

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Сеньченков В. И., Абсалямов Д. Р.** Выбор минимального множества контролируемых признаков для определения технического состояния системы 5
- Мионов В. И., Мионов Ю. В., Юсупов Р. М.** Метод приближенного корректирующего оператора в задачах вариационного оценивания параметров движения космических аппаратов 11
- Ушаков А. В., Яицкая Е. С.** Рекуррентное систематическое помехозащитное преобразование кодов: возможности аппарата линейных двоичных динамических систем..... 17

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Тозик В. Т.** Алгебраический метод определения полного множества простых разрезов в двухполюсных сетях..... 26
- Польте Г. А., Саенко А. П.** Количественная оценка качества изображений с использованием методов нечеткой логики..... 32

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Балошин Ю. А., Сорокин А. А., Арсеньев А. В., Дудин М. Г., Волченко А. Н.** Метод диагностики функциональной активности тканей и органов биообъектов и устройство для его реализации..... 37
- Севастьянов В. В., Казимиров Э. К.** Многоканальное устройство для электровоздействия на органы и ткани группы пациентов 43
- Зиатдинов С. И.** Дискретные алгоритмы дифференцирования с промежуточным сглаживанием отсчетов входного сигнала..... 46
- Галалу В. Г.** Преобразователь код—напряжение для цифровых вольтметров..... 51

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Коняхин И. А., Мерсон А. Д., Тимофеев А. Н.** Анализ проектных инвариантов для анаморфотных контрольных элементов оптико-электронных систем определения деформаций скручивания 55
- Иванов А. С., Манухов В. В., Федорцов А. Б., Чуркин Ю. В.** Быстродействующий прибор для контроля угловой зависимости коэффициента отражения лазерного луча 61

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

- Емельянов А. Л.** Теплоотдача в воздушно-капельном потоке в системах охлаждения приборов..... 65

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- Фокина М. И., Собошук Н. О., Денисюк И. Ю.** Исследование процессов формирования полимерного микроэлемента на торце оптического волокна в условиях значительного ингибирующего влияния кислорода на процесс фотополимеризации..... 69
- Путилин Э. С., Губанова Л. А.** Перспективы развития оптики тонких пленок 75

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Горбачев А. А., Зюзин В. В., Серикова М. Г.** Исследование многокоординатных оптико-электронных измерительных систем пространственного положения движущегося объекта относительно реперных точек 82
- Войнов К. Н., Есбулатова А. Ж.** Оценка плотности несанкционированного заполнения межстенного пространства пассажирского вагона 83
- Семенов А. В., Бухановский А. В.** Метрологический анализ в социальных сетях 85

ИНФОРМАЦИЯ..... 87

- SUMMARY** (*перевод Ю. И. Копилевича*)..... 89

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Senchenkov V. I., Absalyamov D. R.** Selection of the Minimal Set of Controlled Factors to Determine System Technical State..... 5
- Mironov V. I., Mironov Yu. V., Yusupov R. M.** Approximate Correcting Operator Method in the Problems of Variation Estimation of Space Vehicle Movements Parameters 11
- Ushakov A. V., Yaitskaya E. S.** Recurrent Systematic Noise-Immune Conversion of Codes: Hardware Potentials of Linear Binary Dynamic Systems 17

COMPUTING TECHNIQUE

- Tozik V. T.** Algebraic Method for Determination of Full Set of Simple Cuts in Bipolar Networks..... 26
- Polte G. A., Saenko A. P.** Image Quality Measurement Using Fuzzy Logic Methods..... 32

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Baloshin Yu. A., Sorokin A.A., Arsen'ev A. V., Dudin M. G., Volchenko A. N.** Biological Objects and Tissue Functional Activity Diagnostic Technique and Its Implementation..... 37
- Sevastianov V. V., Kazimirov E. K.** A Multichannel Device for Electrical Influence on Organs and Tissues of Group of Patients 43
- Ziatdinov S. I.** Discrete Differentiation Algorithms with Intermediate Smoothing of Input Signal Counts 46
- Galalu V. G.** Voltage-Digital Converter for Digital Voltmeter..... 51

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Konyakhin I. A., Merson A. D., Timofeev A. N.** Analysis of Design Invariants for Anamorphic Elements of Optoelectronic Systems for Torsional Strain Measurement.... 55
- Ivanov A. S., Manukhov V. V., Fedortsov A. B., Churkin Yu. V.** An Advanced Device for Fast Measurement of Angle Dependence of Laser Beam Reflection 61

HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Emelianov A. L.** Convective Heat Exchange in Air-Droplet Flow in Instrument Cooling System 65

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

- Fokina M. I., Sobeschuk N. O., Denisyuk I. Yu.** Analysis of Polymeric Microelement Formation on Optical Fiber End under Significant Inhibiting Influence of Oxygen on Photopolymerization..... 69
- Putilin E. S., Gubanova L. A.** Prospects of Progress in Optics of Thin Films 75

BRIEF NOTES

Gorbachyov A. A., Zuzin V. V., Serikova M. G. Optoelectronic Multicoordinate Systems for Moving Object Position Measurement Relative to Bench Marks.....	82
Voinov K. N., Esbulatova A. Zh. Density Estimation of Unauthorized Packing of Voids in Coach Interwall Room.....	83
Semyonov A. V., Boukhanovsky A. V. Metrological Analysis in Social Networks.....	85
INFORMATION	87
SUMMARY	89

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

В. И. СЕНЬЧЕНКОВ, Д. Р. АБСАЛЯМОВ

ВЫБОР МИНИМАЛЬНОГО МНОЖЕСТВА КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ

Рассматривается задача выбора минимального множества контролируемых признаков, обеспечивающих наблюдаемость заданных видов технического состояния системы, а следовательно, и требуемую достоверность принятия решений о ее функциональной пригодности. В основе решения указанной задачи — использование свойств ортогональных векторных систем.

Ключевые слова: техническое состояние, контролируемый признак, скалярное произведение, ортогональная система.

Введение. Для получения информации о техническом состоянии системы следует зарегистрировать траектории ее выходного процесса, которые затем подвергаются преобразованию с целью получения вектора контролируемых признаков $Y_{<n>}$. Этот вектор называется наблюдаемым состоянием системы как объекта контроля (ОК) технического состояния. В работе [1] предложен новый подход к преобразованию траекторий выходных процессов ОК, основанный на теории пространств измеримых функций и интеграла Лебега.

