разрабатывают новые ФПУ на базе как традиционных материалов (тройные соединения „кадмий—ртуть—теллур“ — КРТ, структуры с квантовыми ямами — СКЯ, структуры на базе InGaAs), так и структур с квантовыми точками или структур на суперрешетках типа II, которые еще совсем недавно находились на стадии лабораторных исследований [1].

Как известно, уменьшение размеров пикселей ФПУ до пределов, близких к дифракционному разрешению, позволяет увеличить их количество, т.е. повысить геометрооптическое разрешение ФПУ. Исследования, проведенные Директоратом ночного видения и электронных датчиков Армии США (NVESD), как и рядом ведущих фирм, показывают, что с точки зрения современных требований к оптическому (геометрооптическому) и энергетическому разрешению, а также к оптимизации конструкций оптических систем и ФПУ, снижению их стоимости и энергопотребления и уменьшению габаритов целесообразно создавать ФПУ, размер пикселей которых составляет 12...15 мкм. При этом возможное уменьшение площади подложки ФПУ позволяет снизить его стоимость и уменьшить объем дьюара системы охлаждения, а следовательно, и энергопотребление этой системы. Однако следует учитывать

возможное возрастание шума, эквивалентного разности температур (H_T) за счет насыщения ячеек схемы накопления и считывания зарядов.

Примером разработок, направленных на уменьшение размеров пикселей ФПУ на базе КРТ, являются созданные компанией AIM Infrarot-Module GmbH КРТ-ФПУ (640×512 пкс размером 24 и 15 мкм), работающие в среднем и длинноволновом ИК-диапазонах [2]. В типовой конструкции ИКС на их основе применяется охлаждаемая диафрагма (диафрагменное число объектива $K=4,6$). При времени накопления 5 мс в среднем ИК-диапазоне значение H_T не превышает 25 мК, а в длинноволновом ИК-диапазоне с граничными длинами волн спектральной характеристики $\lambda_{гр} = 9,2$ мкм (при температуре охлаждения $T_{охл}=67$ К) или $\lambda_{гр}=10$ мкм при $K = 2,05$ и времени накопления 180 мкс величина H_T не превышает 38 мК. Для охлаждения этих ФПУ используются либо традиционные портативные системы с вращающимся компрессором, обладающие сравнительно небольшим энергопотреблением (Ricor R508), либо новые бесшумные линейные системы с увеличенным сроком безотказной работы — более 20 тыс. часов (5X095). Компания ставит своей задачей создание двухдиапазонных ФПУ (0,9...2,5 и 12...15 мкм) для дистанционного зондирования из космоса. Кроме того, для работы в среднем ИК-диапазоне предполагается создать охлаждаемые до 120 К ФПУ (640×512 пкс размером 12 мкм), что позволит уменьшить габариты, массу, энергопотребление и стоимость систем, в которых они будут использоваться.

Для создания двухдиапазонных КРТ-ФПУ (640×512 пкс размером 24 и 20 мкм), работающих в среднем и длинноволновом ИК-диапазонах, компания SELEX Galileo Infrared Ltd. использует эпитаксию паров металлоорганических соединений, что позволяет снизить стоимость, увеличить выход крупноформатных ФПУ с малым процентом дефектных пикселей и уменьшить неоднородность чувствительности отдельных пикселей. Использование подложки из GaAs позволяет объединить фоточувствительный слой и схему накопления и считывания, а также уменьшить, по сравнению с подложками из CdZnTe, остаточные напряжения и потери на отражение. Как сообщается в работе [3], за счет уменьшения размеров пикселей до 24 мкм в среднем ИК-диапазоне удалось достичь значения H_T порядка 10 мК, а при размерах пикселей 20 мкм — порядка 14 мК. В длинноволновом ИК-диапазоне $H_T = 23$ и 27 мК для пикселей размером 24 и 20 мкм соответственно. Следует отметить, что достижение значения $H_T < 20$ мК в среднем ИК-диапазоне для пикселей размером 16 мкм стало возможным при $T_{охл} \approx 150$ К.

Переход к использованию кремниевых подложек при изготовлении крупноформатных КРТ-ФПУ (1536×1024 пкс размером 15 мкм), работающих в ближнем и среднем ИК-диапазонах при $T_{охл}=140...160$ К, позволил при диафрагменном числе $K=3,4$ увеличить $\lambda_{гр}$ в ближнем ИК-поддиапазоне до 3,7 мкм и в среднем ИК-поддиапазоне до 4,8 мкм при $T_{охл}=115$ К [4].

Сочетание фоточувствительного слоя из КРТ и кремниевой схемы накопления и считывания позволило компании QinetiQ Ltd. разработать ФПУ с $H_T \approx 10$ мК при частоте кадров 2 кГц для широкого спектрального диапазона — 2,5...10,5 мкм [5].

Известные достоинства ФПУ на базе структур с квантовыми ямами (ФПУ-СКЯ) послужили основанием для выбора таких устройств при обеспечении работы ряда ИКС в длинноволновом ИК-диапазоне. В работе [6] сообщается о первых испытаниях крупноформатного ФПУ-СКЯ (1024×1024 пкс размером 30 мкм), работающего одновременно в спектральных диапазонах 4,4...5,1 и 7,8...8,8 мкм при температуре 68 К. В этих диапазонах значение H_T такого мегапиксельного ФПУ составляет порядка 27 и 40 мК соответственно.

Как альтернативу ФПУ на основе КРТ и СКЯ в последние годы все чаще рассматривают фотоприемники на основе суперрешеток с деформированным слоем типа II (Type II Superlattice — T2SL). Такие ФПУ позволяют сравнительно просто получать перестраиваемую длинноволновую границу спектральной характеристики, обладают высокой поглощательной способностью и, как следствие, высокой квантовой эффективностью, более однородны по фоточувствительному слою и имеют малые темновые токи. Сегодня создание крупноформатных ФПУ

на базе T2SL затруднено вследствие ограниченных размеров подложек из GaSb, применяемых при их изготовлении. Лучшие T2SL-ФПУ имеют размер 320×256 пкс. В работе [7] сообщается об изготовлении T2SL-ФПУ на базе гибридных гетероструктур InAs/GaInSb/AlGaInSb (256×256 пкс размером 40 мкм), работающих при температурах 78...80 К и имеющих квантовую эффективность около 40 % на длине волны 8 мкм. Темновые токи этих ФПУ в 10...20 раз меньше, чем у близких по параметрам КРТ-ФПУ. Значение $\lambda_{\text{гр}}$ таких ФПУ может изменяться от 9 до 11,5 мкм.

В последнее время обсуждается возможность создания T2SL-ФПУ на подложках из GaAs, хорошо освоенного в электронной промышленности. В работе [8] указывается, что в таких ФПУ уже достигнута удельная обнаружительная способность $D^* = 1,1 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ при $T_{\text{охл}} = 77 \text{ К}$ в диапазоне 8...12 мкм.

Для работы в коротковолновом ИК-диапазоне (1,0...2,5 мкм) часто предлагается использовать фотодиодные ФПУ на базе структур InGaAs/GaAsSb типа II, выращенных на подложке из InP. Системы с InGaAs-фотодиодами чувствительны к ИК-излучению с длиной волны до 1,7 мкм (при рабочей длине волны $\lambda_0 = 0,53 \text{ мкм}$) и до 2,5 мкм (при $\lambda_0 = 0,8 \text{ мкм}$), где велико излучение вспышек выстрелов, детонаций, факелов ракет, а также наблюдается ночное свечение атмосферы, вызванное ионизацией в верхних ее слоях и обеспечивающее работу ИКС в безлунную ночь. Малая инерционность InGaAs-фотодиодов позволяет регистрировать быстропротекающие процессы (например, при быстром взаимном перемещении носителя ФПУ и просматриваемой сцены). Эти системы имеют малые темновые токи и поэтому не требуют криогенного охлаждения; они работают с термоэлектрическими охладителями, необходимыми для коррекции неоднородности чувствительности и темновых токов отдельных пикселей.

Спонсируемая Агентством по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам Армии США (DARPA) компания Goodrich ISR Systems создала на основе InGaAs-ФПУ (640×512 пкс) систему SU640KTSX с массой менее 100 г, частотой кадров 60 Гц и разрядностью видеовыхода 12 или 14 бит [9]. В этой системе имеется блок двухточечной коррекции неоднородности, автоматическая регулировка усиления, блок улучшения изображения и форматирования видеовыхода. Термоэлектрический охладитель используется для стабилизации ФПУ при одном значении температуры — 18 или 23 °С. Аналого-цифровые преобразователи интегрированы в схему накопления и считывания, что обеспечивает небольшие размеры, массу и энергопотребление ФПУ. Так, общая потребляемая мощность устройства составляет менее 1 Вт.

В целях уменьшения потребляемой мощности и перехода к трехточечной системе коррекции неоднородности и компенсации любых температурных изменений авторы [9] предлагают применять так называемую параметризованную систему коррекции. Параметры алгоритма коррекции, включающие степень полинома, знак, величину и число битов, предназначены для кодировки каждого полиномиального коэффициента, характерного для конкретного ФПУ. В результате заводской калибровки ФПУ создается загружаемая в память таблица. При этом появляется возможность отказаться от термоэлектрической системы стабилизации температуры, что уменьшает не только потребляемую мощность, но и массу, и габариты системы, прежде всего, за счет отказа от сравнительно большого и тяжелого герметичного вакуумированного корпуса ФПУ. Это особенно важно для разрабатываемых ФПУ, количество пикселей которых составляет 1280×1024.

Компания RTI International сообщила о новых образцах фотоприемников на базе квантовых точек (ФКТ-ФПУ) с увеличенным по сравнению с ФПУ на базе InGaAs спектральным диапазоном [10]. Квантовая эффективность таких фотодиодов превышает 50 %, а постоянная времени составляет менее 10 пкс, что делает их пригодными для использования в быстродействующих ИКС. Линейность входного сигнала наблюдалась в динамическом диапазоне

40 дБ. Такие устройства работают при комнатной температуре и хорошо сочетаются с монолитными интегральными схемами считывания на гибких подложках, что снимает любые ограничения по размеру ФПУ. Технология их изготовления достаточно проста, что позволяет значительно снизить стоимость ФПУ и создавать крупногабаритные многодиапазонные МФПУ с расширенной спектральной характеристикой в диапазоне 0,25...1,8 мкм.

Как известно, один из недостатков высокочувствительных ФПУ — необходимость снабжения их криогенными охлаждающими устройствами, что увеличивает стоимость, массу, габариты и энергопотребление ИКС в целом, ограничивает срок службы системы, увеличивает шумы и вибрации. В этой связи все большее распространение в ИКС нового поколения находят импульсно-трубочные криогенные устройства с линейным перемещением регенератора. Такие устройства хотя и уступают устройствам с вращающимся компрессором по габаритам, массе и потребляемой мощности, однако более удобны в размещении, создают меньший акустический шум и вибрации, а главное, обладают значительно большим временем безотказной работы. Уменьшение объема и гидравлического диаметра регенератора, а также увеличение среднего давления позволяет обеспечить высокую эффективность работы криогенных устройств. В экспериментах, описанных в работе [11], хорошая эффективность достигалась при частоте импульсов 100...140 Гц. Увеличение рабочего давления и рабочих частот привело к заметному сокращению времени выхода на требуемый температурный режим и уменьшению габаритов системы охлаждения. Миниатюрное импульсно-трубочное криогенное устройство обеспечивает температуру 80 К и частоту 150 Гц при среднем давлении 5 МПа. Диаметр и длина регенератора составляют 4,4 и 27 мм соответственно. Наименьшая достигнутая температура равнялась 97 К. Время установления температуры 80 К составило 5,5 мин.

Компанией Ricog создано криогенное устройство, работающее на частотах до 200 Гц и обеспечивающее температуру 95 К при хладопроизводительности 1 Вт. В этом устройстве используется поршневой компрессор с подшипниками на подвижных магнитах и пневматически управляемый расширитель, соединенные между собой обратной связью [12].

В связи с постоянным стремлением снизить стоимость и массу системы охлаждения ФПУ, увеличить срок ее службы и избежать применения движущихся деталей не пропадает интерес к термоэлектрическим охладителям. Сегодня лучшие из них, имеющие четыре ступени охлаждения, обеспечивают перепад температур порядка 110 К. Как указывается в работе [13], с их помощью для ФПУ на базе КРТ удастся обеспечить рабочую температуру 210 К и значение H_T порядка 30 мК при $K=2$.

Компаниями BAE Systems, Vectronix, DRS, Raytheon Vision Systems, Ulis, L-3 Infrared Products, FLIR Systems ведутся перспективные разработки тепловизионных систем с неохлаждаемыми приемниками на базе микроболометров, размер пикселей которых составляет 15...17 мкм. Количество пикселей разработанных ФПУ составляет 640×480 и 1024×768, а $H_T \leq 45$ мК. В настоящее время Директорат ночного видения и электронных датчиков Армии США (NVESD) финансирует исследования и разработки, имеющие целью довести размеры пикселей микроболометров до 12 мкм.

Если раньше в зарубежной научно-технической литературе сведения о панорамных оптических системах приводились в виде общих схем и патентных описаний, то в 2010 г. появились публикации о разработках промышленных образцов ОЭС с панорамными объективами в виде моноблоков.

Так, в работе [14] описывается панорамный ИК-датчик, работающий в спектральном диапазоне 3,4...4,9 мкм и имеющий угловое поле 360° (по азимуту) и 60° (по углу возвышения). В датчике используется ФПУ (640×512 пкс размером 20 мкм) на базе InSb. Угловое разрешение датчика близко к 6 мрад, но изменяется по углу возвышения. Частота кадров достигает 120 Гц. Датчик имеет цифровой 14-битовый выход. Габариты датчика — 228 мм (длина)

и 218 мм (диаметр); масса — менее 9 кг, потребляемая мощность — от 30 до 50 Вт в зависимости от режима эксплуатации.

Для перископов подводных лодок была разработана панорамная ИКС с угловым полем $360 \times 40^\circ$ ($-10 \times +30^\circ$), работающая в среднем ИК-диапазоне [15]. В ней использовано охлаждаемое до 80 К ФПУ (2048×2048 пкс размером 15 мкм) на базе InSb. Система охлаждения обеспечивает хладопроизводительность порядка 750 мВт при комнатной температуре и потребляемой мощности 50 Вт. Испытания системы показали, что она обеспечивает величину $H_T \approx 30$ мК по всей площади ФПУ при остаточной неоднородности по всему изображению менее 0,3 %. Частота кадров при различном времени накопления зарядов составляет 30 Гц. Габариты системы — около 200 мм (высота) и 166 мм (диаметр).

Наряду с созданием панорамных систем с объективом в виде единого моноблока продолжается разработка ИКС с комбинированием отдельных широкопольных объективов в единую систему с азимутальным угловым полем 360° . Примером может служить противоракетная корабельная инфракрасная следающая система ARTEMIS, предназначенная для автоматического обнаружения низколетающих воздушных и надводных целей по их собственному излучению и для слежения за ними [16]. Система состоит из трех сопряженных по азимуту (расположенных вокруг одной вертикальной оси) датчиков, объективы которых имеют угловые поля $120 \times 26^\circ$. Система работает в спектральном диапазоне 3...5 мкм с частотой кадров 10 Гц.

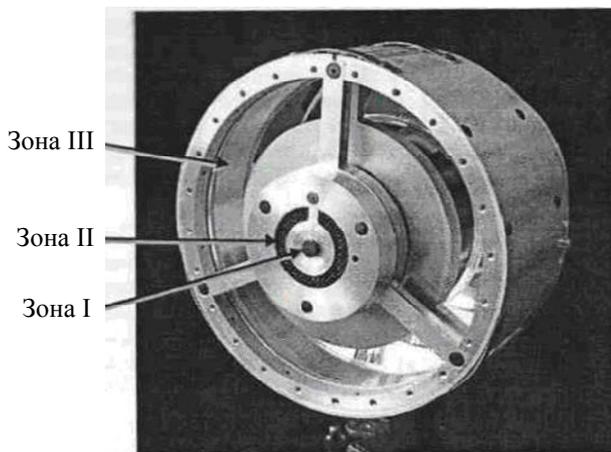


Рис. 1

Агентство DARPA спонсирует программу MONTAGE по разработке компактной ОЭС, работающей одновременно в видимом и ИК-диапазонах спектра [17]. Уменьшение продольного габарита оптической системы достигается за счет использования сложного двустороннего зеркала с несколькими отражательными концентрическими кольцевыми зонами различной кривизны на каждой стороне зеркала и деления входного зрачка объектива на три концентрические зоны (рис. 1). Центральная зона I (в виде круга), заменяющая обычную для зеркальных и зеркально-линзовых систем зону затенения, используется для размещения широкопольного

линзового объектива, работающего в видимом диапазоне. Следующая за ней кольцевая зона II используется для работы в видимом диапазоне зеркального объектива с трехкратным отражением лучей. Третья, периферийная кольцевая зона III работает в длинноволновом ИК-диапазоне как зеркальный объектив с четырехкратным отражением лучей, собирающихся на чувствительном слое приемника—микроболометра (640×480 пкс). Концентрические кольцевые асферические поверхности на обеих сторонах зеркала выполнены с помощью алмазного точения.

Так как все три объектива (зоны) имеют общую оптическую ось, в системе отсутствует параллакс создаваемых ими изображений, что особенно важно для просмотра сцен с большой глубиной поля.

Как известно, одним из способов повысить геометрическое разрешение ОЭС без увеличения габаритов ФПУ и количества пикселей, является микросканирование. Наиболее часто амплитуда принудительного перемещения изображения по поверхности фоточувствительного слоя ФПУ равна размеру двух пикселей по каждой из декартовых координат. Это позволяет удвоить эффективное количество пикселей ФПУ, т.е. повысить в два раза разрешение, не увеличивая размеры устройства, а также удвоить частоту Найквиста, определяющую предельную пространственную частоту в спектре изображения, передаваемую без искажений.

В работе [18] описывается телевизионная ИКС с зеркально-линзовым объективом, построенным по схеме Кассегрена с коэффициентом затенения 0,5, на базе микроболометра (640×480 пкс размером 25 мкм). Микросканирование в этой системе обеспечивается путем колебания второго зеркального компонента объектива (контррефлектора) с амплитудой 50" по двум осям, совпадающим с осями матрицы ФПУ. Наклоны контррефлектора приводят к перемещениям изображения на два пиксела по каждой оси, т.е. эффективный размер ФПУ становится равным 1280×960. Это позволило отказаться от увеличения вдвое фокусного расстояния объектива в целях повышения разрешения и, собственно, от увеличения его массы и габаритов.

Система работает в спектральном диапазоне 7...14 мкм, фокусное расстояние объектива равно 50 мм, а угловое поле 22,6°. Эффективное диафрагменное число — не менее 1,5. Поверхности первичного и вторичного зеркал, а также полевой линзы, помещаемой перед микроболометром, выполнены асферическими. Падение освещенности для углов в 6° не превышает 15 %. Объектив снабжен блендами, снижающими засветку. Диаметр объектива 75 мм, а длина 100 мм; его масса не превышает 250 г. Подбор материалов зеркал и их оправ позволяет осуществить атермализацию для диапазона окружающих температур от -30 до +60 °С. Глубина изображаемого пространства — от 25 м до бесконечности. Размер чувствительного слоя микроболометра 16×12 мм². Значение H_T при эффективном относительном отверстии объектива 1:1 и частоте кадров 60 Гц составляет около 60 мК. Переход от одного пиксела к другому при микросканировании не превышает 1,5 мс, что гораздо меньше постоянной времени микроболометра (7,5 мс). В системе имеется ручная механическая система фокусировки с разрешением 5 мкм в диапазоне 2,5 мм. Общая длина оптического блока, включая бленду, составляет 114 мм. Микросканирование повышает разрешение системы до 40 лин/мм. Наибольшее разрешение достигается в центре углового поля. Виньетирование из-за затенения части пучка лучей контррефлектором на краю поля составляет около 69 %. Этот эффект устраняется путем калибровки системы, при которой между полевой линзой и микроболометром периодически вводится затвор-шторка. Дисторсия на краю поля не превышает 2 %. Механизм микросканирования, потребляющий мощность порядка 1 Вт, может быть отключен, если не требуется высокое пространственное разрешение.

При разработке двухдиапазонных систем все чаще применяются оптические системы с переменным диафрагменным числом объектива, в состав которого входит охлаждаемая диафрагма. При меньшем диафрагменном числе K лучше решается задача обнаружения излучающих целей в длинноволновом ИК-диапазоне, а при большем K — задача идентификации целей в среднем ИК-диапазоне. Так, разрабатываемые компанией AIM Infrarot-Module GmbH системы имеют охлаждаемые диафрагмы, что позволяет изменять диафрагменные числа: от $K=3$ и менее в длинноволновом ИК-диапазоне до $K=6$ и более в среднем ИК-диапазоне [2].

Для ослабления или исключения вредного влияния собственного излучения оптических деталей на работу высокочувствительных ФПУ, охлаждаемых до криогенных температур, продолжаются разработки ИКС, в которых оптическая система помещается вместе с ФПУ в единый охлаждаемый объем — DDCA (Detector-Dewar-Cooler Assembly). Достоинствами таких систем являются:

- отсутствие механической или электронной системы коррекции расфокусировки, возникающей при изменении температуры окружающей объектив среды;
- снижение требований к системе коррекции неоднородности чувствительности пикселей ФПУ, также возникающей при изменении температуры окружающей среды; кроме того, за счет уменьшения количества и длительности этапов калибровки ФПУ при такой коррекции уменьшается „нерабочее“ время функционирования системы, когда, например, перед ФПУ помещается равномерно излучающая шторка;

— снижение уровня фона от внутриприборного излучения, т.е. собственного излучения оптических деталей и их оправ, имеющих стабилизированную криогенную температуру охлаждения.

Интересной представляется конструкция ИКС со встроенной в сосуд Дьюара оптической системой, состоящей из трех линз и спектрального фильтра (рис. 2) [19]. Перед дьюаром расположен неохлаждаемый защитный оптический компонент — обтекатель, представляющий собой тонкий выпуклый мениск с одинаковыми внешним и внутренним радиусами, т.е. имеющий нулевую оптическую силу. Охлаждаемая до 80 К система с диафрагменным числом $K=2$ и угловым полем $105 \times 135,5^\circ$ предназначена для получения изображения дальнего поля при фокусировке на бесконечность или на другое фиксированное большое расстояние. В связи с разными углами падения лучей на поверхности компонентов использованы просветляющие покрытия двух типов (для малых и больших углов падения). Масса системы не превышает 5 г, а габариты невелики, что делает незначительной тепловую нагрузку (охлаждаемую массу) системы охлаждения.

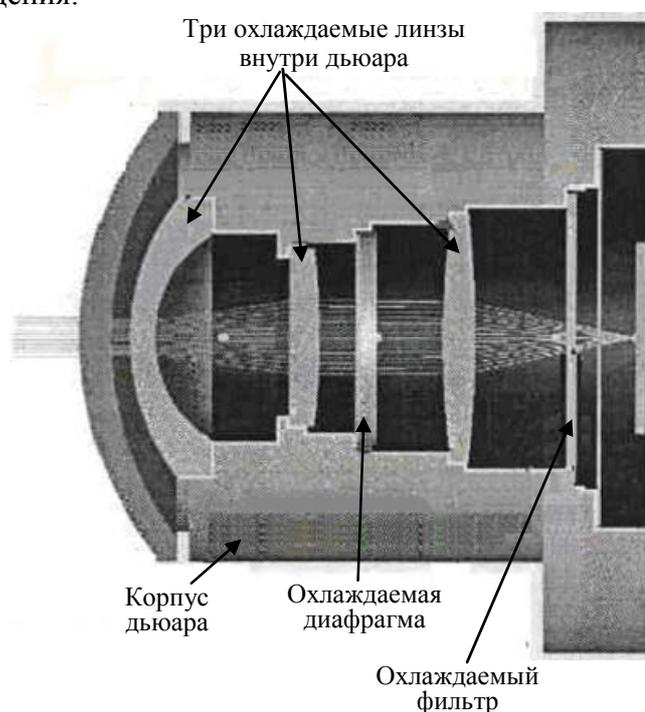


Рис. 2

Исследования этой системы показали, что качество изображения точечного объекта, полученного с ее помощью, близко к дифракционному пределу — значение функции передачи модуляции не снижалось менее $0,66 \dots 0,7$ от максимума для угла визирования 72° и пространственной частоты 24 ед./мм. В кружке рассеяния радиусом 7 мкм содержалось $70 \dots 75$ % от всего потока, собираемого системой. Изменение облученности чувствительного слоя ФПУ не превышало 10 % на краю поля размером 65° .

Одним из направлений развития современных ОЭС является создание адаптивных систем, способных изменять свои параметры и характеристики при изменении внешних условий. Простейшими являются системы, в которых автоматически изменяется величина потока при облученности на фоточувствительном слое ФПУ, что предотвращает насыщение ячеек схемы считывания зарядов с пикселей ФПУ или растекание зарядов по соседним пикселям, т.е. снижение разрешающей способности всей системы.

Примером таких систем является устройство, работающее в видимом и ближнем ИК-диапазонах и названное динамическим солнечным фильтром (DSF — Dynamic Sunlight Filter) [20]. В исходном (нормальном) состоянии, когда облученность не превышает некоторого заданно-

го уровня, фильтр полностью прозрачен. После устранения внешней мощной засветки фильтр восстанавливает свое первоначальное пропускание. Фильтр создан с использованием новых наноструктур и наночастиц, применяемых для формирования нелинейных рассеивающих сред. Такие среды при малых мощностях проходящего через них сигнала только поглощают поток, но рассеивают его. Авторы [20] предполагают, что время отклика (постоянная времени фильтра) не превышает 50 мс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тарасов В. В., Торшина И. П., Якушенков Ю. Г.* Инфракрасные системы 3-го поколения. М.: Логос, 2011. 240 с.
2. *Breiter R., Ihle T., Wendler J. et al.* MCT IR detection modules with 15 mcm pitch for high reliability applications // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 766039-1...11.
3. *Abbott P., Pillans L., Knowles P., McEwen R. K.* Advances in dual-band IRFPAs made from HgCdTe grown by MOVPE // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 766035-1...11.
4. *Melkonian L., Bangs J., Elizondo L. et al.* Performance of MWIR and SWIR HgCdTe-based focal plane arrays at high operating temperatures // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602W-1...11.
5. *Gordon N. T.* Thermo electrically cooled focal plane arrays based on MCT // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602X-1...8.
6. *Gunapala S. D., Bandara S. V., Liu J. K. et al.* Demonstration of 1024 [1024 pixel dual-band QWIP focal plane array // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76603L-1...8.
7. *Hood A., Evans A. J., Ikhlassi A. et al.* LWIR high performance focal plane arrays based on type-II strained layer superlattices (SLS) materials // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76601M-1...8.
8. *Razeghi M., Huang E. K., Pour B.-M.N.S.A., Delaunau P.-Y.* Type II antimonide-based superlattices for the third generation infrared focal plane arrays // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76601F-1...14.
9. *Battaglia J., Burzi V., Moyer B. et al.* Parameterized nonuniformity corrections (NUC) for non-temperature stabilized InGaAs SWIR sensing // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76600J-1...12.
10. *Klem E. J., Lewis J. S., Temple D.* Multispectral UV-Vis-IR imaging using low-cost quantum dot technology // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602E-1...9.
11. *Radebaugh R., Garaway I., Veprik A. M.* Development of miniature, high frequency pulse tube cryocoolers // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602J-1...11.
12. *Veprik A., Zehntzer S., Pundak N.* Split Stirling linear cryogenic cooler for a new generation of high temperature infrared images // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602K-1...13.
13. *Gordon N. T.* Thermoelectrically cooled focal plane arrays based on MCT // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602X-1...11.
14. *Bjork C., Wan W.* Mid-wave infrared (MWIR) panoramic sensor for various applications // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76600B-1...9.
15. *Nichols J. M., Waterman J. R.* Performance characteristics of a submarine panoramic infrared sensor // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 766005-1...9.
16. *Fontanella J.-C., Delacourt D., Klein Y.* ARTEMIS: first naval staringIRST in service // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 766006-1...11.
17. *Morrison R., Stack R., Athale R. et al.* An alternative approach to infrared optics // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76601Y-1...11.
18. *Le Noc L., Tremblay B., Martel A. et al.* 1280 x 960 pixel microscanned infrared imaging module // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 766021-1...10.
19. *Singer M.* Design of a cryogenic IR detector with integrated optics // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76601Z-1...9.
20. *Donval A., Fisher T., Blecher G., Oron M.* Dynamic sunlight filter (DSF) – a passive way to increase the dynamic range in visible and SWIR cameras // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 7660024-1...8.

Сведения об авторах

- Виктор Васильевич Тарасов** — д-р техн. наук, профессор; Московский государственный университет геодезии и картографии, кафедра оптико-электронных приборов; E-mail: doctortarasov@yandex.ru
- Юрий Григорьевич Якушенко** — д-р техн. наук, профессор; Московский государственный университет геодезии и картографии, кафедра оптико-электронных приборов; E-mail: yakush@miiigaik.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
30.08.11 г.

УДК 535.317

А. Л. СУШКОВ

**АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЗЕЙДЕЛЕВЫХ АБЕРРАЦИЙ
ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

Рассмотрен аппарат расчета хода параксиальных лучей в осесимметричных неоднородных оптических средах с изменением показателя преломления по трем координатам. На примере линзы со сфероконцентрической неоднородностью показателя преломления показана практическая возможность расчета параксиальных отрезков и коэффициентов aberrаций третьего порядка оптической системы с неоднородными линзами.

Ключевые слова: неоднородный показатель преломления, коэффициенты aberrаций, линза со сфероконцентрическим градиентом показателя преломления.

Известные численные методы расчета хода реальных лучей через осесимметричные неоднородные среды связаны с решением дифференциальных уравнений второго порядка [1]. При этом анализ влияния коэффициентов полинома, описывающего распределение показателя преломления (РПП), и толщин градиентных линз на aberrации оптической системы затруднен из-за большого объема вычислений.

Цель настоящей статьи — продемонстрировать возможность введения в инженерную практику универсального алгоритма расчета хода параксиальных лучей и коэффициентов aberrаций третьего порядка систем, включающих неоднородные оптические элементы.

Теория aberrаций третьего порядка неоднородного оптического элемента не позволяет точно оценить величину aberrации, но обеспечивает получение намного большего объема информации относительно влияния поверхностей линз и неоднородных оптических сред на aberrации третьего порядка.

Как известно, теория aberrаций третьего порядка позволяет вычислить величины углов наклона и высоты первого и второго вспомогательных лучей. Для однородных систем формулы расчета коэффициентов aberrаций третьего порядка широко применяются в программах анализа оптических систем [2, 3].

В работах [4—6] представлен аппарат расчета aberrаций третьего порядка, построенный на вычислении параметров первого и второго вспомогательных лучей, проходящих через однородные и неоднородные осесимметричные оптические среды с произвольным законом распределения показателя преломления.

Условием расчета коэффициентов aberrаций в системе координат $OXYZ$, где ось Z — оптическая ось, является наличие известной функциональной зависимости углов наклона и высот первого и второго вспомогательных лучей в неоднородных средах.

В работе [5] функции высот и углов представлены в виде числовых рядов по координате z , которые обозначим через $h(z)$, $H(z)$ и $\alpha(z)$, $\beta(z)$. В неоднородной среде угол наклона луча является производной от функции высоты луча: $\alpha(z) = \dot{h}(z)$ и $\beta(z) = \dot{H}(z)$.

Согласно [4, 6] параксиальная высота $y(z)$ произвольного луча может быть записана в виде линейной функции через его высоту на предмете (T) и входном зрачке (Q):

$$y(z) = h(z)Q + H(z)T, \tag{1}$$

где Q и T — нормированные координаты луча в плоскости входного зрачка и плоскости предмета.

Ход первого и второго вспомогательных лучей в системе координат, отнесенной к первой поверхности линзы, показан на рис. 1.

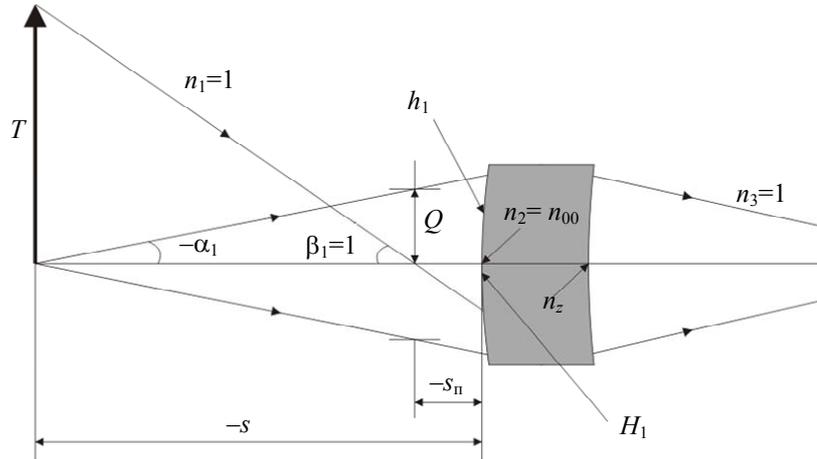


Рис. 1

В общем случае функция РПП оптической среды представляется в виде степенного ряда [5]

$$n(z, y) = n_0(z) + n_1(z)y^2 + n_2(z)y^4 + \dots, \tag{2}$$

где коэффициенты $n_0(z)$, $n_1(z)$, $n_2(z)$, в свою очередь, также представлены степенными рядами:

$$\left. \begin{aligned} n_0(z) &= n_{00} + n_{01}z + n_{02}z^2 + \dots, \\ n_1(z) &= n_{10} + n_{11}z + n_{12}z^2 + \dots, \\ n_2(z) &= n_{20} + n_{21}z + n_{22}z^2 + \dots \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

Контроль сходимости каждого из степенных рядов (3) производится путем сравнения величин параксиального инварианта I для каждой поверхности оптической системы. Обобщенный параксиальный инвариант I для k -й поверхности определяется как

$$I = n_k (H_k \alpha_k - h_k \beta_k), \quad k = \overline{1, p}. \tag{4}$$

Для первой и второй производных функции высоты луча $y(z)$ (см. формулу (1)) справедливы выражения

$$\dot{y}(z) = \dot{h}(z)Q + \dot{H}(z)T, \quad \ddot{y}(z) = \ddot{h}(z)Q + \ddot{H}(z)T. \tag{5}$$

Дифференциальное уравнение для хода луча [5] в меридиональной плоскости в системе координат, отнесенной к предмету, имеет вид

$$\frac{\partial n(z, \xi)}{\partial z} (1 + \dot{y}^2) \dot{y} + n(z, \xi) \ddot{y} - (1 + \dot{y}^2) \frac{\partial n(z, \xi)}{\partial y} = 0, \tag{6}$$

где $\xi = y^2$.