В общем случае размерность вектора $Y_{<n>}$ является избыточной. Это означает, что существует такой вектор контролируемых признаков $Y_{<n'>}$ меньшей размерности ($n' < n$), на котором все виды технического состояния ОК являются наблюдаемыми.

Выделение минимального множества контролируемых признаков — это важнейшая задача, решение которой позволяет снизить размерность математической модели ОК и повысить ее обзорность. Кроме того, повышается достоверность контроля технического состояния ОК благодаря снижению количества измерений на ОК, каждое из которых сопровождается методическими и метрологическими погрешностями.

Теоретико-множественная формулировка задачи выбора минимального множества контролируемых признаков. На множестве векторов $Y_{<n>}$ может быть задана структура n' -мерного евклидова пространства Y . В данном пространстве выделяются подмножества (области) Y^i ($i = \overline{1, m}$) наблюдаемых состояний, которые принадлежат i -му виду технического состояния ОК. В общем случае области Y^i частично пересекаются между собой, иначе — элементы $Y_{<n'>}$ находятся между собой в отношении толерантности

$$\Omega \subset Y \times Y,$$

которое обладает следующими свойствами [2]:

- а) рефлексивность: $\forall Y \in Y, (Y, Y) \in \Omega$;
- б) симметричность: $\forall Y_1, Y_2 \in Y: (Y_1, Y_2) \in \Omega \Rightarrow (Y_2, Y_1) \in \Omega$;
- в) антитранзитивность: $\exists Y_1, Y_2, Y_3 \in Y: (Y_1, Y_2) \in \Omega, (Y_2, Y_3) \in \Omega \Rightarrow (Y_1, Y_3) \notin \Omega$.

Выражение $(Y_i, Y_j) \in \Omega$ означает, что наблюдаемые состояния Y_i и Y_j находятся между собой в отношении толерантности Ω , а $(Y_i, Y_j) \notin \Omega$ указывает на то, что данные состояния в этом отношении Ω не находятся.

Из приведенных свойств следует, что области Y^i ($i = \overline{1, m}$) могут рассматриваться как классы толерантности, а фактор-пространство $Y/\Omega = \{Y^i \mid i = \overline{1, m}\}$ является покрытием пространства Y .

Процесс отнесения текущего состояния ОК к той или иной области Y^i в покрытии Y/Ω характеризуется значительной степенью неопределенности из-за пересечений областей и может давать ошибочные результаты.

Необходимо таким образом преобразовать области Y^i ($i = \overline{1, m}$), чтобы максимально исключить возможность их пересечения, т.е. отношение толерантности нужно трансформировать в отношении эквивалентности

$$\Sigma \subset Y \times Y,$$

обладающее следующими свойствами [2]:

а) рефлексивность: $\forall Y \in Y, (Y, Y) \in \Sigma$;

б) симметричность: $\forall Y_1, Y_2 \in Y: (Y_1, Y_2) \in \Sigma \Rightarrow (Y_2, Y_1) \in \Sigma$;

в) транзитивность: $\forall Y_1, Y_2, Y_3 \in Y: (Y_1, Y_2) \in \Sigma, (Y_2, Y_3) \in \Sigma \Rightarrow (Y_1, Y_3) \in \Sigma$.

Данные свойства показывают, что отношение эквивалентности задает факторизацию пространства Y на непересекающиеся области Y^i , а фактор-пространство $Y/\Sigma = \{Y^i \mid i = \overline{1, m}\}$ является разбиением пространства Y .

Очевидно, что в предлагаемой постановке задачи трансформация отношения Ω в отношение Σ означает снижение размерности пространства Y . При этом снижение должно быть достигнуто за счет исключения тех координат из наблюдаемых состояний $Y_{\langle n \rangle} \in Y$, по которым области Y^i ($i = \overline{1, m}$) пересекаются между собой. В результате снижения размерности пространства Y наблюдаемое состояние $Y_{\langle n \rangle} \in Y$ ($n < n'$) будет содержать только те координаты (контролируемые признаки), на которых все виды технического состояния являются наблюдаемыми.

Для того чтобы снизить размерность пространства Y и при этом исключить пересечение областей Y^i , необходимо знать, какие контролируемые признаки недостаточно информативны для определения текущего технического состояния ОК. Поэтому в настоящей статье рассматривается подход к снижению размерности пространства Y , связанный со сжатием изображений видов технического состояния ОК. Под изображением понимается формальное представление вида технического состояния как составной части математической модели ОК. Предлагаемая процедура сжатия изображений позволяет выявлять и исключать малоинформативные контролируемые признаки.

Решение задачи выбора минимального множества контролируемых признаков системы. Построение исходных (несжатых) изображений

$$E_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in'})^T, \quad i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

производится на основе следующих данных:

— перечень всех видов технического состояния ОК

$$Q = \{q_i \mid i = \overline{1, m}\}; \quad (2)$$

— состав контролируемых признаков

$$Y = \{y_j \mid j = \overline{1, n'}\}; \quad (3)$$

— ограниченная по объему обучающая выборка реализаций наблюдаемых состояний, принадлежность которых каждому виду технического состояния ОК известна:

$$\begin{aligned} & \left\{ \mathbf{Y}_{<n'>k}^1 \mid k = \overline{1, N^1} \right\} \subset Y^1; \\ & \left\{ \mathbf{Y}_{<n'>k}^2 \mid k = \overline{1, N^2} \right\} \subset Y^2; \\ & \dots\dots\dots \\ & \left\{ \mathbf{Y}_{<n'>k}^m \mid k = \overline{1, N^m} \right\} \subset Y^m, \end{aligned} \tag{4}$$

где N^i ($i = \overline{1, m}$) — мощность множества элементов, принадлежащих подмножеству Y^i . Построение изображений (1) на основе исходных данных (2)—(4) с применением процедуры обучения рассматривается в работе [3].

Сжатие предполагает исключение из изображений $\mathbf{E}_{<n'>i}$ ($i = \overline{1, m}$) тех координат, по которым они неразличимы между собой (а соответствующие области Y^i , $i = \overline{1, m}$, пересекаются в пространстве Y по этим координатам). Таким образом, из наблюдаемых состояний исключаются и соответствующие указанным координатам контролируемые признаки.