Подстановка уравнений (5) в выражение (6) с исключением величин высшего порядка малости позволяет получить общую запись уравнения для обоих вспомогательных лучей.

Для первого вспомогательного луча при $y(z)=h(z)$ выражение (6) преобразуется к виду

$$\ddot{h}(z)(n_{00} + n_{01}z + n_{02}z^2 + \dots) + \dot{h}(z)(n_{01} + 2n_{01}z + \dots) - 2h(z)(n_{10} + n_{11}z + n_{12}z^2 + \dots) = 0. \quad (7)$$

С учетом того, что уравнение (7) должно удовлетворяться для всех Q и T , коэффициенты при них (в силу независимости величин Q и T) должны быть равны нулю [5].

Решение (7) получено при представлении функции высоты луча $h(z)$ в виде ряда

$$h(z) = \sum_{v=0}^{\infty} A_v z^v = A_0 + A_1 z + A_2 z^2 + \dots, \quad (8)$$

где A_0 и A_1 определяются высотой луча и углом его наклона к оптической оси на входе в неоднородную среду.

Первая и вторая производные функции высоты луча $h(z)$ определяются как

$$\left. \begin{aligned} \dot{h}(z) &= \sum_{v=0}^{\infty} (v+1)A_{v+1}z^v = A_1 + 2A_2z + 3A_3z^2 + \dots, \\ \ddot{h}(z) &= \sum_{v=0}^{\infty} (v+2)(v+1)A_{v+2}z^v = 2A_2 + 6A_3z + 12A_4z^2 + \dots \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставив выражения (9) в уравнение (7), получим

$$\begin{aligned} \sum_{v=0}^{\infty} (v+2)(v+1)A_{v+2}z^v [n_{00} + n_{01}z + n_{02}z^2] + \sum_{v=0}^{\infty} (v+1)A_{v+1}z^v [n_{01} + 2n_{02}z] - \\ - 2 \sum_{v=0}^{\infty} A_v z^v [n_{10} + n_{11}z + n_{12}z^2] = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Приравняв коэффициенты различных степеней в тождестве (10) к нулю, получим в общем случае рекурсивное соотношение для A_m :

$$\begin{aligned} A_m = \left\{ \sum_{v=2}^{m-1} [2A_{v-2}n_{1,m-v} - v(v-1)A_v n_{0,m-v} - (v-m+1)(v-1)A_{v-1}n_{0,m-v+1}] - \right. \\ \left. - (m-1)A_{m-1}n_{01} + A_{m-2}n_{10} \right\} / m(m-1)n_{00}. \end{aligned} \quad (11)$$

После задания показателей преломления по формулам (3) вычисляются коэффициенты A_m и определяются степенные ряды для высоты любого параксиального луча.

Угол преломления луча определяется по известным формулам параксиальной оптики однородных сред с учетом кривизны поверхности и с использованием величин n_{00} и n'_{00} в качестве показателей преломления.

Для проверки сходимости рядов (8) и (9) для каждой поверхности по формуле (4) вычисляется параксиальный оптический инвариант. Если значения инвариантов идентичны, то ряды сходятся и расчет продолжается. При несовпадении значений инвариантов необходимо увеличить точность расчета путем введения большего числа членов в разложении $h(z)$.

В системе координат, отнесенной к поверхности линзы, для коэффициентов аберраций третьего порядка осесимметричной неоднородной оптической системы выражения известны [7]. Коэффициенты аберраций являются суммой двух составляющих, обусловленных преломлением луча на поверхности ($\bar{S}_{i,k}$) и прохождением луча через неоднородную среду ($\tilde{S}_{i,k}$):

$$S_i = \bar{S}_{i,k} + \tilde{S}_{i,k}, \quad (12)$$

где S_i , $i = I \dots V$, — коэффициент аберраций третьего порядка оптической системы: S_I — сферическая аберрация, S_{II} — кома, S_{III} — астигматизм, S_{IV} — кривизна поля изображения, S_V — дисторсия.

Формулы для вычисления составляющей $\bar{S}_{i,k}$ имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{S}_I &= \sum_{k=1}^p (h_k P_k + K_k h_k^4); \\
 \bar{S}_{II} &= \sum_{k=1}^p \left[h_k P_k \left(\frac{\delta \beta_k}{\delta \alpha_k} \right) + K_k h_k^3 H_k \right]; \\
 \bar{S}_{III} &= \sum_{k=1}^p \left[h_k P_k \left(\frac{\delta \beta_k}{\delta \alpha_k} \right)^2 + K_k h_k^2 H_k^2 \right]; \\
 \bar{S}_{IV} &= - \sum_{k=1}^p \left(\frac{\delta \mu_k}{r_k} \right); \\
 \bar{S}_V &= \sum_{k=1}^p \left\{ \left[h_k P_k \left(\frac{\delta \alpha_k}{\delta \mu_k} \right)^2 + \frac{J^2}{h_k} \frac{\delta(\alpha_k n_k)}{n_k n_{k+1}} \right] \frac{\delta \beta_k}{\delta \alpha_k} + K_k h_k H_k^3 \right\}; \\
 K_k &= \frac{4 \delta n_{1,k}}{r_k} + \frac{\delta \dot{n}_{0,k}}{r_k^2}, \quad P_k = \left(\frac{\delta \alpha_k}{\delta \mu_k} \right)^2 \delta(\alpha_k \mu_k), \quad \mu_k = \frac{1}{n_k}; \\
 \delta \alpha_k &= \alpha'_k - \alpha_k, \quad \delta \beta_k = \beta'_k - \beta_k; \quad J = -n_1 (s_1 - s_{II}) \alpha_1 \beta_1, \quad s_1 \neq \infty; \quad J = -n_1 h_1 \beta_1, \quad s_1 = \infty,
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где s_1, s_{II} — расстояния от первой поверхности до предмета и входного зрачка оптической системы; $\alpha_k, \beta_k, \alpha'_k, \beta'_k$ — величины углов падения и преломления первого и второго вспомогательных лучей для k -й поверхности; h_k, H_k — высоты первого и второго вспомогательных лучей на поверхности с радиусом кривизны r_k ; P_k, K_k — коэффициенты, учитывающие соответственно однородную и неоднородную природу оптической среды.

Составляющая $\tilde{S}_{i,k}$ определяется следующими интегральными выражениями, где интегрирование ведется в пределах от 0 до d (d — толщина линзы):

$$\left. \begin{aligned}
 \tilde{S}_I &= \sum_{k=1}^p \left[\Delta(n_{0,k} h_k \alpha_k^3) - \int (8n_{2,k+1} h_{k+1}^4 + 4n_{1,k+1} h_{k+1}^2 \alpha_{k+1}^2 - n_{0,k+1} \alpha_{k+1}^4) dz \right]; \\
 \tilde{S}_{II} &= \sum_{k=1}^p \left[\Delta(n_{0,k} h_k \alpha_k^2 \beta_k) - \int (8n_{2,k+1} h_{k+1}^3 H_{k+1} + \right. \\
 &\quad \left. + 2n_{1,k+1} h_{k+1} \alpha_{k+1} (h_{k+1} \beta_{k+1} + H_{k+1} \alpha_{k+1}) - n_{0,k+1} \alpha_{k+1}^3 \beta_{k+1}) dz \right]; \\
 \tilde{S}_{III} &= \sum_{k=1}^p \left[\Delta(n_{0,k} h_k \alpha_k \beta_k^2) - \int (8n_{2,k+1} h_{k+1}^2 H_{k+1}^2 + \right. \\
 &\quad \left. + 4n_{1,k+1} h_{k+1} H_{k+1} \alpha_{k+1} \beta_{k+1} - n_{0,k+1} \alpha_{k+1}^2 \beta_{k+1}^2) dz \right]; \\
 \tilde{S}_{IV} &= -2 \sum_{k=1}^p \int \frac{n_{1,k+1}}{n_{0,k+1}} dz; \\
 \tilde{S}_V &= \sum_{k=1}^p \left[\Delta(n_{0,k} h_k \beta_k^3) - \int (8n_{2,k+1} h_{k+1} H_{k+1}^3 + \right. \\
 &\quad \left. + 2n_{1,k+1} H_{k+1} \beta_{k+1} (h_{k+1} \beta_{k+1} + H_{k+1} \alpha_{k+1}) - n_{0,k+1} \alpha_{k+1} \beta_{k+1}^3) dz \right],
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где Δ — разность значений выражений в скобках, соответствующих параметру луча перед преломлением на второй поверхности и после преломления на первой поверхности.

При подстановке значений высот и углов наклона лучей (см. формулы (8), (9)) в систему уравнений (13) получаем значения составляющей $\bar{S}_{i,k}$, а при численном интегрировании функций углов и высот — составляющей $\tilde{S}_{i,k}$.

В сферической системе координат линейное сфероцентрическое распределение показателя преломления согласно [8] имеет вид

$$n(r - \rho) = n_{\rho 0} + n_{\rho 1} (r - \rho), \quad (15)$$

где $n_{\rho 0}$ — показатель преломления материала неоднородной среды в центре сферической системы координат, r — радиус сферического РПП, ρ — сферическая координата, $n_{\rho 1}$ — линейный коэффициент РПП.

После подстановки значений r в формулу (15) получаем

$$n(\rho) = n_{\rho 0, \text{пр}} + n_{\rho 1, \text{пр}} \rho.$$

В последующих формулах для упрощения записи под величинами $n_{\rho 0}$, $n_{\rho 1}$ будем понимать их приведенные значения.

При переходе из сферической системы координат в прямоугольную, отнесенную к первой поверхности линзы, согласно [8] имеем

$$n_{00} = n_{\rho 0}, \quad n_{01} = n_{\rho 1}, \quad n_{10} = -n_{\rho 1} \frac{1}{2r}, \quad n_{11} = n_{\rho 1} \frac{1}{2r^2}, \quad n_{20} = n_{\rho 1} \frac{1}{8r^3}, \quad n_{21} = n_{\rho 1} \frac{3}{8r^4}.$$

Показатель преломления на оси z на выходе из неоднородной среды линзы определяется по формуле

$$n_z = n_{00} + n_{01} d.$$

Неоднородный ПП задается полиномом (2), где функции $n_0(z)$, $n_1(z)$, $n_2(z)$ представляют собой линейные зависимости:

$$n_0(z) = n_{00} + n_{01} z, \quad n_1(z) = n_{10} + n_{11} z, \quad n_2(z) = n_{20} + n_{21} z.$$

Угол преломления луча на поверхности вычисляется по известной формуле для однородных сред:

$$\alpha' = \frac{h \frac{1}{R} (n' - n) + \alpha n}{n'}, \quad (16)$$

где R — радиус кривизны поверхности линзы.

Поскольку коэффициенты $A_0 = h_1$, $A_1 = -\alpha_2$ (см. формулу (8)), для коэффициентов полиномов высоты луча и угла его наклона согласно (11) получим

$$A_2 = \frac{2A_0 n_{10} - A_1 n_{01}}{2n_{00}}, \quad A_3 = \frac{A_1 n_{10} + A_0 n_{11} - A_2 n_{01}}{3n_{00}}, \quad A_4 = \frac{2A_2 n_{10} - 2A_1 n_{11} - 9A_3 n_{01}}{12n_{00}},$$

$$A_5 = \frac{A_3 n_{10} - A_2 n_{11} - 8A_4 n_{01}}{10n_{00}} \text{ и т. д.}$$

Высота h_2 луча на второй поверхности согласно формуле (8) и угол $\tilde{\alpha}_2$ на выходе из неоднородной среды согласно формуле (9) определяются полиномами

$$h_2 = A_0 + A_1 d + A_2 d^2 + A_3 d^3 + A_4 d^4 + A_5 d^5, \quad (17)$$

$$\tilde{\alpha}_2 = -(A_1 + 2A_2 d + 3A_3 d^2 + 4A_4 d^3 + 5A_5 d^4).$$

Угол осевого луча в пространстве изображений согласно выражению (16) вычисляем по формуле

$$\alpha_3 = h_2 \frac{1}{R_2} (1 - n_z) + \tilde{\alpha}_2 n_z.$$

Заднее фокусное расстояние и задний фокальный отрезок линзы рассчитываются по известным зависимостям: $f' = h_1 / \alpha_3$ и $s'_{F'} = h_2 / \alpha_3$.

Расчет высоты второго вспомогательного луча осуществляется по формулам (17) с заменой коэффициентов A_v на B_v :

$$H(z) = \sum_{v=0}^{\infty} B_v z^v = B_0 + B_1 z + B_2 z^2 + \dots \quad (18)$$

при следующих исходных данных: $H_1 = s_{\text{п}}$, $\beta_1 = 1$; коэффициенты B_0, B_1, B_2 и т.д. вычисляются по формуле (18), при этом $B_0 = H_1, B_1 = -\beta_2$.

Значения парааксиального инварианта для первой и второй поверхностей вычисляются как

$$I_1 = n_1 (H_1 \alpha_1 - h_1 \beta_1), \quad I_2 = n_z (H_2 \tilde{\alpha}_2 - h_2 \tilde{\beta}_2),$$

Функции углов и высот представляются полиномами

$$\alpha_2(z) = -(A_1 + 2A_2 z + 3A_3 z^2 + 4A_4 z^3 + 5A_5 z^4 + \dots), \quad (19)$$

$$h_2(z) = A_0 + A_1 z + A_2 z^2 + A_3 z^3 + A_4 z^4 + A_5 z^5 + \dots;$$

$$\beta(z) = -(B_1 + 2B_2 z + 3B_3 z^2 + 4B_4 z^3 + 5B_5 z^4), \quad (20)$$

$$H(z) = B_0 + B_1 z + B_2 z^2 + B_3 z^3 + B_4 z^4 + B_5 z^5.$$

Подстановка формул (19) и (20) в интегральные выражения (14) и численное интегрирование позволяют получить численные значения коэффициентов aberrаций $S_1 \dots S_v$.

Рассмотрим пример расчета коэффициентов aberrаций S_I и S_{II} одиночной линзы с линейным сфероконцентрическим РПП. Расчет производился при следующих параметрах линзы (рис. 2): $r = 12,792$ мм, $R_1 = 12,792$ мм, $R_2 = 197,706$ мм, $d = 1$ мм, $n_{p0} = 1,65$, $n_{p1} = 0,031551$ мм⁻¹, $s_{\text{п}} = 0$, $f' = 20,00$ мм, $s'_{F'} = 19,376$ мм.

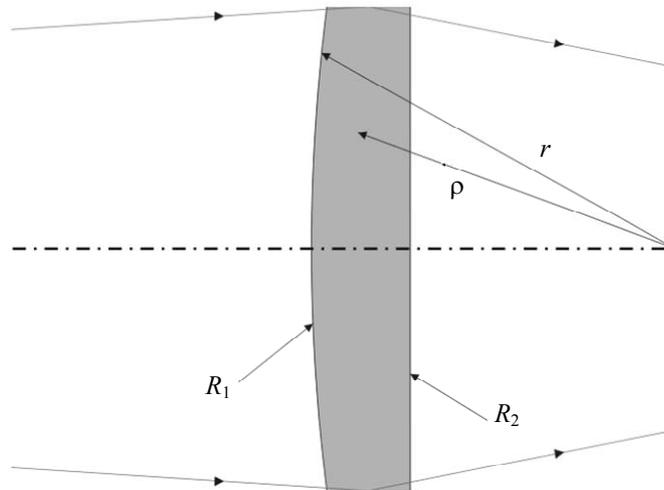


Рис. 2

В результате расчета углов наклона и высот первого и второго вспомогательных лучей по формулам (19), (20) при исходных $\alpha_1 = 0, \beta_1 = 1, h_1 = f'$ получим:

$$\alpha_2=0,615964, \quad \tilde{\beta}_2 = 0,594224, \quad h_2=19,376600,$$

$$\alpha_3=1,000000, \quad \beta_3=1,001287, \quad H_2=-0,600180.$$

Значения параксиальных инвариантов для первой и второй поверхностей:

$$I_1=-20,001824, \quad I_2=-20,001825.$$

Расчет коэффициента S_I . Для однородной и неоднородной сред коэффициент \bar{S}_I (см. выражения (13)) рассчитывается соответственно как

$$\bar{S}'_I = h_1 P_1 + h_2 P_2; \quad \bar{S}''_I = K_1 h_1^4 + K_2 h_2^4,$$

где

$$K_1 = \frac{4n_{10}}{R_1} + \frac{n_{01}}{R_1^2}, \quad K_2 = -\frac{4(n_{10} + n_{11}z)}{R_2} - \frac{n_{01}}{R_2^2}.$$

Согласно выражениям (14) для составляющей $\tilde{S}_{i,k}$ коэффициенты вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{I,1} &= n_z h_2 \tilde{\alpha}_2^3 - n_2 h_1 \alpha_2^3; \quad \tilde{S}_{I,2} = \int_0^d n_0(z) \alpha^4(z) dz; \\ \tilde{S}_{I,3} &= \int_0^d -4n_1(z) h^2(z) \alpha^2(z) dz, \quad \tilde{S}_{I,4} = \int_0^d -8n_2(z) h^4(z) dz. \end{aligned}$$

По суммарному значению коэффициента S_I , определяемому как

$$S_I = \bar{S}'_I + \bar{S}''_I + \tilde{S}_{I,1} + \tilde{S}_{I,2} + \tilde{S}_{I,3} + \tilde{S}_{I,4},$$

вычисляется величина продольной сферической аберрации для края зрачка диаметром 5 мм:

$$\Delta s' = -\frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 u S_I, \quad \Delta s' = 0,000 \text{ мм},$$

где u — апертурный угол линзы в пространстве изображений.

Расчет коэффициента S_{II} . Для однородной среды коэффициент

$$\bar{S}'_{II} = h_1 P_1 \frac{\Delta\beta_1}{\Delta\alpha_1} + h_2 P_2 \frac{\Delta\beta_2}{\Delta\alpha_2},$$

для неоднородной —

$$\bar{S}''_{II} = K_1 h_1^3 H_1 + K_2 h_2^3 H_2.$$

Для составляющей $\tilde{S}_{i,k}$ коэффициенты рассчитываются как

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{II,1} &= n_z h_2 \tilde{\alpha}_2^2 \beta_2 - n_2 h_1 \alpha_2^2 \beta_2; \\ \tilde{S}_{II,2} &= \int_0^d n_0(z) \alpha^3(z) \beta(z) dz; \\ \tilde{S}_{II,3} &= \int_0^d -2n_1(z) h(z) \alpha(z) [h(z) \beta(z) + H(z) \alpha(z)] dz, \\ \tilde{S}_{II,4} &= \int_0^d -8n_2(z) h^3(z) H(z) dz. \end{aligned}$$

Суммарная величина коэффициента S_{II} :

$$S_{II} = \bar{S}'_{II} + \bar{S}''_{II} + \tilde{S}_{II,1} + \tilde{S}_{II,2} + \tilde{S}_{II,3} + \tilde{S}_{II,4}.$$

Таблица 1

| Коэффициент S_I | Коэффициент S_{II} |
|----------------------------|----------------------------|
| $\bar{S}'_I = 28,072$ | $\bar{S}'_{II} = -0,744$ |
| $\bar{S}''_I = -27,182$ | $\bar{S}''_{II} = -0,114$ |
| $\tilde{S}_{I,1} = 0,606$ | $\tilde{S}_{II,1} = 0,203$ |
| $\tilde{S}_{I,2} = 0,254$ | $\tilde{S}_{II,2} = 0,244$ |
| $\tilde{S}_{I,3} = 0,776$ | $\tilde{S}_{II,3} = 0,366$ |
| $\tilde{S}_{I,4} = -2,527$ | $\tilde{S}_{II,4} = 0,039$ |
| $S_I = 0,000$ | $S_{II} = -0,004$ |

Анализ составляющих коэффициентов S_I и S_{II} , приведенных в табл. 1, показывает, что исправление сферической aberrации произошло за счет взаимной компенсации коэффициентов \bar{S}'_I, \bar{S}''_I , имеющих разные знаки, а исправление комы — за счет компенсации коэффициентов $\bar{S}'_{II}, \bar{S}''_{II}$ и $\tilde{S}_{II,1}, \tilde{S}_{II,2}, \tilde{S}_{II,3}, \tilde{S}_{II,4}$. Суммарные величины коэффициентов S_I и S_{II} имеют близкие к нулю значения, что свидетельствует об апланатической коррекции aberrаций. Результаты расчета в программной среде OPAL продольной ($\Delta s'$) и поперечной ($\Delta y'$) сферической aberrаций, а также отклонения от условия изопланазии (η) неоднородной и однородной линз приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

| $m_{зр}$, мм | $\Delta s'$, мм | $\Delta y'$, мм | η , % |
|---------------|------------------|------------------|------------|
| 2,500 | -0,0014 | -0,0001 | -0,0072 |
| 2,165 | -0,0007 | -0,0000 | -0,0041 |
| 1,767 | -0,0003 | -0,0000 | -0,0018 |
| 1,250 | -0,0000 | -0,0000 | -0,0005 |
| 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Таблица 3

| $m_{зр}$, мм | $\Delta s'$, мм | $\Delta y'$, мм | η , % |
|---------------|------------------|------------------|------------|
| 2,500 | -0,2306 | -0,0279 | -0,0950 |
| 2,165 | -0,1724 | -0,0180 | -0,0682 |
| 1,767 | -0,1145 | -0,0097 | -0,0435 |
| 1,250 | -0,0571 | -0,0034 | -0,0208 |
| 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Анализ табл. 2 и 3 показывает, что наличие линейной сфероконцентрической неоднородности показателя преломления линзы в области первой поверхности позволяет в 150 раз уменьшить сферическую aberrацию и более чем в 10 раз уменьшить отклонение от условия изопланазии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вычислительная оптика: Справочник / М. М. Русинов, А. П. Грамматин, П. Д. Иванов и др.; Под общ. ред. М. М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984.
2. Инструкция к пакету программ OPAL [Электронный ресурс]: <www.aco.ifmo.ru>.
3. Инструкция к программе Zemax [Электронный ресурс]: <www.zemax.com>.
4. Buchdahl H. A. Optical Aberration Coefficients. N.Y., Dover, 1968. P. 1—18.
5. Moore D. T. Design of singlets with continuously varying indices of refraction // JOSA. 1971. Vol. 62, N 7. P. 886—894.
6. Sands P. J. Third-order aberrations of inhomogeneous lenses // JOSA. 1970. N 60. P. 1436.

7. Сушков А. Л. Монохроматические аберрации градианов как базовых элементов жестких эндоскопов: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.
8. Сушков А. Л. Параметры сфероконцентрического распределения показателя преломления в сферической и прямоугольной системах координат // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 12. С. 54—60.

Сведения об авторе

Александр Леонидович Сушков — канд. техн. наук, доцент; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, кафедра оптико-электронных приборов научных исследований; E-mail: ale-sushkov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов
научных исследований

Поступила в редакцию
10.03.10 г.

УДК 537.311.322

И. В. ГОНЧАР, А. С. ИВАНОВ, В. В. МАНУХОВ, А. Б. ФЕДОРЦОВ

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ
ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛЕНОК**

Изложены принципы интерферометрических измерений толщины прозрачных полупроводниковых и диэлектрических слоев. Приведено описание модернизированного интерферометра: его оптико-механический тракт, электронная схема и программное обеспечение. Представлены математическое обоснование принципов измерения и электрическая схема регистрации сигнала; описана программа обработки данных на ПК.

Ключевые слова: тонкая пленка, интерферометр, лазер, оптическая схема, обработка сигнала.

Введение. В настоящее время для контроля толщины слоев и пленок, прозрачных в видимой или инфракрасной областях спектра, широко используются лазерные интерференционные методы [1 — 3], позволяющие проводить измерения для большинства полимерных, диэлектрических и полупроводниковых материалов. В основу этих методов положена интерференция лучей, один из которых отражается верхней поверхностью пленки (слоя), а другой — нижней.

Коэффициент отражения излучения пленкой, вследствие интерференции лучей внутри нее, зависит от соотношения между оптической толщиной пленки и длиной волны λ зондирующего излучения. Оптическая разность хода Δ при прохождении луча через тонкую прозрачную пленку определяется как

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}, \quad (1)$$

где d — толщина исследуемого образца пленки; n — оптический показатель преломления материала образца; θ — угол падения лазерного луча на образец.

Когда оптическая разность хода Δ между двумя отраженными лучами составит целое число длин волн, коэффициент отражения света пленкой будет максимальным. Иначе говоря, в отраженном свете будет наблюдаться интерференционный максимум. Если теперь подсчитать число интерференционных максимумов m , периодически возникающих при изменении угла падения светового луча на образец от θ_1 до θ_2 , то толщину пленки можно определить по формуле [3]

$$d = \frac{m\lambda}{2\left(\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_2} - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}\right)}. \quad (2)$$

Для реализации данного метода измерений необходимо изменять в строго определенных пределах угол падения светового луча на образец в фиксированной точке на его поверхности. Поставленная задача была решена с помощью оптико-механической схемы [4], в которой единственным подвижным элементом было вращающееся плоское зеркало. В этой схеме использовалось известное из математики свойство эллипса: нормаль к эллипсу в любой точке является биссектрисой угла, образованного фокальными радиус-векторами этой точки. В результате световой луч, вышедший из одного фокуса эллипса, после отражения от любой точки эллипсоидной поверхности попадает во второй фокус эллипсоида. Созданный на основе предложенной схемы прибор [5] обеспечивает проведение 50 измерений толщины пленки в секунду при времени одного измерения менее 0,001 с. Это позволило контролировать толщины не только твердых, но и жидких пленок.

Дальнейшее совершенствование измерительной аппаратуры состояло в промышленном изготовлении ее оптико-механической части, в разработке электронного усилителя-преобразователя для трансформации аналоговых сигналов фотодиода в коды, необходимые для ввода информации в персональный компьютер, и в разработке математического обеспечения — программ измерений и обработки результатов [6, 7].

В настоящее время возобновился интерес к контролю толщины тонких прозрачных слоев. В связи с этим авторами настоящей статьи была проведена модернизация созданного ранее интерферометра „Монохром-3“. Доработки коснулись как оптико-механического тракта, так и системы регистрации, сбора и обработки экспериментальных данных. На смену эллиптическим зеркалам пришли сферические линзы и зеркала [8]. Оптические схемы с использованием этих элементов приведены в работе [9]. Отметим, что сферические зеркала дешевле эллиптических и проще в изготовлении. При проектировании прибора можно выбрать сферические зеркала из перечня серийно выпускаемых, тогда как эллиптические зеркала — уникальные изделия, использующиеся, главным образом, в спектрометрах и спектрофотометрах. Изготовление эллиптических зеркал на заказ для небольшой партии приборов оказывается либо чрезвычайно дорогим, либо попросту невозможным. Поэтому обычно конструкторы вынуждены довольствоваться только имеющимися эллиптическими зеркалами определенных размеров с заданными геометрическими параметрами. В приборе „Монохром-3“ применяются нестандартный способ сопряжения с ЭВМ, устаревшие управляющая программа для MS-DOS и элементная база, что не позволяет полностью раскрыть потенциал прибора и использовать его с сегодняшними моделями компьютеров.

Поэтому была поставлена задача по разработке нового варианта прибора — „Монохром-4“. Использование современной элементной базы в схеме усилителя сигнала фотоприемника позволило снизить уровень шумов, увеличить точность измерений и уменьшить габариты устройства. Также был изменен способ сопряжения с компьютером. Применение аналого-цифрового преобразователя (АЦП) упростило задачу регистрации сигнала, а современное программное обеспечение для многозадачных операционных систем (LabView) позволило ускорить обработку данных и получить представление информации в графическом виде.

Оптико-механическая схема прибора. При создании интерферометра „Монохром-4“ были разработаны и испытаны два варианта описанных в работах [8, 9] оптико-механических схем: с использованием стеклянных линз и сферических зеркал с наружным напылением металла. В обеих конструкциях применялись одинаковые узлы и оптические элементы. Источником излучения служил гелий-неоновый лазер ЛГ-207, генерирующий излучение с длиной волны $\lambda = 0,638$ мкм и мощностью 2 мВт. Установки были испытаны на полимерных

пленках, прозрачных в оптическом диапазоне. Вращение плоского зеркала осуществлялось двигателем постоянного тока ДПМ-24. Скорость вращения двигателя позволяла проводить 50 измерений в секунду. Зеркало устанавливалось таким образом, чтобы совместить ось вращения двигателя с плоскостью зеркала. Для измерения интенсивности отраженного от поверхности образца лазерного луча использовался кремниевый фотодиод ФД-7К. В схеме с линзами применялись две собирающие линзы диаметром 16 мм с фокусным расстоянием 12 мм. Первая линза размещалась на расстоянии 13—14 мм от поверхности образца. Возникновение сферической абберации делает невозможным использование всей поверхности линзы. “Полезный пробег” лазерного луча по ее поверхности составлял 10—11 мм. При этом диапазон изменения угла падения лазерного луча на образец равнялся 36° . Вторая линза обеспечивала попадание лазерного луча во входное окно фотоприемника.

В установке со сферическими зеркалами использовались два одинаковых вогнутых зеркала с фокусным расстоянием 30 мм. Эти параметры обеспечивают угловой диапазон не менее 40° .

Электронная схема сбора данных и обработки сигнала. Структурная схема электронной части прибора, отражающая последовательность регистрации и обработки сигнала, приведена на рис. 1, а. Усилитель-формирователь необходим для преобразования выходного тока фотоприемника во входное напряжение АЦП и создания на его входе требуемого уровня сигнала. Электронная схема усилителя-формирователя (рис. 1, б) позволяет согласовать выходное сопротивление фотодетектора с последующим входным сопротивлением АЦП для исключения потерь полезного сигнала и искажений формы его амплитудной огибающей. Для подачи напряжения смещения на фотоприемник и питания усилителя применен блок питания, схема которого обеспечивает выпрямленное двуполярное стабилизированное напряжение с малым уровнем пульсаций.

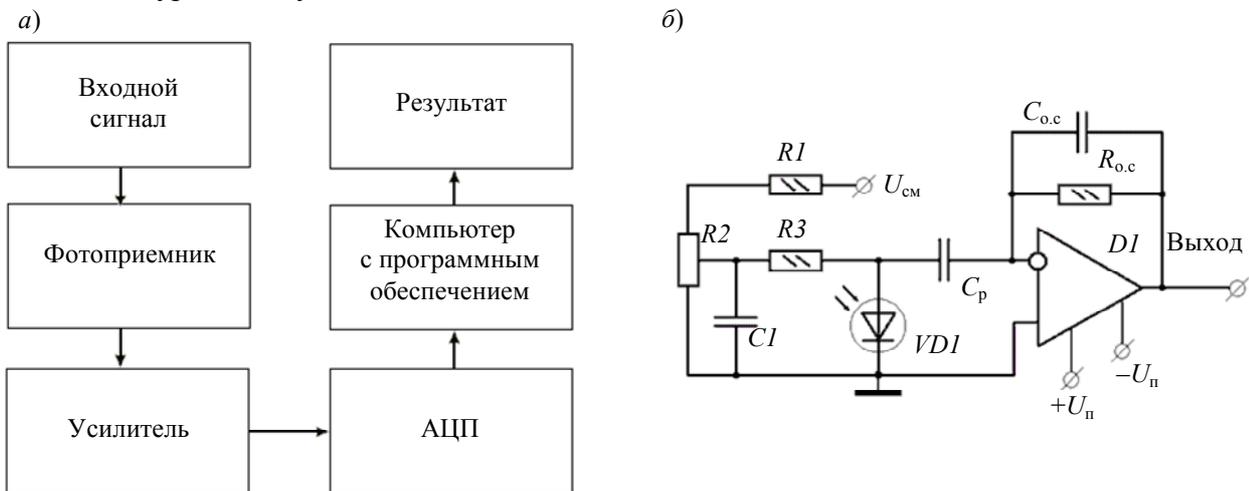


Рис. 1

После предварительного усиления аналоговый сигнал поступает на вход АЦП. Аналоговый сигнал отличается от других форм сигнала тем, что переносимая им полезная информация заключена не только в уровне сигнала, но и в самой форме огибающей, которая определяет его динамику. При обработке подобных сигналов существенными являются такие характеристики его формы, как крутизна, местоположение и характер пиков, а также точное количество этих пиков, что, безусловно, — наиболее важная характеристика для производимых вычислений в данном случае. Поэтому для получения как можно более точной формы сигнала необходимо использование высокоскоростного преобразователя, а измерения должны быть произведены с частотой, позволяющей корректно воспроизвести форму сигнала для его правильной обработки.

Определить требуемую частоту преобразования можно исходя из следующих соображений. Число интерференционных максимумов m , возникающих при изменении угла падения луча от θ_1 до θ_2 , связано с толщиной t пленки, длиной волны λ зондирующего луча и показателем преломления n материала пленки [1]:

$$m = \frac{t|\varphi(\theta_2) - \varphi(\theta_1)|}{\lambda}, \quad (3)$$

где $\varphi(\theta) = 2(n^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}$.

При длине волны $\lambda = 0,63$ мкм, максимальной толщине измеряемой пленки 0,5 мм и реализуемых в приборе предельных углах $\theta_1 = 25^\circ$ и $\theta_2 = 60^\circ$ получаем число максимумов, а значит, и периодов изменения интенсивности отраженного пленкой сигнала, равное примерно 50.

Частота вращения вала электродвигателя, приводящего в движение плоское зеркало, составляет 50 Гц. Вследствие особенностей построения оптико-механической схемы прибора продолжительность временного интервала, в течение которого регистрируется интерференционная картина, составляет 1/150 от периода одного полного оборота зеркала. Следовательно, быстродействие регистрирующего устройства должно составить $50 \times 150 \times 50 = 375\,000$ операций/с.

Согласно критерию Найквиста, частота дискретизации должна по крайней мере вдвое превышать частоту сигнала, содержащего полезную информацию. Однако для того чтобы иметь возможность анализировать форму исследуемого сигнала, необходимо выбрать частоту дискретизации не в два, а минимум в пять раз больше, чем частота полезного сигнала [10]. Оптимальная частота дискретизации АЦП при проведении измерений была определена равной 1 МГц (при 14-битовой разрядности преобразователя).

Для исключения влияния помех и джиттера необходима синхронизация и измерений, и временная синхронизация выборки. Наиболее полно изложенным критериям удовлетворяет АЦП типа NI-5122 производства фирмы "National Instruments" (США), обладающий предельной частотой преобразования 100 МГц.