Известно [4], что минимальная различимость двух векторов одинаковой размерности обеспечивается при условии их линейной независимости, степень различимости увеличивается при возрастании меры обладания векторами свойством ортогональности. Следовательно, для обеспечения наблюдаемости видов технического состояния требуется выполнение двух условий.

1. Матрица \mathbf{E} транспонированных векторов изображений \mathbf{E}_i ($i = \overline{1, m}$) не должна содержать одинаковых или пропорциональных строк:

$$\mathbf{E}_i \neq a_1 \mathbf{E}_k, \forall a_1 \in \{\mathbf{R} \setminus 0\}, i, k = \overline{1, m}, i \neq k,$$

где \mathbf{R} — множество вещественных чисел. Данное условие указывает на линейную независимость строк матрицы \mathbf{E} .

2. Значение скалярного произведения векторов \mathbf{E}_i и \mathbf{E}_k должно стремиться к нулю:

$$(\mathbf{E}_i, \mathbf{E}_k) \rightarrow 0, i, k = \overline{1, m}, i \neq k.$$

Чем ближе к нулю значение скалярного произведения, тем больше мера обладания векторами \mathbf{E}_i и \mathbf{E}_k свойством ортогональности.

В зависимости от требований к достоверности контроля технического состояния необходимо задаваться некоторым пороговым значением a_2 , чтобы выполнялось условие

$$(\mathbf{E}_i, \mathbf{E}_k) < a_2, i, k = \overline{1, m}, i \neq k, a_2 \in \mathbf{R}^+, \tag{5}$$

где \mathbf{R}^+ — множество положительных вещественных чисел.

Для вывода правила задания a_2 и определения минимального состава контролируемых признаков следует рассмотреть механизм получения ортогональных систем векторов при условии, что имеются исходные линейно независимые, но не ортогональные системы. К ним относится и система векторов $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_m$. Наиболее эффективна для решения подобных задач процедура ортогонализации Грама—Шмидта [4]. Она позволяет путем линейного преобразования системы $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_m$ получить ортогональную систему $\mathbf{E}_1^\perp, \mathbf{E}_2^\perp, \dots, \mathbf{E}_m^\perp$, если общее число векторов m меньше их размерности n' : $m < n'$. С помощью указанной процедуры связь между исходными и преобразованными векторами задается следующими выражениями:

3. Из последовательности (15) скалярных произведений, начиная с первого ее элемента и далее подряд, выбираются столбцы без повторения номеров, входящие в состав произведений. Как только количество выбранных столбцов становится равным m , процесс заканчивается. Данные столбцы в наибольшей степени приближаются к попарно ортогональным. Их номера указывают и на номера контролируемых признаков, которые войдут в минимальное множество.

Полученные строки, т.е. сжатые изображения видов технического состояния

$$E_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in})^T, \quad i = \overline{1, m}, \quad n = m,$$

также будут в наибольшей степени приближаться к попарно ортогональным, поскольку они включают элементы выбранных столбцов.

Реализация указанного этапа означает, что размерность евклидова пространства Y снижена до величины n за счет исключения тех координат из элементов данного пространства, по которым области Y^i пересекаются в наибольшей степени.

4. Выполняется проверка неравенств (5): если они выполняются, то сформированные изображения включаются в состав модели контроля технического состояния.

5. При невыполнении условий (5) следует изменить состав контролируемых признаков, так как ни исходное множество этих признаков, ни какое-либо из его подмножеств не обеспечивает наблюдаемости видов технического состояния ОК, а следовательно и требуемой достоверности контроля.

В том случае, когда состав контролируемых признаков изменяется, необходимо повторить процедуру обучения [3] на основе исходных данных (2)—(4) и сформировать новое множество несжатых изображений, которое затем также подвергается сжатию.

Таким образом, в настоящей работе показано, что использование минимального множества информативных контролируемых признаков является важнейшим условием повышения достоверности принятия решений о функциональной пригодности системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сеньченков В. И. Математическое обеспечение контроля технического состояния мехатронных комплексов // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 10. С. 27—32.
2. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Физматлит, 2009.
3. Сеньченков В. И. Процедура обучения при разработке моделей контроля технического состояния сложных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 1. С. 3—8.
4. Воеводин В. В. Линейная алгебра. М.: Наука, 1980.
5. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981.

Сведения об авторах

- Валентин Иванович Сеньченков** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра специальных технических систем космических комплексов, Санкт-Петербург; E-mail: svi9@rambler.ru
- Дамир Расимович Абсалямов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра специальных технических систем космических комплексов, Санкт-Петербург; E-mail: damir73@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
специальных технических систем
космических комплексов

Поступила в редакцию
22.09.10 г.

В. И. МИРОНОВ, Ю. В. МИРОНОВ, Р. М. ЮСУПОВ

МЕТОД ПРИБЛИЖЕННОГО КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ОПЕРАТОРА В ЗАДАЧАХ ВАРИАЦИОННОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассматриваются особенности применения вариационного подхода к оцениванию параметров состояния нелинейных динамических систем в задачах навигации космических аппаратов. Краевая задача оптимального оценивания параметров движения решается на основе конструктивного метода приближенного корректирующего оператора. Приводится численный пример.

Ключевые слова: навигационное оценивание, краевая задача, метод приближенного корректирующего оператора.

Введение. В настоящее время основными при определении орбит космических аппаратов (КА) являются методы, базирующиеся на совместной обработке результатов наблюдений по полной выборке. Они позволяют успешно решать широкий круг важных и сложных прикладных задач [1—8 и др.]. В динамических задачах оценивания условий непосредственно применяются метод максимального правдоподобия (ММП) и метод наименьших квадратов. По смыслу они представляют необходимые условия оптимальности, характерные для прямых методов оптимизации.

Вместе с тем метод максимального правдоподобия может быть реализован на основе использования условий оптимальности оценок вариационного типа. Вопросы обоснования и разработки соответствующей вариационной технологии рассматривались в работах авторов [9, 10] применительно к оцениванию состояния нелинейных динамических систем.

Настоящая статья посвящена вариационному подходу к решению задач навигационного оценивания параметров движения КА по данным измерений установленной на его борту навигационной аппаратуры потребителя (НАП), работающей по сигналам спутниковой радионавигационной системы. При этом в качестве данных измерений рассматриваются оценки векторов параметров текущего состояния КА, получаемые НАП на заданном мерном интервале времени, которые подлежат совместной обработке. С целью сокращения объема вычислений при решении краевых задач вариационного оценивания применяется конструктивный метод приближенного корректирующего оператора, предложенный в работе [11].