Программное обеспечение. Для автоматизации процесса измерений и достаточно быстрой обработки сигнала необходимо использование дополнительного программного обеспечения. В качестве инструмента для сбора данных, анализа полученной информации и вычислений была применена среда разработки LabView. С ее помощью была написана программа, позволяющая отслеживать получение данных и в реальном времени проводить вычисления толщины образца в зависимости от формы огибающей импульса $Q(\theta)$ при изменении угла падения луча на образец [11]. Структурная схема программы приведена на рис. 2 (для наглядности все подпрограммы обозначены пронумерованными прямоугольниками).

Для управления процессом аналого-цифрового преобразования использовался виртуальный подприбор NI-SCOPE Express (обозначенный на рисунке прямоугольником 1), с помощью которого также была решена проблема синхронизации. С выхода NI-SCOPE Express цифровой сигнал поступает на стандартный подприбор Extract Portion of Signal (прямоугольник 2) для выделения части сигнала, необходимой для дальнейшей обработки. Выбором части сигнала можно управлять также вручную посредством элементов, подключенных к этому подприбору. Скриншот части пользовательского интерфейса, визуализирующий сигнал, поступающий с оптико-механического блока на АЦП, и выделяющий полезную часть этого сигнала, представлен на рис. 3, а, б соответственно.

Для последующей обработки необходимо преобразование типов данных, а также их инвертирование. Эти операции выполняются подпрограммой, обозначенной прямоугольником 3 на рис. 2. В полученном после инверсии массиве данных содержится информация о виде функции $Q(\theta)$. Этот массив данных обрабатывается подпрограммой (прямоугольник 4 на рис. 2)

для получения информации о количестве интерференционных максимумов в импульсе. В ней производится выравнивание сигнала по уровню и дифференцирование его для исключения постоянной составляющей импульса. После этого создается новый массив, содержащий „1“ при распознавании интерференционного локального максимума и „0“ в остальных случаях, затем ведется подсчет суммы элементов этого массива. Вычисленная сумма и будет равна численно количеству интерференционных максимумов, содержащихся в функции $Q(\theta)$ при изменении угла в пределах от θ_1 до θ_2 .

После того как количество максимумов определено, задачу о толщине пленки можно считать решенной в силу уравнения (3).

Вычисление конечного результата выполняется в подпрограмме 5 (см. рис. 2). Значение показателя преломления, необходимое для вычисления толщины, для удобства оператора вводится в этот модуль отдельно для целой и дробной частей.

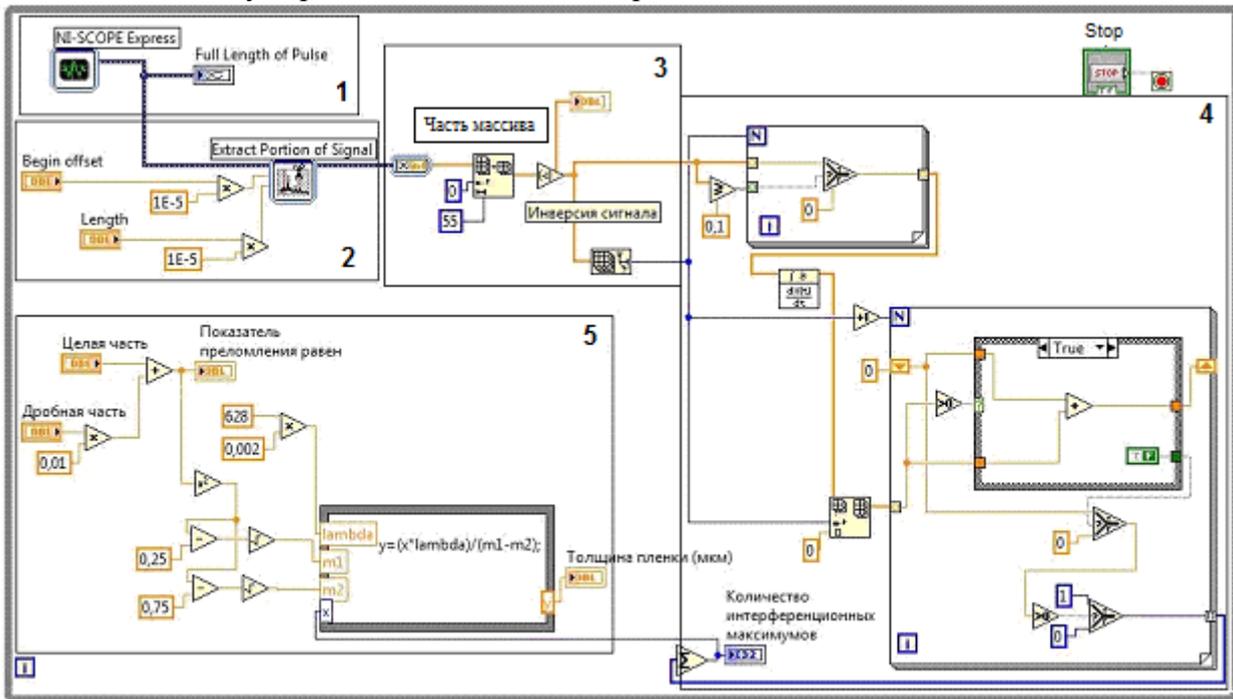


Рис. 2

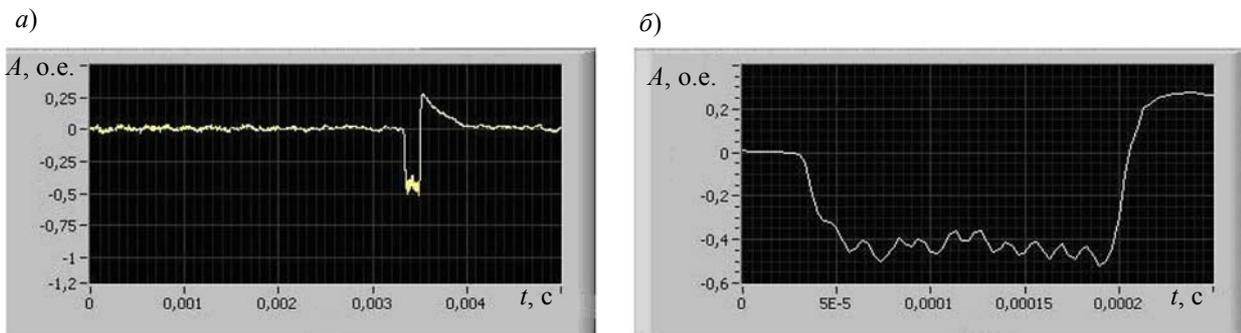


Рис. 3

Контрольные измерения. Для проведения контрольных испытаний были выбраны две пленки различной толщины, изготовленные из полипропилена (показатель преломления n для данного материала равен 1,48). Толщины пленок измерялись как с помощью предложенных оптико-механических схем, так и с помощью микрометра. Погрешность механического

лабораторного микрометра определялась как половина цены деления прибора, равного 0,01 мм, и составляла 5 мкм. Результаты измерений приведены в таблице.

| Объект исследования | Толщина пленки, мкм, при измерениях на основе | | |
|---------------------|---|---|---------------------------------|
| | схемы с использованием линз | схемы с использованием сферических зеркал | контактного способа (микрометр) |
| Пленка № 1 | 52,86 | 53,48 | 50 |
| Пленка № 2 | 21,71 | 21,15 | 20 |

Погрешность предложенного метода измерений зависит от количества интерференционных максимумов, регистрируемых прибором, и при неблагоприятных условиях (локальных загрязнениях образца, неточности его крепления) составляет ± 1 максимум, с увеличением толщины образца погрешность метода снижается. Рассчитанная приборная погрешность составляет менее 2 мкм, что меньше приборной погрешности лабораторного микрометра. При необходимости повышения точности измерений может быть введена дополнительная программа обработки сигнала, позволяющая получать значения толщины с учетом коэффициента отражения при одном из фиксированных углов падения луча, аналогично тому, как это описано в работе [10].

Отдельно следует отметить, что механический микрометр не позволяет измерять толщину в определенной точке; толщина определяется для некоторой площади образца, расположенной между губками микрометра. Реализованный оптический метод обеспечивает измерения толщины пленочных материалов в отдельно взятой области диаметром 200 мкм. Это является преимуществом данного метода в одних случаях, и недостатком в других, так как возможны колебания толщины образца в зависимости от того, в какой его части производятся измерения (напомним, что пленочные материалы могут иметь локальные дефекты в виде утолщения материала или уменьшения его толщины).

Заключение. В результате модернизации прибора было реализовано стандартное сопряжение с современными компьютерами и обеспечен режим вычислений в реальном времени с использованием графических возможностей современных операционных систем для вывода значений толщины.

Результаты проведенных исследований показывают также, что бесконтактные лазерные методы контроля толщин прозрачных слоев и пленок обеспечивают более высокую точность, чем контактные методы, и обладают повышенным быстродействием и локальностью измерений. Приборную погрешность интерференционных измерений можно снизить при необходимости еще в 10—20 раз [10].

Разработанные методы и устройства, позволяющие изменять угол падения лазерного луча на поверхность образца в заранее заданной точке, представляют самостоятельный технический интерес при проведении интерференционных измерений в других областях. Например, при измерении электрофизических параметров полупроводниковых материалов через образец пропускают зондирующее лазерное излучение. При этом угол падения лазерного луча на полупроводник изменяется путем вращения самого образца. При контроле структур металл—диэлектрик—полупроводник такой подход (работа на „просвет“) невозможен из-за наличия металлического слоя внутри структуры. Использование предложенных в настоящей статье оптических схем позволяет исследовать подобные структуры, регистрируя сигнал, отраженный от их поверхности.

Созданный быстродействующий лазерный интерферометр „Монохром-4“ получил серебряную медаль на Петербургской технической ярмарке 2011 г. в номинации „Новые высокотехнологичные разработки оборудования и наукоемкие технологии“. Этот прибор обеспечивает получение большого объема информации, чем это необходимо для контроля толщины

одного прозрачного слоя. В настоящее время изучаются методы обработки этой информации для получения данных о толщине слоев в двух- и многослойных покрытиях.

Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы“, научный проект № 4232, и Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“, гранты П898 и 16.740.111.0144.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ohyama T., Mori Y. H.* Optical method for measuring uniform thickness of the order of 10 μm — 1 mm of transparent solid and liquid films // *Rev. Sci. Instruments*. 1987. Vol. 58, N 10. P. 1860—1864.
2. *Ohyama T., Endoh K., Mikami F., Mori Y. H.* Optical interferometry for measuring insaneous thickness of transparent solid and liquid films // *Rev. Sci. Instruments*. 1988. Vol. 59. P. 2018.
3. *Nosoko T., Mori Y. H., Nagata T.* Improved interferometer for measuring unsteady film thickness // *Rev. Sci. Instruments*. 1996. Vol. 67. P. 2685—2690.
4. Быстрое измерение угловой зависимости коэффициента отражения лазерного луча неподвижным образцом / *А. С. Иванов, Д. Г. Летенко, И. А. Торчинский, А. Б. Федорцов, Ю. В. Чуркин* // *Приборы и техника эксперимента*. 1991. № 4. С. 222—224.
5. A fast operating device for measuring the thickness of transparent solid and liquid films / *A. B. Fedortsov, D. G. Letenko, Yu. V. Churkin, I. A. Torchinsky, A. S. Ivanov* // *Rev. Sci. Instruments*. 1992. Vol. 63, N 7. С. 3597—3582.
6. *Ценципер Л. М., Федорцов А. Б., Летенко Д. Г.* Прибор для измерения кинетики растекания и испарения жидких пленок в реальном масштабе времени // *Приборы и техника эксперимента*. 1996. № 1. С. 154—157.
7. The laser interferometry for the investigation of the evaporation kinetics of liquid films / *A. B. Fedortsov, D. G. Letenko, L. M. Tsentsiper, A. S. Ivanov, I. A. Torchinsky* // *Europhysics Conference Abstracts*. 1993. Vol. 17. P. 1535.
8. Пат. 2102702 РФ. Устройство для неразрушающего измерения толщины диэлектрических и полупроводниковых пленок / *А. Б. Федорцов* // *Опубл.* 20.01.98. Бюл. № 2.
9. *Иванов А. С., Манухов В. В., Федорцов А. Б., Чуркин Ю. В.* Быстродействующий прибор для контроля угловой зависимости коэффициента отображения лазерного луча // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2011. Т. 54, № 3. С. 61—64.
10. *Федорцов А. Б., Прокофьева К. Е.* Применение гелий-неонового лазера в интерференционном методе измерения толщины пленок // *Электронная техника. Материалы*. 1974. № 4. С. 117—122.
11. *Трэвис Дж., Кринг Дж.* LabView для всех. М.: ДМК Пресс, 2008.

Сведения об авторах

- Игорь Валерьевич Гончар** — аспирант; Северо-Западный заочный технический университет, кафедра физики, Санкт-Петербург; E-mail: ivgonet@rambler.ru
- Алексей Сергеевич Иванов** — канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный заочный технический университет, кафедра физики, Санкт-Петербург; E-mail: physics@nwpi.ru
- Василий Владимирович Манухов** — аспирант; Северо-Западный заочный технический университет, кафедра физики, Санкт-Петербург; E-mail: karven@list.ru
- Александр Борисович Федорцов** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Северо-Западный заочный технический университет, кафедра физики, Санкт-Петербург; E-mail: physics@nwpi.ru

Рекомендована кафедрой физики

Поступила в редакцию 21.12.11 г.

М. В. ИНОЧКИН, В. В. НАЗАРОВ, Д. Ю. САЧКОВ, О. П. СИДОРОВА,
Л. В. ХЛОПОНИН, В. Ю. ХРАМОВ

ОСОБЕННОСТИ МНОГОЧАСТОТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭРБИЕВЫХ ЛАЗЕРОВ

Теоретически и экспериментально исследована динамика многочастотной генерации излучения Er:YLF-лазера с диодной накачкой при наличии неоднородностей распределения накачки и потерь излучения в резонаторе. Получена генерация на четырех длинах волн: 2,66, 2,71, 2,81 и 2,84 мкм.

Ключевые слова: эрбиевый лазер, диодная накачка, многочастотная генерация.

Введение. Одно из актуальных направлений в современной лазерной технике — разработка малогабаритных лазеров для медицинских применений. Среди лазеров подобного типа большими перспективами обладают лазеры на эрбиевых кристаллах, излучающие в области 3 мкм. Особенность эрбиевых лазеров заключается в возможности генерации ряда импульсов на разных длинах волн (в пределах трехмикронного перехода ${}^4I_{11/2}—{}^4I_{13/2}$) в течение одного импульса накачки [1]. В настоящей статье теоретически и экспериментально исследуется динамика процесса многочастотной генерации излучения Er:YLF-лазера с диодной накачкой в условиях малого числа поперечных мод и наличия неоднородностей поперечного распределения излучения накачки и потерь излучения в резонаторе.

Пространственная модель маломодового лазера. Для построения численной модели использовался экспериментальный Er:YLF-лазер, имеющий резонатор, образованный плоским и сферическим зеркалами. Апертурной диафрагмой, определяющей максимальный порядок поперечных мод, служила апертура активного элемента ($\varnothing 2,1$ мм без учета фасок). Согласно выражениям для диаметров мод высших порядков, приведенным в работе [2], в данном резонаторе способны возбуждаться лаггерр-гауссовы моды с радиальным индексом не выше 2. При этом учитывалось, что генерация одной поперечной моды в какой-либо области сечения активного элемента подавляет генерацию остальных мод в этой области [3]. Как показал расчет возможных наборов поперечных мод генерации, в большинстве случаев размер пространственных областей перекрытия возбуждающихся мод не превышает 15 % от их площади.

Данный факт позволяет пренебречь взаимным влиянием поперечных мод, присутствующих в сгенерированном излучении. В этом случае поперечное сечение активного элемента можно разбить на ряд условно неперекрывающихся зон, в каждой из которых генерация считается независимой. В разработанной модели Er:YLF-лазера принималось, что зоны генерации имеют форму коаксиальных колец (кроме первой зоны, имеющей форму круга с центром на оси активного элемента), в пределах которых интенсивность излучения распределена равномерно.

При расчетах площадь поперечного сечения активного элемента разбивалась на 3 зоны. Диаметр центральной зоны задан равным диаметру основной гауссовой моды TEM₀₀. Внешний диаметр второй зоны равен диаметру лаггерр-гауссовой моды с радиальным индексом 0 и азимутальным индексом 1. Внешний диаметр третьей зоны выбирался с учетом размера фасок по краям активного элемента (по 0,2 мм) и соответствовал моде с радиальным индексом 1.