В статье определяются и конкретизируются необходимые условия оптимальности оценок вариационного типа применительно к модели движения КА в нормальном гравитационном поле, учитывающем полярное сжатие Земли. Приводятся результаты численных расчетов.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу оценивания параметров движения динамического объекта, которая заключается в наилучшем определении n -мерного вектора его исходного состояния \mathbf{x}_0 на начальный момент времени $t = t_0$ по результатам измерений, проведенных в N точках t_j , заданных на интервале измерений $\tau = T - t_0$.

Задача. Пусть динамика объекта описывается векторным дифференциальным уравнением

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad t \in [t_0, T],$$

измеряется m -мерный вектор

$$\boldsymbol{\psi}(t) = \boldsymbol{\Psi}[\mathbf{x}(t)].$$

Измеренное значение вектора $\boldsymbol{\psi}$ в момент t_i обозначим как $\mathbf{y}(t_i) = \mathbf{y}_i$ и представим модель измерений в виде

$$\mathbf{y}(t_i) = \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i)] + \boldsymbol{\delta}_i,$$

$$i = 1(1)N; \quad t_i \in [t_0, T].$$

Здесь $\boldsymbol{\delta}_i$ — m -мерный вектор случайных ошибок измерений, стохастическое изменение которого зададим некоторым многомерным непрерывным дифференцируемым распределением $f(\boldsymbol{\delta}_i, \boldsymbol{\alpha}_i)$ с параметрами $\boldsymbol{\alpha}_i$, отличающимся в общем случае от нормального распределения.

Требуется найти такую оценку вектора \mathbf{x}_0 , которая обеспечивает минимальное значение функционала:

$$I = \sum_{i=1}^N \rho_i \{ \mathbf{y}(t_i), \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i)], \boldsymbol{\alpha}_i \},$$

где

$$\rho_i = \ln f_i \{ \mathbf{y}(t_i) - \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i), \boldsymbol{\alpha}_i] \}; \quad i = 1(1)N.$$

Функции $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t)$ и $\boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t)]$ будем считать однозначными, ограниченными, непрерывными и дифференцируемыми по всем аргументам во всей области их определения. Нетрудно видеть, что функционал I есть не что иное, как логарифмическая функция правдоподобия.

Для решения поставленной задачи в работе [9] были получены условия оптимальности оценок вариационного типа, которые заключаются в следующем: оптимальная оценка вектора \mathbf{x}_0 и соответствующая ей оптимальная траектория являются решением краевой задачи для следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t); \quad \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^T}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda}$$

при граничных условиях

$$\boldsymbol{\lambda}(t_i^+) = \boldsymbol{\lambda}(t_i^-) + \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y}_i, \boldsymbol{\psi}(\mathbf{x}_i), t_i];$$

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = \mathbf{0}; \quad \boldsymbol{\lambda}(T) = \mathbf{0};$$

$$i = 1(1)N.$$

Таким образом, рассматриваемую задачу можно интерпретировать как двухточечную краевую с промежуточными ограничениями на сопряженный вектор $\boldsymbol{\lambda}(t)$.

Приведенные выше условия оптимального оценивания можно конкретизировать применительно к заданному виду распределения вектора случайных ошибок измерений. Так, если для вектора $\boldsymbol{\delta}_i$ принимается нормальное распределение $N(0, \mathbf{K}_{\boldsymbol{\delta}_i})$ с нулевым вектором математического ожидания и корреляционной матрицей $\mathbf{K}_{\boldsymbol{\delta}_i}$, что, как правило, имеет место на практике, решение задачи оптимального оценивания сводится к решению краевой задачи

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t); \quad \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\partial \bar{\boldsymbol{\varphi}}^T}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda};$$

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = \mathbf{0}; \quad \boldsymbol{\lambda}(T) = \mathbf{0};$$

$$\boldsymbol{\lambda}(t_i^+) = \boldsymbol{\lambda}(t_i^-) + \frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T(t_i)}{\partial \mathbf{x}_i} \mathbf{W}_i \{ \mathbf{y}_i - \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i)] \};$$

$$i = 1(1)N.$$

Согласно этим условиям, для получения оптимальной оценки вектора \mathbf{x}_0 необходимо решить краевое уравнение

$$\lambda(\mathbf{x}_0, T) = 0,$$

заданное неявно на процедурах интегрирования сопряженных систем дифференциальных уравнений. Для этого можно применить известные численные методы поиска корней нелинейных уравнений, например метод Ньютона, его модификации и другие.

С точки зрения сокращения объема вычислений и повышения оперативности расчетов особый интерес представляет применение конструктивных методов решения краевых задач такого рода, в частности метода приближенного корректирующего оператора [11]. Согласно этому методу, для решения исходной краевой задачи применяется вычислительная процедура

$$\mathbf{q}_{k+1} = M \left[-\sum_{i=0}^k \lambda(\mathbf{q}_i, T) \right]; \quad k = 1, 2, 3, \dots,$$

где $M[\bullet]$ — приближенный корректирующий оператор (ПКО), представляет собой алгоритм приближенного решения приближенного краевого уравнения

$$\tilde{\lambda}(\mathbf{q}, T) = 0.$$

Конструктивной особенностью метода ПКО является возможность синтеза семейства алгоритмов численного решения краевой задачи, различающихся сложностью и скоростью сходимости в зависимости от выбора приближенной модели $\tilde{\lambda}(\mathbf{q}, T)$ и принятого способа приближенного решения приведенного уравнения. Условия сходимости данного метода определены в [8] на основе принципа сжимающих отображений.

С помощью метода ПКО могут быть выбраны приближенные модели множеством различных способов с учетом специфики исходных зависимостей и условий решаемой задачи. Для этого могут применяться как формальные приемы упрощения исходных моделей, так и методы их аппроксимации. Во всех случаях необходимо стремиться к тому, чтобы приближенный алгоритм решения задачи был сравнительно простым и обеспечивалась достаточно быстрая сходимость итерационного процесса.

Важной особенностью метода ПКО является то обстоятельство, что значение неизвестного вектора \mathbf{q} уточняется на каждом итерационном шаге путем однократного интегрирования дифференциальных уравнений движения объекта. Этим обеспечивается высокая экономичность вычислений. Ниже это будет показано на примере.

Значение оператора $M[\bullet]$ может изменяться или уточняться в ходе вычислительного процесса по его текущим результатам на каждой итерации или через несколько итераций. В этом случае можно говорить о комбинированных вариантах использования метода ПКО.

В целом метод ПКО выражает достаточно общую идеологию конструирования алгоритмов решения краевых задач и нелинейных уравнений.

Определение параметров орбиты космического аппарата по данным спутниковой навигации. Рассмотрим особенности применения вариационного метода максимального правдоподобия на примере решения задачи статистического оценивания параметров движения КА по результатам текущих навигационных оценок, полученных его бортовой навигационной аппаратурой, работающей по сигналам спутниковой навигационной системы. Движение КА будем рассматривать в нецентральной гравитационном поле Земли. Соответствующие уравнения движения в абсолютной геоцентрической системе координат имеют вид [12]

$$\dot{x} = v_x; \quad \dot{y} = v_y; \quad \dot{z} = v_z;$$

$$\begin{aligned}\dot{v}_x &= \left(-\frac{\mu}{r^3} + p\right)x; \quad \dot{v}_y = \left(-\frac{\mu}{r^3} + p\right)y; \quad \dot{v}_z = \left(-\frac{\mu}{r^3} + p + \Delta p\right)z; \\ p &= \frac{3}{2} \frac{\mu}{r^3} J_{20} \left(1 - 5 \frac{z^2}{r^2}\right) \left(\frac{R_e}{r}\right)^2 + \frac{15}{8} \frac{\mu}{r^3} J_{40} \left(-1 + 14 \frac{z^2}{r^2} - 21 \frac{z^4}{r^4}\right) \left(\frac{R_e}{r}\right)^4; \\ \Delta p &= 3 \frac{\mu}{r^3} J_{20} \left(\frac{R_e}{r}\right)^2 + \frac{15}{8} \frac{\mu}{r^3} J_{40} \left(\frac{28}{3} \frac{z^2}{r^2} - 4\right) \left(\frac{R_e}{r}\right)^4; \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad J_{20} = -1\,082\,627 \cdot 10^{-9}; \quad J_{40} = 2371 \cdot 10^{-9};\end{aligned}$$

где $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$ и $\mathbf{v} = [v_x, v_y, v_z]^T$ — векторы координат и скорости движения КА соответственно; $R_e = 6378,136$ км — экваториальный радиус Земли; $\mu = 398\,600,44$ км³/с² — постоянная притяжения Земли.

Проведем прямые полные дискретные измерения элементов векторов \mathbf{r} и \mathbf{v} , так что модель измерений принимает вид

$$\mathbf{y}_{1i} = \mathbf{r}(t_i) + \delta \mathbf{r}_i; \quad \mathbf{y}_{2i} = \mathbf{v}(t_i) + \delta \mathbf{v}_i; \quad i = 1(1)N,$$

где $\delta \mathbf{r}_i$, $\delta \mathbf{v}_i$ — ошибки оценок НАП, полученных в моменты времени t_i .

Составим соответствующую сопряженную систему дифференциальных уравнений. Анализ показывает, что при обработке навигационных данных на ограниченных мерных интервалах в модели сопряженной системы можно ограничиться членами, соответствующими ньютоновской части гравитационного поля. В этом случае будем иметь следующую систему сопряженных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{\lambda}_r &= \frac{\mu_0}{r^3} [\lambda_v - \frac{3}{r^2} (\mathbf{r} \mathbf{r}^T) \lambda_v]; \quad \dot{\lambda}_v = -\lambda_r; \\ \lambda &= [\lambda_r, \lambda_v]^T = [\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z, \lambda_{v_x}, \lambda_{v_y}, \lambda_{v_z}]^T.\end{aligned}$$

Теперь в соответствии с приведенными выше вариационными условиями оптимальности для оценивания вектора начального состояния КА $\mathbf{q} = [\mathbf{r}, \mathbf{v}]^T$ необходимо решить двухточечную краевую задачу для приведенных систем уравнений движения и сопряженных уравнений с учетом следующих граничных условий:

$$\lambda(t_0) = 0; \quad \lambda(T) = 0;$$

$$\lambda_r(t_i^+) = \lambda_r(t_i^-) + \mathbf{K}_{\delta r}^{-1} [\mathbf{y}_{1i} - \mathbf{r}(t_i)]; \quad \lambda_v(t_i^+) = \lambda_v(t_i^-) + \mathbf{K}_{\delta v}^{-1} [\mathbf{y}_{2i} - \mathbf{v}(t_i)]; \quad i = 1(1)N,$$

где $\mathbf{K}_{\delta r}$ и $\mathbf{K}_{\delta v}$ — корреляционные матрицы ошибок измерений векторов координат и скорости движения КА соответственно.

Таким образом, решение задачи сводится к поиску корней краевого уравнения

$$\lambda(\mathbf{q}, T) = 0.$$

Применение метода Ньютона приводит к следующему итерационному алгоритму:

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k - \left[\frac{\partial \lambda(\mathbf{q}, T)}{\partial \mathbf{q}} \right]_k^{-1} \lambda(\mathbf{q}_k, T); \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Проиллюстрируем возможности конструктивного метода приближенного корректирующего оператора для конкретизации вида оператора M , рассмотрев приближенное решение исходной задачи, соответствующее условиям движения спутника по орбитам, близким к круговым. Для этого используем модель динамики в однородном центральном поле и модель прямых эквивалентных измерений полного вектора состояния. В этом случае краевая задача оптимального оценивания принимает вид

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \mathbf{V}; \\ \dot{\mathbf{v}} &= -\omega^2 \mathbf{r}; \\ \dot{\bar{\lambda}}_r &= \omega^2 \bar{\lambda}_v; \\ \dot{\bar{\lambda}}_v &= -\bar{\lambda}_r; \\ \lambda(t_j^+) &= \lambda(t_j^-) + \mathbf{K}_{\bar{x}_j}^{-1} [\tilde{\mathbf{x}}_j - \mathbf{x}(t_j)]; \quad j = 1(1)N_1; \\ \lambda(t_0) &= \lambda(T) = 0, \end{aligned}$$

где ω — угловая скорость орбитального движения спутника в начальный момент t_0 :

$$\omega = \omega(\mathbf{x}_0) = \sqrt{\mu_0 r_0^{-3}}; \quad r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}.$$