Предложенный метод позволяет учесть неравномерность поперечного распределения излучения накачки в активном элементе, а также разные величины потерь излучения на

разных модах. Путем отдельного численного расчета были определены характеристики распределения поглощенной мощности накачки и потерь излучения в пределах выбранных зон генерации (см. таблицу; здесь D — диаметр зоны генерации).

| Номер зоны | Поглощенная мощность излучения накачки, % | D , % от диаметра активного элемента | Неактивные потери, %, за полный обход резонатора при λ , равном | | | |
|------------|---|--|---|----------|----------|----------|
| | | | 2,66 мкм | 2,71 мкм | 2,81 мкм | 2,84 мкм |
| 1 | 14 | 28 | 1,4 | 1,6 | 2 | 2,1 |
| 2 | 16 | 45 | 1,5 | 1,7 | 2,1 | 2,2 |
| 3 | 70 | 80 | 4 | 4,5 | 4,7 | 4,8 |

Для расчета динамики процесса генерации излучения в каждой зоне предлагается использовать следующую систему балансных уравнений для населенностей (n_j) шести нижних уровней иона эрбия и плотности потока фотонов излучения генерации (s_i) на четырех длинах волн:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dn^k_1}{dt} &= -n^k_1 A_{10} + n^k_2 A_{21} + n^k_3 A_{31} + n^k_4 A_{41} + n^k_5 A_{51} + W_{21} n^k_2 + 2\alpha_1 n^k_0 n^k_3 + \alpha_2 n^k_0 n^k_4 + \\
 &\quad + \alpha_3 n^k_0 n^k_5 - 2\gamma^k_1 (n^k_1)^2 - \gamma_3 n^k_1 n^k_2 - \gamma_4 n^k_1 n^k_3 + \sum_{i=1}^4 s^k_i (\sigma_e(\lambda_i) n^k_2 - \sigma_a(\lambda_i) n^k_1); \\
 \frac{dn^k_2}{dt} &= -n^k_2 (A_{20} + A_{21}) + n^k_3 A_{32} + n^k_4 A_{42} + n^k_5 A_{52} + W_{32} n^k_3 - W_{21} n^k_2 + \alpha_2 n^k_0 n^k_4 + \\
 &\quad + 2\alpha_4 n^k_0 n^k_5 - 2\gamma^k_2 (n^k_2)^2 - \gamma_3 n^k_1 n^k_2 + R^k - \sum_{i=1}^4 s^k_i (\sigma_e(\lambda_i) n^k_2 - \sigma_a(\lambda_i) n^k_1); \\
 \frac{dn^k_3}{dt} &= -n^k_3 \left(\sum_{i=0}^2 A_{3i} + W_{32} \right) + n^k_4 A_{43} + n^k_5 A_{53} + W_{43} n^k_4 - \alpha_1 n^k_0 n^k_3 + \alpha_3 n^k_0 n^k_5 + \\
 &\quad + \gamma_1 (n^k_2)^2 - \gamma_4 n^k_1 n^k_3; \\
 \frac{dn^k_4}{dt} &= -n^k_4 \left(\sum_{i=0}^3 A_{4i} + W_{43} \right) + n^k_5 (A_{53} + W_{54}) - \alpha_2 n^k_0 n^k_4 - \gamma_3 n^k_1 n^k_2; \\
 \frac{dn^k_5}{dt} &= -n^k_5 \left(\sum_{i=0}^4 A_{5i} + W_{54} \right) - (\alpha_3 + \alpha_4) n^k_0 n^k_5 + \gamma_3 (n^k_2)^2 + \gamma_4 n^k_1 n^k_3; \\
 \frac{ds^k_1}{dt} &= \nu \mu s^k_1 \left((\sigma_e(\lambda_1) n^k_2 - \sigma_a(\lambda_1) n^k_1) - \delta^k(\lambda_1) \right) + n^k_2 q; \\
 &\dots\dots\dots \\
 \frac{ds^k_4}{dt} &= \nu \mu s^k_4 \left((\sigma_e(\lambda_4) n^k_2 - \sigma_a(\lambda_4) n^k_1) - \delta^k(\lambda_4) \right) + n^k_2 q,
 \end{aligned} \right\} (1)$$

где $n^k_0 = n_{\text{tot}} - \sum_{j=1}^5 n^k_j$ — населенность основного состояния ($^4I_{15/2}$) в k -й зоне, n_{tot} — общая

концентрация частиц активатора; A_{xy} — вероятность спонтанного излучательного перехода между уровнями x и y ; W_{xy} — вероятность спонтанного безызлучательного перехода между уровнями x и y ; γ_z , α_z — коэффициенты, характеризующие скорости процессов апконверсии (γ_z) и самотушения (α_z); q — коэффициент, учитывающий „вклад“ спонтанного излучения в

плотность потока фотонов в резонаторе; $v=c/n_{\text{ар}}$ — скорость света в активном элементе, здесь $n_{\text{ар}}$ — показатель преломления материала активного элемента (active rod); $\sigma_e(\lambda_i)$ — сечение вынужденного излучения на i -й длине волны; $\sigma_a(\lambda_i)$ — сечение поглощения на i -й длине волны; s_i^k — плотность потока фотонов в резонаторе на i -й длине волны в k -й зоне; μ — коэффициент заполнения резонатора активной средой и излучением основной моды; λ_i — длина волны, на которой осуществляется генерация ($\lambda_1=2,66$ мкм, $\lambda_2=2,71$ мкм, $\lambda_3=2,81$ мкм, $\lambda_4=2,84$ мкм); R^k — скорость накачки на верхний лазерный уровень в k -й зоне; $\delta^k(\lambda_i)$ — показатель полных потерь излучения в активном элементе на i -й длине волны в k -й зоне.

При расчете коэффициента заполнения резонатора учитывается, что активный элемент заполняет не весь его объем, и тогда значение μ рассчитывается по формуле $\mu = n_{\text{ар}}l_{\text{ар}} / (L + (n_{\text{ар}} - 1)l_{\text{ар}})$, где $l_{\text{ар}}$ — длина активного элемента, L — длина резонатора.

Неоднородность поперечного распределения излучения накачки определяется с учетом параметра скорости накачки R^k , рассчитываемого для каждой зоны по формуле

$$R^k = \frac{\xi P_p}{h\nu_p V^k}, \quad (2)$$

где ξ — доля мощности излучения накачки, поглощенной в пределах k -й зоны; P_p — общая мощность излучения накачки, $h\nu_p$ — энергия кванта накачки, V^k — объем k -й зоны.

Неоднородность поперечного распределения потерь излучения в резонаторе учитывается через параметр общих неселективных потерь $\delta^k(\lambda_i)$. При этом логично предположить, что потери излучения в первой (центральной) зоне минимальны и возрастают с увеличением внешнего диаметра зоны. Потери излучения в первой зоне могут быть определены в ходе серии экспериментов по значениям пороговой энергии накачки с помощью методики, описанной в работе [4]. Значения потерь в остальных зонах определяются на основе известных показателей $\delta^1(\lambda_i)$ и, по сути, являются свободными параметрами.

Для расчетов были использованы численные значения вероятностей излучательных и безызлучательных переходов (см. работу [5]) и сечений вынужденного излучения на рассматриваемых длинах волн (см. работу [6]). Коэффициенты скоростей апконверсии (γ_z) и самогашения (α_z), рассчитаны по формулам, приведенным в работе [5].

Результаты расчетов. Расчеты, проведенные в рамках описанной модели, показывают, что длина волны генерируемого излучения должна последовательно меняться от наиболее короткой к наиболее длинной (рис. 1). При этом наблюдается перекрытие по времени генерации на „соседних“ по спектру длинах волн, что связано с различной величиной задержки начала генерации на разных длинах волн в каждой зоне. Отметим, что в пределах одной зоны генерация на разных длинах волн осуществляется строго последовательно, без перекрытий по времени.

Последовательность переключения длин волн связана с заселением нижнего лазерного уровня в течение генерируемого импульса, а также с разными отношениями сечений вынужденного излучения $\sigma_e(\lambda_i)$ и поглощения $\sigma_a(\lambda_i)$ на разных длинах волн.

Вариации времени задержки начала генерации в разных зонах являются прямым следствием неоднородностей накачки и потерь. В данном случае в центральной зоне (№ 1) скорость накачки выше, чем в среднем по активному элементу. При этом потери излучения в этой зоне минимальны. По этой причине время задержки начала генерации на каждой длине волны в зоне № 1 меньше соответствующего времени для зон № 2 и 3. Таким образом, в то время как в зоне № 1 значение длины волны изменилось (например, с 2,66 на 2,71 мкм), в зонах № 2 и 3 генерация продолжается на длине волны 2,66 мкм.

Отметим, что наибольшая доля энергии излучается в зоне № 3, имеющей самую большую площадь. Соответственно и дифференциальный КПД генерации в основном определяется параметрами этой зоны.

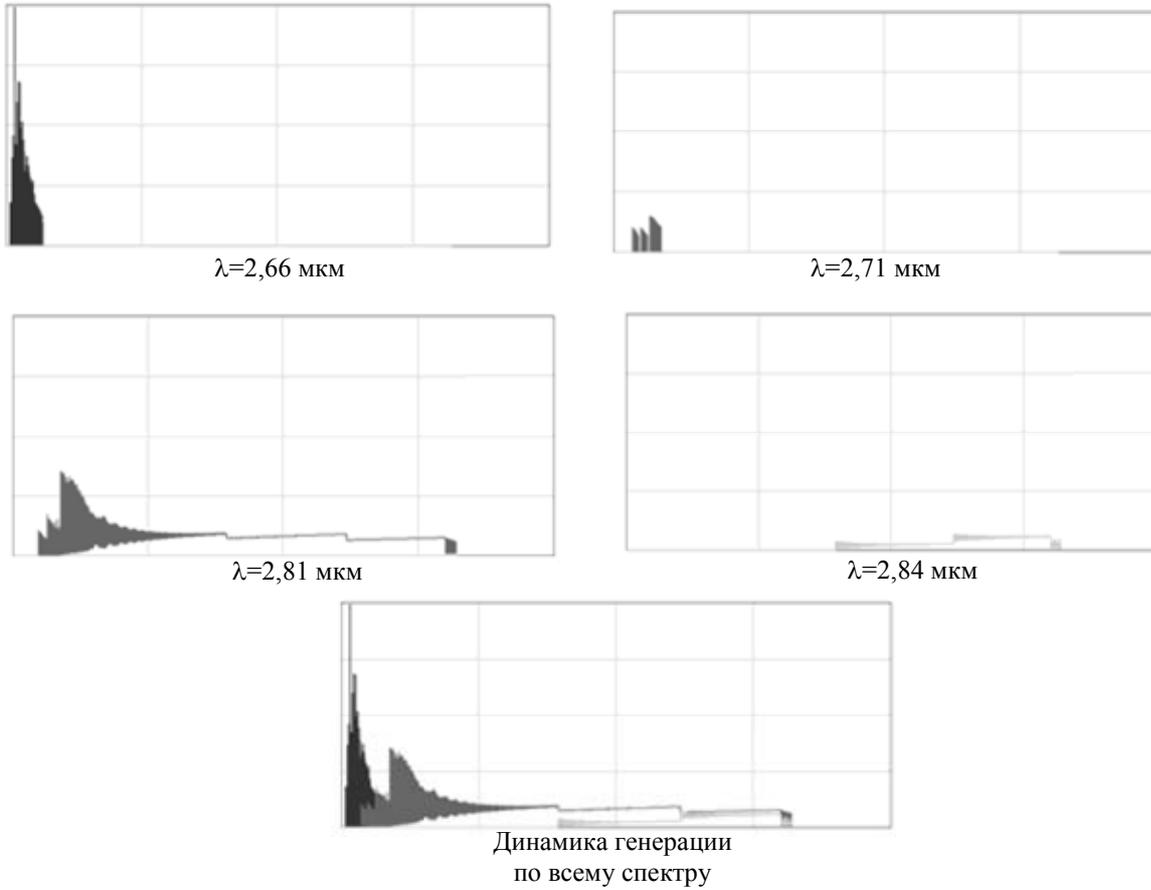


Рис. 1

Результаты экспериментов. На рис. 2 представлена схема экспериментального стенда. Активным элементом 2 исследуемого лазера служит кристалл Er:YLF с концентрацией эрбия 15 %, накачиваемый по продольно-поперечной схеме излучением матрицы лазерных диодов 1.

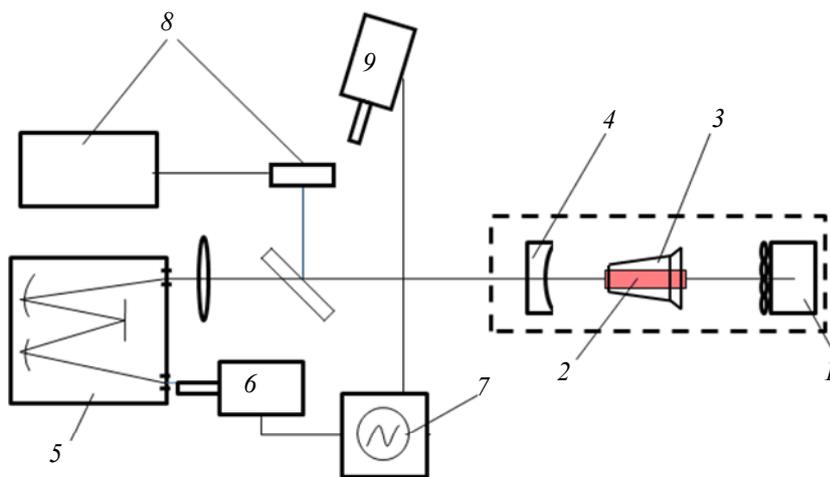


Рис. 2

Продольно-поперечная схема накачки, реализованная посредством призмы полного внутреннего отражения 3 и приклеенных к матрице диодов микролинз, призвана обеспечить прокачку всего объема активного элемента. Резонатор лазера образован плоским диэлектрическим

зеркалом, напыленным на торце активного элемента ($R_{3 \text{ мкм}} > 99 \%$, $T_{0,97 \text{ мкм}} > 99 \%$), и внешним сферическим зеркалом 4.

Динамика генерации излучения лазера по всему спектру наблюдалась с помощью фотодиода 9, а по отдельным спектральным компонентам — с помощью монохроматора 5 и фотодиода 6. Сигналы фотодиодов принимались осциллографом 7. Энергия импульса генерируемого излучения определялась измерителем 8 энергии и мощности.

Основные параметры элементов лазера приведены ниже.

| | |
|---|-----------------------------|
| Коэффициент отражения выходного зеркала, % | |
| при длине волны 2,66 мкм | 95 |
| 2,71 мкм | 95 |
| 2,81 мкм | 95,5 |
| 2,84 мкм | 96 |
| Длина резонатора, мм | 100 |
| Размеры активного элемента, мм | $\varnothing 2,1 \times 35$ |
| Мощность накачки, Вт | 340 |
| Показатель преломления материала активного элемента | 1,45 |
| Средняя длина волны излучения накачки, нм | 976 |
| Радиус кривизны выходного зеркала, м | 0,5 |
| Концентрация ионов эрбия в активном элементе, ат. % | 15 |

Как и ожидалось согласно расчетам, в экспериментах наблюдалась генерация излучения на четырех длинах волн трехмикронного диапазона: 2,66, 2,71, 2,81 и 2,84 мкм: см. рис. 3 (длительность импульса накачки 2 мс, мощность накачки 340 Вт). При этом существовало перекрытие по времени генерации на „соседних“ длинах волн, что наиболее отчетливо видно в области $\lambda=2,81$ мкм и $\lambda=2,84$ мкм.

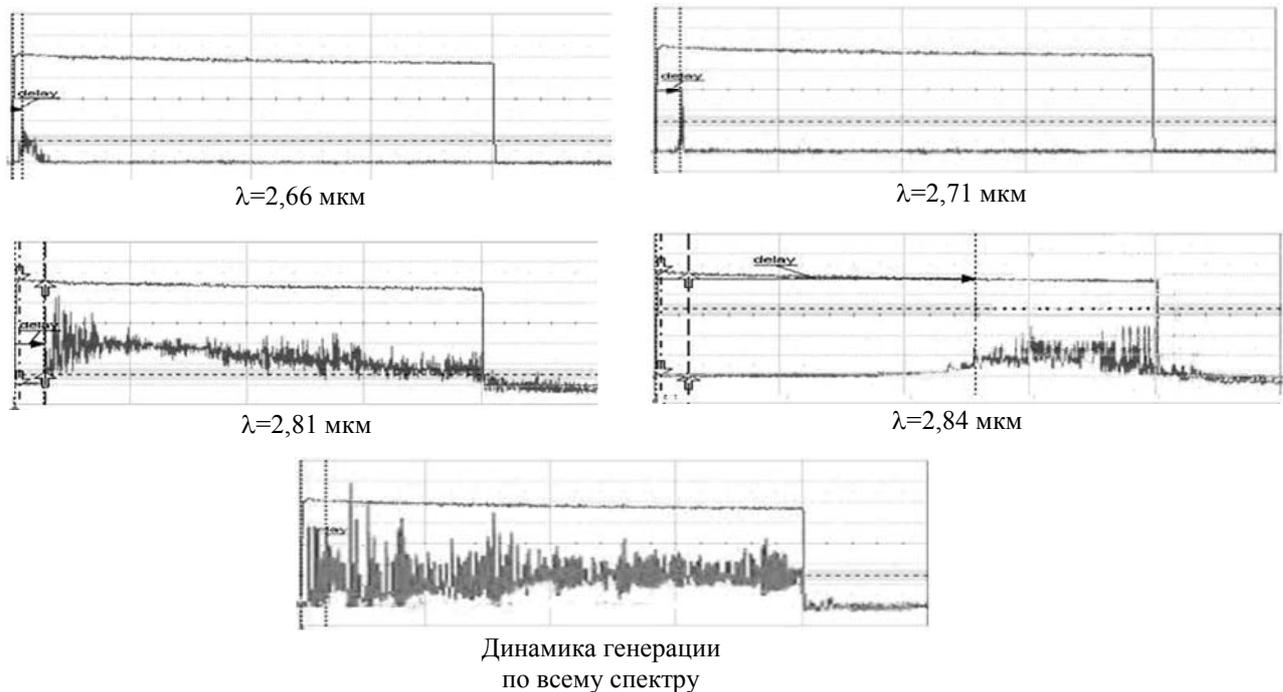


Рис. 3

Предложенная модель Er:YLF-лазера может быть использована для оптимизации спектрально-энергетических параметров генерации излучения эрбиевых лазеров.

Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы“, грант № РНП. 2.1.2/4867.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каминский А. А. Лазерные кристаллы. М.: Наука, 1975. 256 с.
2. Быков В. П., Силичев О. О. Лазерные резонаторы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 320 с.
3. Ханин Я. И. Основы динамики лазеров. М.: Наука, Физматлит, 1999. 368 с.
4. Koechner W., Bass M. Solid State Lasers: A Graduate Text. N. Y.: Springer, 2003. P. 409.
5. Ткачук А. М., Разумова И. К., Мирзаева А. А. и др. Ур-конверсия и заселение возбужденных уровней иона эрбия в кристаллах $\text{LiY}_{1-x}\text{Er}_x\text{F}_4$ ($x=0.003-1$) при непрерывной накачке излучением InGaAs-лазерных диодов // Оптика и спектроскопия. 2002. Т. 92, № 1. С. 73—88.
6. Absolute excited state absorption cross section measurements in $\text{Er}^{3+}:\text{LiYF}_4$ for laser applications around $2.8 \mu\text{m}$ and 551 nm / C. Labb'e, J.-L. Doualan, S. Girard, R. Moncorg'e, M. Thuau // J. Phys.: Condens. Matter. 2000. Vol. 12. P. 6943—6957.

Сведения об авторах

- Михаил Владимирович Иночкин** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: m_inochkin@mail.ru
- Вячеслав Валериевич Назаров** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: v_v_nazarov@mail.ru
- Дмитрий Юрьевич Сачков** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: dsachkov@gmail.com
- Ольга Петровна Сидорова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: sidorova_olga86@rambler.ru
- Леонид Викторович Хлопонин** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: l_khloponin@yahoo.com
- Валерий Юрьевич Храмов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: khramov@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
лазерной техники и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию
07.05.10 г.

А. В. ДЕМИН, М. И. МОИСЕЕВА

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На основе экспериментальных данных получены расчетные формулы для вычисления приближенного, инвариантного относительно дальности видимости, значения коэффициента пропускания атмосферы для двух рабочих спектральных диапазонов в инфракрасной области.

Ключевые слова: коэффициент пропускания атмосферы, дистанционное зондирование Земли, алгоритм, инфракрасный диапазон.

Введение. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса в оптическом диапазоне длин волн позволяет получить информацию как о географических и геофизических параметрах Земли, так и о техногенных процессах, происходящих на ее поверхности. В зависимости от решаемых задач ДЗЗ осуществляется методами маршрутной, объектовой, стереоскопической, статической, динамической, топографической и спектрометрической съемки. В оптическом диапазоне ДЗЗ выполняется с помощью оптико-цифровых систем и комплексов, устанавливаемых на борту космических аппаратов (КА).

Для повышения достоверности данных, получаемых при дистанционном зондировании Земли, необходимо в процессе съемки учитывать состояние атмосферы, что требует введения специальных датчиков и обуславливает дополнительную нагрузку на служебные системы. Одним из параметров атмосферы является коэффициент пропускания.

Из экспериментов известны результаты измерений коэффициента пропускания атмосферы τ_a в некоторых дискретных точках рабочих спектральных диапазонов. Однако условия получения экспериментальных данных могут не соответствовать условиям текущей съемки. В связи с этим актуальной является задача аналитического представления состояния атмосферы в реальном масштабе времени. При этом следует отметить, что параметрическое состояние атмосферы в части ее пропускания определяется помимо химического состава и геофизическими параметрами.

Постановка задачи. Цель настоящей статьи — построение расчетной формулы для определения коэффициента пропускания атмосферы в любой произвольной точке спектрального диапазона наблюдения в процессе съемки с космического аппарата при дистанционном зондировании Земли.

Искомая аналитическая зависимость $F(\tau_a)$, помимо основного компонента $\{F(\lambda)\}$, учитывающего спектральное пропускание атмосферы, содержит географический $\{F(\varphi, \xi)\}$ и климатический $\{F(T)\}$ компоненты, уточняющие параметрическое состояние атмосферы при конкретных условиях съемки, а именно: $F(\tau_a) = \{F(\lambda) \oplus F(\varphi, \xi) \oplus F(T)\}$.

Для построения расчетной формулы воспользуемся экспериментально полученными данными о значениях коэффициента пропускания атмосферы для двух спектральных диапазонов длин волн — [3; 5,2] и [8; 14] мкм — с шагом 0,02 мкм. Эти данные представлены в виде таблиц для трех значений дальности видимости (5, 23, 50) км и пяти климатических зон: тропики, Арктика (лето), Арктика (зима), средние широты (лето), средние широты (зима) [1, 2].

Табличные данные необходимо описать аналитическими зависимостями, что позволяет вычислять коэффициент пропускания атмосферы для произвольного значения длины волны

из рабочего спектрального диапазона в заданной климатической зоне без хранения больших массивов экспериментальных данных и без проведения дополнительных измерений.

Точечные графики исходных экспериментальных данных, полученных в зоне тропиков при дальности видимости 5 км, приведены на рис. 1. Для других значений дальности видимости и климатических зон общий вид зависимостей сохраняется.

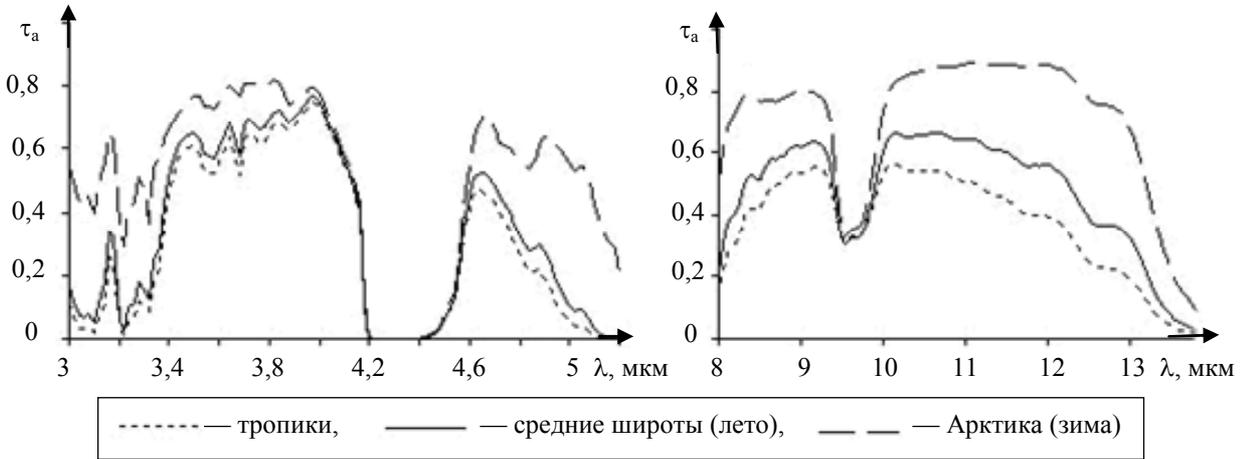


Рис. 1

Решение задачи. Для вычисления значения τ_a в любой произвольной точке диапазона необходимо получить эмпирическую формулу $\tau_a = f(\lambda)$. В целях обеспечения инвариантности искомой формулы относительно значения дальности видимости построим аналитическую зависимость $\tau_a = f(\lambda)$ на основе усредненных данных. Усреднение данных производится в обоих спектральных диапазонах для каждой климатической зоны по формуле

$$(\tau_a)_{\text{avg}} = [(\tau_a)_5 + (\tau_a)_{23} + (\tau_a)_{50}] / 3,$$

где $(\tau_a)_5$, $(\tau_a)_{23}$ и $(\tau_a)_{50}$ — данные, полученные при дальности видимости, равной 5, 23 и 50 км соответственно.

Для построения эмпирической формулы необходимо решить две задачи [3]: 1) определить общий вид формулы, 2) подобрать значения ее параметров.

Примем, что искомая зависимость $\tau_a(\lambda)$ определена в каждой точке спектрального диапазона и представлена аналитической всюду дифференцируемой функцией. Тогда эта зависимость может быть описана функцией вида $f(\lambda) = c_0 + c_1\lambda + \dots + c_n\lambda^n + \dots$, где c_i — константы, $i = 0, 1, 2, \dots$ [4].

Поскольку искомая формула должна быть применима для проведения расчетов на борту КА в реальном масштабе времени, необходимо обеспечить достаточную ее простоту. Как видно из графиков исходных данных (см. рис. 1), зависимость $\tau_a(\lambda)$ является немонотонной функцией, имеющей более двух локальных максимумов и минимумов, что затрудняет подбор достаточно простой зависимости. Поэтому представим искомую формулу совокупностью элементарных функций. К классу элементарных функций относятся полиномы, показательные функции, логарифмические, тригонометрические и обратные тригонометрические функции, а также функции, получаемые из перечисленных выше с помощью четырех арифметических действий и их суперпозиции, применяемых конечное число раз [4].

Для поиска аналитической зависимости $\tau_a(\lambda)$ разобьем диапазон [8; 14] мкм на два поддиапазона, а диапазон [3; 5,2] мкм — на три. Для каждого поддиапазона будем искать свою формулу. При этом общий вид формулы для разных климатических зон и одного поддиапазона длин волн одинаков — различаются лишь значения некоторых параметров

формулы. В этом случае путем перебора различных известных функций (полиномиальной, степенной, экспоненциальной, логарифмической, гауссоиды, функции Лоренца и др.) установлено, что наиболее общими для них являются полином пятой степени

$$f(\lambda) = A_0 + A_1\lambda + A_2\lambda^2 + A_3\lambda^3 + A_4\lambda^4 + A_5\lambda^5, \quad (1)$$

где $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ — константы, и функция вида

$$f(\lambda) = \tau_0 + A \left[1 + \exp\left(-\frac{\lambda - \lambda_c + w_1/2}{w_2}\right) \right]^{-1} \left\{ 1 - \left[1 + \exp\left(-\frac{\lambda - \lambda_c - w_1/2}{w_3}\right) \right]^{-1} \right\}, \quad (2)$$

где τ_0 — горизонтальная асимптота, A — амплитуда, λ_c — абсцисса центра „пика“ функции, а значения параметров w_1, w_2 и w_3 определяют ширину и „форму“ пика кривой; при этом для каждого поддиапазона и всех климатических зон применяется только одна из этих функций.

Выбранные функции (1), (2) содержат по шесть параметров. Определить наилучшие значения этих параметров для каждого ряда данных можно путем нелинейного регрессионного анализа по методу наименьших квадратов с использованием итеративного алгоритма Левенберга — Маркуардта (Levenberg — Marquardt) [5]. Критерием точности полученной формулы будем считать коэффициент детерминации R^2 , принимающий значения от 0 до 1. Причем значение „1“ соответствует случаю идеальной модели, когда все точки экспериментальных данных лежат на полученной в ходе регрессии кривой.

Рассмотрим, далее, особенности нахождения аналитической зависимости для каждого спектрального диапазона отдельно.

Поиск зависимости для диапазона [8; 14] мкм. Для поиска аналитической зависимости разобьем диапазон [8; 14] мкм на два поддиапазона — участок I: [8; 9,15] ∪ [10,15; 14] и участок II: [9,2; 10,1] (рис. 2).

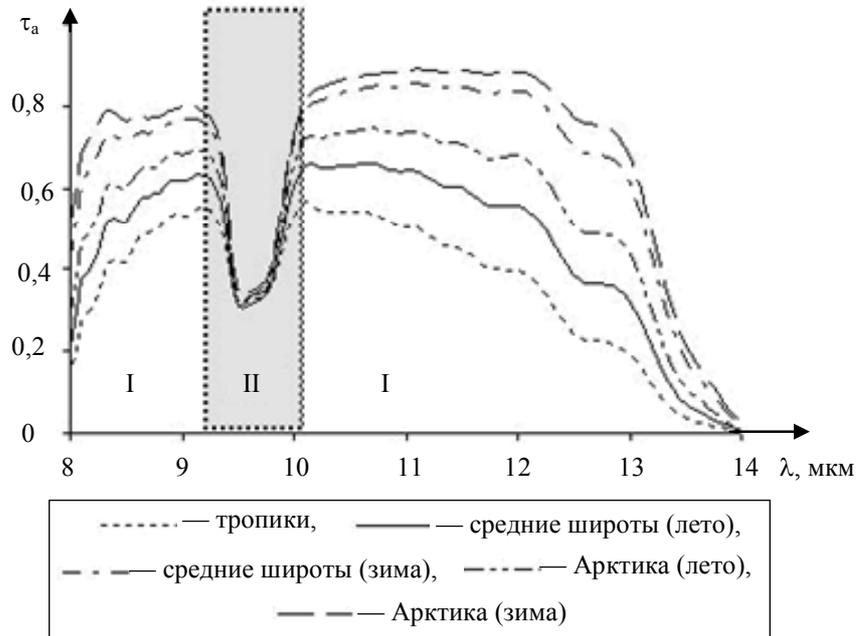


Рис. 2

Участок II визуально представляет собой наибольшую „впадину“ на графике кривой исходных данных. За его границы были приняты значения $\lambda = 9,15$ мкм и $\lambda = 10,15$ мкм — абсциссы двух локальных максимумов усредненной кривой, поскольку для разных климатических зон кривые имеют максимумы в разных точках. При этом значение усредненной кривой в каждой точке было вычислено как среднее арифметическое значений кривой для каждой климатической зоны.

В качестве формулы для обоих поддиапазонов была выбрана функция (2). Для участка I ($[8; 9,15] \cup [10,15; 14]$ мкм) полученная формула содержит два одинаковых для всех климатических зон параметра — τ_0 и λ_c , коэффициент $R^2 > 0,97$. Для участка II ($[9,2; 10,1]$ мкм) полученная формула содержит четыре одинаковых для всех климатических зон параметра — λ_c , w_1 , w_2 и w_3 , коэффициент $R^2 > 0,99$.

Поиск зависимости для диапазона $[3; 5,2]$ мкм. Диапазон $[3; 5,2]$ мкм для поиска аналитической зависимости разобьем на три поддиапазона (рис. 3) путем выделения наиболее выдающихся пиков усредненной функции — участок I: $[3; 3,2]$; участок II: $[3,22; 4,22]$; участок III: $[4,24; 5,2]$. Значение $\lambda = 4,22$ мкм — правая граница участка II — определяется как абсцисса левой точки „нулевой области“. Под „нулевой областью“ понимается наибольшая совокупность соседних абсцисс, в которых функция принимает нулевое значение. Значение $\lambda = 3,22$ мкм — абсцисса наименьшего минимума на интервале $[3; 4,22]$.

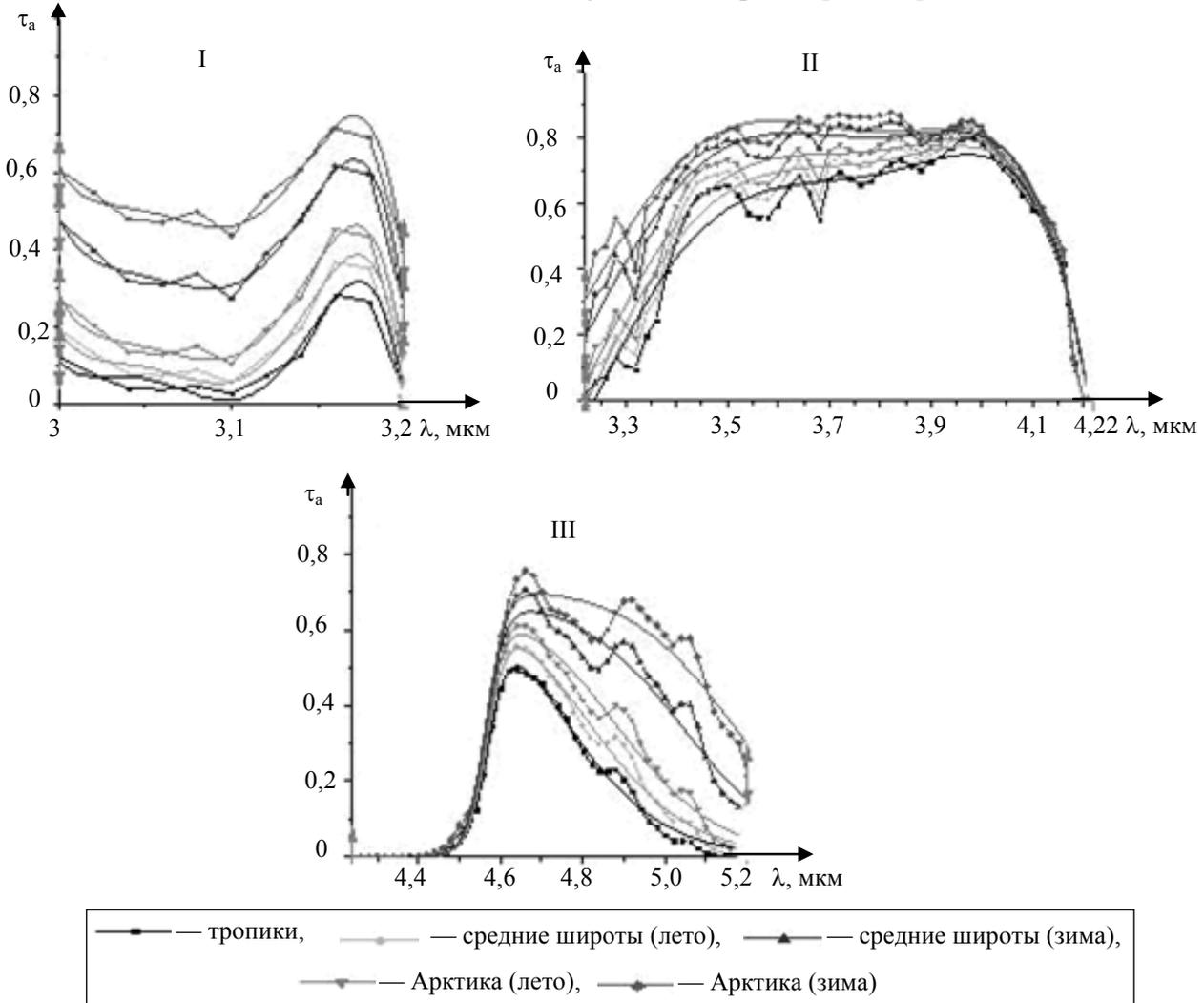


Рис. 3

В качестве формулы для участков I и II был выбран полином (1), а для участка III — функция (2). Для участка I ($[3; 3,2]$ мкм) полученная формула содержит три одинаковых для всех климатических зон параметра — A_3 , A_4 и A_5 , коэффициент $R^2 > 0,93$. Для участка II ($[3,22; 4,22]$ мкм) найденная формула включает два одинаковых для всех климатических зон параметра — A_4 и A_5 , коэффициент $R^2 > 0,93$. Для участка III ($[4,24; 5,2]$ мкм) полученная

формула содержит три одинаковых для всех климатических зон параметра — τ_0 , w_2 и w_3 , коэффициент $R^2 > 0,97$.