Решение этой краевой задачи сводится к определению корня \mathbf{x}_0 нелинейного уравнения

$$\sum_{j=1}^{N_1} \mathbf{V}(T, t_j) \mathbf{K}_{\delta_j}^{-1} [\tilde{\mathbf{x}}_j - \mathbf{U}(t_j, t_0) \mathbf{x}_0] = 0,$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{U}(t_j, t_0) &= \begin{bmatrix} \cos \omega(t_j - t_0) \mathbf{E} & \omega^{-1} \sin \omega(t_j - t_0) \mathbf{E} \\ -\omega \sin \omega(t_j - t_0) \mathbf{E} & \cos \omega(t_j - t_0) \mathbf{E} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{V}(T, t_j) &= \begin{bmatrix} \cos \omega(T - t_j) \mathbf{E} & \omega \sin \omega(T - t_j) \mathbf{E} \\ -\omega^{-1} \sin \omega(T - t_j) \mathbf{E} & \cos \omega(T - t_j) \mathbf{E} \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

\mathbf{E} — единичная (3×3)-матрица. Нелинейность этого уравнения определяется зависимостью фундаментальных матриц \mathbf{U} и \mathbf{V} от параметра ω , который, в свою очередь, зависит от неизвестного вектора \mathbf{x}_0 .

Проанализировав структуру приведенных выражений, приходим к заключению, что для решения исходной краевой задачи вариационного оценивания параметров движения КА можно применить итерационную вычислительную процедуру метода ПКО с корректирующим оператором

$$M_k = \left[\sum_{j=1}^{N_1} \mathbf{V}(T, t_j / \mathbf{x}_{0_k}) \mathbf{K}_{x_j}^{-1} \mathbf{U}(t_j, t_0 / \mathbf{x}_{0_k}) \right]^{-1}.$$

Приведем некоторые результаты вычислений. Расчеты проводились для спутника, находящегося на орбите с высотой $h = 900$ км и эксцентриситетом 0,003. С помощью датчика случайных величин по нормальному закону распределения на мерном интервале $T = 100$ с моделировалась с шагом $\Delta t = 1$ с статистическая выборка прямых измерений вектора текущего состояния КА. При этом предельные ошибки измерений задавались значениями 100 м по элементам вектора координат и 1 м/с — по элементам вектора скорости. Некоторые результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты оптимального оценивания

Величина	x_0 , км	y_0 , км	z_0 , км	v_{x_0} , км/с	v_{y_0} , км/с	v_{z_0} , км/с
Точное значение	0	-7249,926	0	0,904 95	0,005 75	7,370 23
Начальное приближение	50	-7199,926	50	0,954 95	0,055 75	7,820 23
Оптимальная оценка	-0,006	-7249,928	-0,007	0,904 97	0,005 80	7,370 30
Ошибка оценивания	-0,006	-0,002	-0,006	-0,000 01	0,000 05	0,000 06

Таблица 2

Сходимость вычислительного процесса

Номер итерации	Ошибки оценивания					
	$\delta x_0, \text{ м}$	$\delta y_0, \text{ м}$	$\delta z_0, \text{ м}$	$\delta V_{x_0}, \text{ м/с}$	$\delta V_{y_0}, \text{ м/с}$	$\delta V_{z_0}, \text{ м/с}$
0	50 000	50 000	50 000	50	50	50
1	-7,6	-2,8	-7,9	0,05	0,04	-0,01
2	-6,3	-1,9	-6,5	0,02	0,05	0,06
3	-6,3	-1,9	-6,5	0,02	0,05	0,06

В табл. 1 даны точные значения параметров начального фазового состояния КА в абсолютной геоцентрической системе координат, принятое начальное приближение элементов уточняемого вектора, полученные в результате вариационной обработки измерений оптимальные оценки, а также характеристики точности оценивания. В табл. 2 представлены значения ошибок оценивания по итерациям. Приведенные в таблицах данные свидетельствуют о высокой точности и скорости сходимости вычислительного процесса. Расчеты показали, что применение метода ПКО в принятых условиях позволяет сократить объем вычислений примерно в четыре-пять раз.

В заключение отметим, что предлагаемые методические средства могут быть использованы при разработке и модернизации алгоритмов навигационного оценивания КА. Алгоритмы вариационного типа могут применяться самостоятельно или параллельно с традиционными алгоритмами прямого оптимального оценивания для контроля правильности вычислений и обеспечения надежности расчетов. Они могут также найти применение при решении задач тестирования приближенных алгоритмов оценивания и обоснования эффективного состава и программы измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 09-08-00259).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аким Э. Л., Энеев Т. М. Определение параметров движения космических аппаратов по данным траекторных измерений // Космические исследования. 1963. Т. 1, № 1. С. 5—50.
2. Брандин Н. К., Разоренов Г. Н. Определение траекторий КА. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
3. Космические траекторные измерения / Под ред. П. А. Агаджанова, В. Е. Дулевича, А. А. Коростелева. М.: Сов. радио, 1969. 504 с.
4. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1958. 350 с.
5. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. Г. С. Нариманова и М. К. Тихонравова. М.: Машиностроение, 1972. 608 с.
6. Шебшаевич В. С., Дмитриев П. П., Иванцевич Н. В. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
7. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Под ред. Р. М. Юсупова. М.: МО СССР, 1984. 563 с.
8. Эльясберг П. Е. Определение движения по результатам измерений. М.: Наука, 1976. 416 с.
9. Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Вариационное оценивание состояния нелинейной динамической системы по критерию максимального правдоподобия // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 2—6.
10. Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Метод наименьших квадратов в задачах вариационного оценивания состояния нелинейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. 2009. № 6. С. 2—6.

11. Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Синтез итерационных алгоритмов решения краевых задач и нелинейных уравнений // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 1. С. 9—14.
12. Мамон П. А., Половников В. И., Слезкинский С. К. Баллистическое обеспечение космических полетов. Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1990. 622 с.

Сведения об авторах

- Вячеслав Иванович Миронов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН; E-mail: mironuv@yandex.ru
- Юрий Вячеславович Миронов** — д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН; E-mail: mironuv@yandex.ru
- Рафаэль Мидхатович Юсупов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН; директор; E-mail: spiiiran@ias.spb.su

Рекомендована институтом

Поступила в редакцию
07.07.10 г.

УДК [517.938 + 519.713/718]: 621.398

А. В. УШАКОВ, Е. С. ЯИЦКАЯ

**РЕКУРРЕНТНОЕ СИСТЕМАТИЧЕСКОЕ ПОМЕХОЗАЩИТНОЕ
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КОДОВ: ВОЗМОЖНОСТИ АППАРАТА
ЛИНЕЙНЫХ ДВОИЧНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Рассматривается проблема формирования матричных компонентов векторно-матричного описания двоичных динамических систем помехозащитного преобразования кодов. Показано, что базис представления матричных компонентов зависит от проверочной и образующей матриц помехозащищенного кода, а также от его образующего модулярного многочлена.

Ключевые слова: двоичная динамическая система, систематический помехозащищенный код, проверочная и образующая матрицы, образующий модулярный многочлен, помехозащитное преобразование кодов.

В работах [1, 2], посвященных преобразованию кодов (ПК), представленных в виде кодовых последовательностей, получен конструктивный инструментальный модельного представления процедур ПК в виде линейных последовательностных машин (ЛПМ). Так как термин ЛПМ выпадает из общей теории систем, то со временем он был заменен понятием „линейная двоичная динамическая система“ (ЛДДС). Таким образом, ЛДДС, использующая в основном векторно-матричные модельные представления (ВММП) аппарата пространства состояний (АПС), со временем стала инструментом ПК, в том числе и помехозащитного преобразования систематических кодов в задачах кодирования и декодирования [3—5]. Из теории АПС [6] известно, что одной из проблем формирования векторно-матричного модельного представления динамических процессов над бесконечными и конечными полями является поиск базиса представления, в котором матричные компоненты ВММП обладают желаемыми исследователю свойствами. Причем возможность выбора базиса представления при построении ВММП процессов общего вида практически не ограничена. К сожалению, этого нельзя сказать о ВММП ЛДДС, использованных в задачах помехозащитного преобразования кодов.

Известно [7, 8], что систематическое помехозащитное преобразование кодов (ППК) в задачах кодирования и декодирования может быть осуществлено несколькими способами, основанными на различном описании процесса ППК. Тем не менее эти способы имеют единое

функциональное представление, структурная реализация которого приведена на рис. 1, здесь КУ — помехозащитное кодирующее устройство, формирующее на своем выходе помехозащищенный код (ПЗК); КС — канал связи, выполняющий функцию среды искажения в задаче ППК; ДКУ — помехозащитное декодирующее устройство, формирующее на своем выходе синдром ошибки (факта или места искажения); ФСК — формирователь сигнала коррекции; \oplus — сумматор по модулю два; $a(*)$ — помехонезащищенный информационный код (ПНЗИК); $y(*)$ — помехозащищенный код передачи; $\xi(*)$ — код помехи, действующей на код $y(*)$ при его передаче по КС; $f(*)$ — искаженный в КС ПЗК; $E(*)$ — код синдрома ошибки (факта или места искажения); $\eta(*)$ — код коррекции; $\hat{y}(*)$ — откорректированный принятый из КС код, удовлетворяющий условию

$$\hat{y}(*) = \arg \min_{\eta(*)} \{ \|y(*) - \hat{y}(*)\| \}.$$

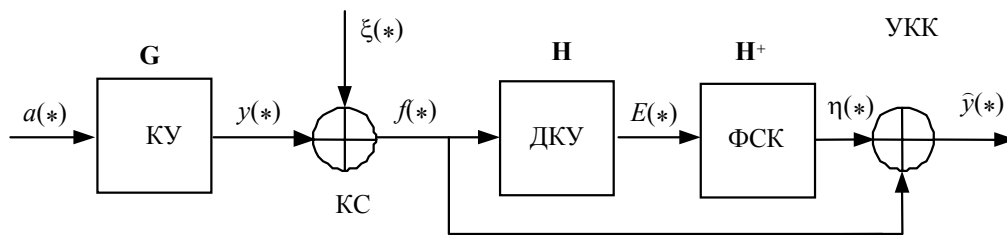


Рис. 1

Символ „*“ опускается, если все коды, использованные в процедуре помехозащитного преобразования, рассматриваются как векторы-строки, преобразование которых осуществляется в соответствии с векторно-матричными соотношениями:

$$y = a\mathbf{G}, \quad f = y + \xi, \quad E = f\mathbf{H}, \quad \eta = E\mathbf{H}^+, \quad \hat{y} = f + \eta. \quad (1)$$

Операцию сложения следует понимать как процедуру суммирования по модулю два; $a: \dim a = k$; $y: \dim y = n$; $f: \dim f = n$; $\xi: \dim \xi = n$; $E: \dim E = m = n - k$; $\eta: \dim \eta = n$; $\hat{y}: \dim \hat{y} = n$; \mathbf{G} — образующая $(k \times n)$ -матрица ПЗК; \mathbf{H} — проверочная $(n \times m)$ -матрица ПЗК, которая удовлетворяет условию $\{\mathbf{G}, \mathbf{H}\} = \arg \{\mathbf{GH} = 0\}$.

Если коды, используемые в процедуре помехозащитного преобразования кодов, рассматриваются как модулярные многочлены (ММ) над полем Галуа $\text{GF}(p)|_p=2$, то символ „*“ принимает значение переменной x . При этом преобразование кодов-ММ осуществляется в соответствии с модулярными полиномиальными соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} y(x) &= a(x)x^m + r(x) : \text{rest} \frac{y(x)}{g(x)} = 0, \quad r(x) = \text{rest} \frac{a(x)x^m}{g(x)}, \\ f(x) &= y(x) + \xi(x), \\ E(x) &= \text{rest} \frac{f(x)}{g(x)} = \text{rest} \frac{\xi(x)}{g(x)}, \\ \eta(x) &= \xi(x), \quad \hat{y}(x) = f(x) + \eta(x), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

в которых $a(x): \deg a(x) = k - 1$; $y(x): \deg y(x) = n - 1$; $f(x): \deg f(x) = n - 1$; $\xi(x): \deg \xi(x) = n - 1$; $E(x): \deg E(x) = m - 1$; $\eta(x): \deg \eta(x) = n - 1$; $\hat{y}(x): \deg \hat{y}(x) = n - 1$;

$g(x)$ — образующий модулярный многочлен ПЗК, представляющий собой неприводимый многочлен степени m , имеющий не менее $d_{\min} = 2s + 1$ ненулевых элементов.