Заключение. Построены расчетные формулы для вычисления коэффициента пропускания атмосферы $\tau_a = f(\lambda)$ на основе известных экспериментальных данных для спектральных диапазонов [3; 5,2] и [8; 14] мкм. Для этого был предложен алгоритм разбиения диапазонов на поддиапазоны с нахождением формул для каждого из участков. Построенные формулы позволяют получить приближенное значение коэффициента пропускания атмосферы для пяти климатических зон без измерений дальности видимости.

В дальнейших исследованиях планируется оценить точность полученных расчетных формул для различных значений дальности видимости, а также выделить географическую и климатическую составляющие аналитической зависимости, описывающей пропускание атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по инфракрасной технике. Т.1. Физика инфракрасного излучения / Пер. с англ.; Под ред. У. Волфа, Г. Цисуса. М.: Мир, 1995. 606 с.
2. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 417с.
3. Демидович Б. П., Шувалова Э. З., Марон И. А. Численные методы анализа: Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения / Под ред. Б. П. Демидовича. М.: Наука, 1967. 368 с.
4. Математическая энциклопедия / Под ред. И. М. Виноградова. М.: Сов. энциклопедия, 1985. Т. 5. С. 797—799, 977.
5. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

Сведения об авторах

- Анатолий Владимирович Демин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики;
E-mail: dav_60@mail.ru
- Мария Игоревна Моисеева** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики;
E-mail: mim14@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-цифровых систем и комплексов

Поступила в редакцию
12.04.10 г.

ИНФОРМАЦИЯ

ГЕННАДИЙ НИКОЛАЕВИЧ ДУЛЬНЕВ

К 85-летию со дня рождения



3 мая 2012 г. исполнилось 85 лет со дня рождения Геннадия Николаевича Дульнева — Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, академика Российской академии естественных наук, Петровской академии, Академии холода, доктора технических наук, профессора кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (СПбНИУ ИТМО, ранее — ЛИТМО).

Окончив в 1950 г. инженерно-физический факультет ЛИТМО, Г. Н. Дульнев прошел путь от аспиранта до ученого мирового уровня, основателя и руководителя научной школы „Теплофизика в приборостроении“. В течение 40 лет Геннадий Николаевич возглавлял кафедру теплофизики, 30 лет руководил секцией Научного совета по тепломассобмену при Совете Министров СССР, 12 лет (1974—1986 гг.) был ректором ЛИТМО.

В это время были сделаны существенные шаги к университетскому образованию в ЛИТМО, качественно изменены учебные планы, повышен уровень научной работы, что позволило институту участвовать в крупных всесоюзных и международных программах.

Особое место занимают космические проекты по исследованию комет солнечной системы и околоземного пространства. Еще в 1960-е гг. в рамках возглавляемого проф. Г. Н. Дульневым направления — аналитическое определение физических свойств композиционных материалов — была предсказана структура поверхностного покрова Луны и крупных комет, что было использовано при проектировании лунохода. Благодаря системному подходу к решению задач, ясному пониманию цели и высокой требовательности под руководством Геннадия Николаевича в ЛИТМО были созданы уникальные приборы, установленные на космических объектах, что позволило получить важные научные результаты и, в частности, лучшие фотографии комет.

Геннадия Николаевича всегда отличало стремление к исследованиям новых непознанных процессов, в том числе явлений, которые объяснить с позиции современной научной парадигмы не представляется возможным. С конца 1970-х гг. на кафедре теплофизики велись работы по изучению аномальных явлений, для исследования которых в 1995 г. в ЛИТМО был организован Научный центр энергоинформационных технологий. Эти исследования ведутся и в Институте биосенсорной психологии, в котором проф. Г. Н. Дульнев является проректором по научной работе.

Геннадий Николаевич воспитал ряд крупных ученых, многие из которых стали академиками, руководителями институтов, кафедр, лабораторий, под его руководством подготовлены кандидаты и доктора наук.

Профессор Г. Н. Дульнев автор более 300 научных работ, четырех учебников и восьми монографий, награжден орденом Трудового Красного Знамени за работы в международных

проектах „Миссия Вега“ и „Миссия Марс—Фобос“, орденом Почета и медалью „300 лет Российскому флоту“, медалью С. П. Королева, почетными грамотами и дипломами ряда министерств.

Свыше сорока лет Геннадий Николаевич занимался альпинизмом. Этот „щедрый подарок судьбы“, как говорит он сам, позволил ему прожить две жизни — жизнь профессора-ученого и жизнь спортсмена, в которой он в полной мере смог ощутить роскошь человеческих отношений.

Благодаря активной жизненной позиции Геннадий Николаевич продолжает плодотворно работать в науке и щедро делится своими знаниями с молодым поколением.

*Коллектив кафедры компьютерной теплофизики
и энергофизического мониторинга СПбНИУ ИТМО*

Редакционная коллегия журнала

SUMMARY

P. 3—9.

RECOGNITION OF CONTINUOUS COMPLEX-VALUED CONTOURS OF IMAGES

A mathematical model of continuous contour is developed. Problems of quantization of continuous contours of images are studied. Comparative characteristics of probability of true recognition for continuous and quantified elementary contours are derived.

Keywords: continuous contour, elementary contour, quantization of contour, true recognition rate.

Data on authors

- Rinat G. Khafizov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Mari State Technical University, Department of Radio Engineering and Biomedical Systems, Yoshkar-Ola; E-mail: krtmbs@marstu.net
- Sergey A. Okhotnikov* — Post-Graduate Student; Mari State Technical University, Department of Radio Engineering and Biomedical Systems, Yoshkar-Ola; E-mail: krtmbs@marstu.net

P. 9—17.

STRUCTURE SWITCHING OF THE SPACE OF LINEAR DEVICES FOR RECURRENT TRANSFORMATION OF BINARY CODES

For the space of linear devices for recurrent transformation of binary codes, the problem of the space structure switching with the use of nonlinearly generated signal is considered. Algorithms of synthesis of the devices under consideration are proposed. An illustrative example is presented.

Keywords: recursive transformation, space structure, switching input matrix, switching signal, basic conjunction of state vector.

Data on authors

- Anatoly V. Ushakov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: ushakov-AVG@yandex.ru
- Elena S. Yaitskaya* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: yaitskayaes@mail.ru

P. 18—23.

TENSOR METHODOLOGY FOR INFORMATIONAL COMMUNICATIONS

A method is proposed for estimation of probability-temporal characteristics of queuing network with the use of mathematical tools of tensor calculus. The method is shown to allow for analysis of high dimensionality networks.

Keywords: IMS-net, quality of service, tensor analysis.

Data on author

- Dmitry Yu. Ponomarev* — Cand. Techn. Sci.; Siberian Federal University, Institute of Engineering Physics and Radio Electronics, Department of Infocommunications, Krasnoyarsk; E-mail: DPonomarev@sfu-kras.ru

P. 24—28.

ROTARY HYDRODYNAMIC TEST BENCH AND TECHNIQUE FOR ESTIMATION OF ITS DIMENSIONAL CHARACTERISTICS

A hydrodynamic test bench is designed for testing of starting devices of uninhabited small-sized submersibles in the industrial premises conditions. The test bench allows imitation of deep-water start of underwater apparatus at an angle to the horizontal. A method for estimation of overall dimensions of a test bench under development is proposed.

Keywords: independent uninhabited submersibles, dynamic start-up, tests, the hydrodynamic stand, dimensional characteristics.

Data on author

Anton V. Krasilnikov — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru

P. 29—33.

ANALYSIS OF DIAGNOSTIC MODEL OF PROPULSION ELECTRICAL INSTALLATION WITH THE USE OF THE METHOD OF TRANSFER FUNCTION SENSITIVITY

The theory of sensitivity transfer function is applied for analysis of diagnostic model of propulsion electrical installation. The approach allows for construction of algorithm for checking the the model efficiency.

Keywords: propulsion electrical installation, diagnostic model, signal transfer diagram, diagnostic support.

Data on authors

Vladimir P. Kalyavin — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Department of Automatic Control Systems

Chien Van Nguyen — Post-Graduate Student; St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Department of Automatic Control Systems; E-mail: qc_etu@yahoo.com

Hai Thanh Ta — Post-Graduate Student; St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Department of Automatic Control Systems; E-mail: thanhhai136@yahoo.com

P. 34—39.

ESTIMATE OF SENSITIVITY OF ALGORITHM OF SECONDARY PROCESSING OF NAVIGATIONAL MEASUREMENTS TO DISTURBANCES OF OBSERVATION MODEL PARAMETERS

An algorithm of secondary processing of radar navigation measurements is considered. A method is proposed for estimation of the algorithm sensitivity to disturbances of observation model and to errors in input data. The method makes it possible to make a conclusion on input data scope and quality required by the secondary processing task.

Keywords: secondary processing, observation model, navigational parameters, observation matrix.

Data on author

Timothy O. Myslivtsev — Cand. Techn. Sci.; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Antenna Feeder and Transmitting Devices, St. Petersburg; E-mail: tim33@list.ru

P. 40—46.**NONLINEAR FACTORS EFFECT ON DYNAMICS OF MICROMECHANICAL GYROSCOPE WITH TWO-MASS SENSITIVE ELEMENT**

Effects of nonlinear factors on dynamics of single-mass and two-mass microelectromechanical (MEMS) gyroscopes are analyzed. Higher consistency of two-mass MEMS gyroscope performance as compared with single-mass one is justified.

Keywords: MEMS gyroscope, nonlinear factors, consistency of performance, frequency response.

Data on authors

- Alexander M. Lestev* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Mechanics; E-mail: list_@inbox.ru
- Alexandra V. Yefimovskaya* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Mechanics; E-mail: lcaleksandra@gmail.com

P. 47—51.**COMPARATIVE ANALYSIS OF FACE-HARDENING METHODS AS APPLIED TO CINEMATOGRAPHIC EQUIPMENT COMPONENTS**

A method combining surface burnishing by indenter of ultrasonic oscillations with subsequent drawing of a regular micro relief (RMR) by vibration rolling is proposed. Results of comparative tests of the method and existing technologies of face hardening with the use of ultrasonic oscillations are presented.

Keywords: regular micro relief, equilibrium roughness, superficial-plastic deformation, burnishing, vibration rolling.

Data on author

- Maksim A. Ryabinin* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Cinema and Television, Department of Precision Technologies and Certification of Cinema and Video Hardware; E-mail: ryabinin_08@mail.ru

P. 52—55.**APPLICATION OF AN IMPROVED NIGHT-VISION DEVICE TO DETECTION OF UNOBSERVED OBJECTS**

Possibility of an improved night-vision device application to diagnostic control of unobserved object under natural and artificial illumination is considered. Several variants of obtained image digitization with the use of MatLab program package are proposed.

Keywords: diagnostics, image, devices.

Data on authors

- Alla A. Vinogradova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Mechatronics; E-mail: vinogradova_a@list.ru
- Altyn Zh. Esbulatova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State Transport University, Department of Theory of Mechanisms and Robotics systems; E-mail: ktmrs@pgups.edu
- Kirill N. Voinov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State Transport University, Department of Theory of Mechanisms and Robotics systems; E-mail: forstar@mail.ru

P. 56—64.

TENDENCIES IN DEVELOPMENT OF COMPONENTS FOR 3rd GENERATION OF INFRARED SYSTEMS

Main tendencies in improvement of basic components of infrared systems of the 3rd generation are described. The components under consideration include photo detectors, cooling systems, and optical systems.

Keywords: infrared system, photo detector, optical system.

Data on authors

- Viktor V. Tarasov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Moscow State University of Geodesy and Cartography, Department of Optical-Electronic Instruments; E-mail: doctortarasov@yandex.ru
Yury G. Yakushenkov — Dr. Techn. Sci., Professor; Moscow State University of Geodesy and Cartography, Department of Optical-Electronic Instruments; E-mail: yakush@miigaik.ru

P. 64—72.

AN ALGORITHM FOR SEIDEL ABERRATIONS CALCULATION IN OPTICAL MEDIUM WITH ARBITRARY REFRACTION INDEX DISTRIBUTION

A method of paraxial ray tracing in nonhomogeneous media with refraction index depending on the three coordinates is considered. The possibility of calculation of paraxial segments and 3rd order aberration coefficients in optical system with inhomogeneous lenses is demonstrated by the example of a lens with sphere-concentric refraction index distribution.

Keywords: refraction index inhomogeneity, aberration coefficient, lens with sphere-concentric gradient of refraction index.

Data on author

- Alexander L. Sushkov* — Cand. Techn. Sci.; N. E. Bauman Moscow State Technical University, Department of Opto-Electronic Devices Research; E-mail: ale-sushkov@yandex.ru

P. 72—78.

COMPUTER-ADDED HIGH-PERFORMANCE LASER INTERFEROMETER FOR TRANSPARENT FILMS THICKNESS MEASUREMENT

Principles of interferometric measurement of transparent layer thickness are formulated. A description of optical-mechanical tract, electronic circuit, and software of a modernized interferometer is given. Mathematical justification of the measurement principles and electronic scheme of the signal registration are presented. A PC program for data processing is described in details.

Keywords: thin film, interferometer, laser, optic schematic, signal processing.

Data on authors

- Igor V. Gonchar* — Post-Graduate Student; North-West State Technical University, Department of Physics, St. Petersburg; E-mail: ivgonet@rambler.ru
Aleksey S. Ivanov — Cand. Techn. Sci.; North-West State Technical University, Department of Physics, St. Petersburg; E-mail: physics@nwpi.ru
Vasilij V. Manukhov — Post-Graduate Student; North-West State Technical University, Department of Physics, St. Petersburg; E-mail: karven@list.ru
Alexander B. Fedortsov — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; North-West State Technical University, Department of Physics, St. Petersburg; E-mail: physics@nwpi.ru

P. 79—84.

PECULIARITIES OF MULTIFREQUENCY GENERATION OF ERBIUM LASER RADIATION

Results of theoretical and experimental investigation of multi-wave generation dynamics of diode-pumped Er:YLF-laser with non-uniform pumping and losses distribution are presented. Generation at the wavelengths of 2.66, 2.71, 2.81, and 2.84 μm is obtained.

Keywords: erbium laser, diode pumping, multi-wave generation.

Data on authors

- Mikhail V. Inochkin** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technologies and Bio-Medicine Optics; E-mail: m_inochkin@mail.ru
- Viacheslav V. Nazarov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technologies and Bio-Medicine Optics; E-mail: v_v_nazarov@mail.ru
- Dmitry Yu. Sachkov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technologies and Bio-Medicine Optics; E-mail: dsachkov@gmail.com
- Olga P. Sidorova** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technologies and Bio-Medicine Optics; E-mail: sidorova_olga86@rambler.ru
- Leonid V. Khloponin** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technologies and Bio-Medicine Optics; E-mail: l_khloponin@yahoo.com
- Valery Yu. Khramov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technologies and Bio-Medicine Optics; E-mail: khramov@grv.ifmo.ru

P. 85—89.

ESTIMATE OF ATMOSPHERIC TRANSMITTANCE ON THE BASE OF EXPERIMENTAL DATA

Experimental data are employed for derivation of analytical formulas for calculation of atmospheric transmittance in two IR operation ranges. The formulas provide approximate transmittance value independent of the visible range in each of five specified climatic zones.

Keywords: atmospheric transmittance, Earth remote sensing, algorithm, infrared spectral range.

Data on authors

- Anatoly V. Demin** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Informatics and Applied Mathematics; E-mail: dav_60@mail.ru
- Maria I. Moiseeva** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Informatics and Applied Mathematics; E-mail: mim14@mail.ru