Символ „*“ принимает смысл дискретного времени q , выраженного в числе тактов длительности Δt , при этом все коды, используемые в процедуре помехозащитного преобразования, рассматриваются как кодовые последовательности, преобразование которых осуществляется рекуррентным образом в соответствии с векторно-матричными соотношениями, параметризованными дискретным временем q :

$$x_k(q+1) = \mathbf{A}_k x_k(q) + \mathbf{B}_k u_k(q); y(q) = \mathbf{N}u_k(q), \quad (3)$$

$$x_k(q+1) = \bar{\mathbf{A}}x_k(q); y(q) = \mathbf{C}_k x_k(q), \quad (4)$$

$$f(q) = y(q) + \xi(q), \quad (5)$$

$$x_d(q+1) = \mathbf{A}_d x_d(q) + \mathbf{B}_d u_d(q), \quad (6)$$

в которых $u_k(q) = a(q)$ — входная двоичная последовательность, представляющая собой вводимый в КУ ПНЗИК; x_k — вектор состояния КУ, размерности $\dim x_k = m$; $y(q)$ — формируемая ПЗК-последовательность; \mathbf{A}_k — $(m \times m)$ -матрица состояния КУ; \mathbf{B}_k — $(m \times 1)$ -матрица входа КУ; $\mathbf{C}_k = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}_{1 \times (n-1)} \end{bmatrix}$ — матрица выхода КУ; $\mathbf{N} = [1]$ — матрица вход—выход КУ; $\bar{\mathbf{A}}$ — нильпотентная матрица с индексом $\nu = m$; $u_d(q) = f(q)$ — входная двоичная последовательность, представляющая собой принятый из канала связи искаженный систематический ПЗК; x_d — вектор состояния ДКУ размерности $\dim x_d = m$; \mathbf{A}_d — $(m \times m)$ -матрица состояния ДКУ; \mathbf{B}_d — $(m \times 1)$ -матрица входа ДКУ.

Постановка задачи. Ставится задача синтеза ЛДДС помехозащитного преобразования кодов с матрицами $\mathbf{A}_k, \mathbf{B}_k, \mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d, \bar{\mathbf{A}}, \mathbf{C}_k, \mathbf{N}$ как функциями образующего модулярного многочлена ПЗК $g(x)$, его проверочной \mathbf{H} и образующей \mathbf{G} матриц:

$$\{\mathbf{A}_k, \mathbf{B}_k, \mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d, \bar{\mathbf{A}}, \mathbf{C}_k, \mathbf{N}\} = \Psi(g(x), \mathbf{H}, \mathbf{G}).$$

Приведенные выше методы помехозащитного преобразования кодов характеризуются различным уровнем связи их аналитического описания с возможной аппаратной реализацией. Действительно, первый метод, представленный системой выражений (1), использующий векторно-матричное описание ППК, не параметризованное временем, приводит к системе скалярных аналитических выражений (САВ), которые позволяют строить устройства помехозащитного кодирования и декодирования [8].

Второй метод, представленный системой выражений (2), приводит к двум видам аппаратной реализации ППК: схемотехнической и программной, описываемой рекуррентными процедурами параметризованной дискретным временем q , задаваемыми соотношениями (3)—(6). Схемотехническая реализация ППК имеет две версии: первая строится по схеме „ $g(x) \rightarrow (G, H) \rightarrow \text{САВ}$ “; вторая — по схеме „ $g(x) \rightarrow \text{УДММ} : \Phi(d) = g^{-1}(d) \rightarrow \text{СР}\Phi(d)$ “, УДММ — устройство деления ММ, СР $\Phi(d)$ — структурная реализация передаточной функции $\Phi(d)$.

Для формирования программной реализации устройств ППК в форме (3)—(6) формулируем необходимые определение и утверждение.

Определение 1. Помехозащищенный (n, k) -код, множество кодовых комбинаций которого y_i мощностью $[y_i] = 2^k$, описываемых модулярными многочленами $y_i(x)$, обладающими рекуррентным свойством

$$\text{rest} \frac{y_i(x)}{g(x)} = 0, \quad (7)$$

называется циклическим помехозащищенным кодом. \square

Утверждение 1. Код, множество кодовых комбинаций которого формируется в соответствии с первым соотношением системы (2), обладает рекуррентным свойством (7), т.е. является циклическим ПЗК. \square

Доказательство утверждения сводится к доказательству наличия у кода с ММ (2) рекуррентного свойства (7). Для этой цели полиномиальный компонент $a(x)x^m$ представим в форме $a(x)x^m = Q(x)g(x) + r(x)$. Если полученное выражение подставить в первое соотношение системы (2) и осуществить приведение по модулю два, то получим

$$y(x) = \{Q(x)g(x) + r(x) + r(x)\} \bmod 2 = Q(x)g(x). \quad (8)$$

Нетрудно видеть, что представление (8) определяет наличие у $y(x)$ рекуррентного свойства (7). \blacksquare

По существу, первое выражение представления (2) ММ $y(x)$ циклического ПЗК содержит алгоритм его формирования в среде рекуррентного кодирующего устройства. При этом КУ функционирует посредством коммутации структуры. Это вызвано тем, что при формировании (n, k) -кода в течение первых k тактов k -разрядная информационная часть в виде кодовой последовательности одновременно подается в КС и на вход УДММ для вычисления остатка в форме

$$x^T(Q) = K \left\{ \text{rest} \left(\frac{a(x)x^m}{g(x)} \right) \right\}.$$

По принятии информационной части из источника дискретной информации (ИДИ) вход КС переключается с выхода ИДИ на выход УДММ, в котором сформировался остаток. Все обратные связи в УДММ в этот момент разрываются, процесс деления останавливается, а УДММ без связей становится m -разрядным регистром сдвига. Все перечисленные коммутации цепей и связей осуществляются специально вводимым в состав КУ устройством коммутации (УК). Таким образом, помехозащитное КУ представляет собой объединение УДММ и УК, функционирующее в два этапа. На первом оно описывается ЛДДС вида (3), а на втором — вида (4).

Третье выражение представления (2) ММ $E(x)$ синдрома ошибки по существу описывает алгоритм функционирования рекуррентного декодирующего устройства, который предназначен для проверки сохранности рекуррентного свойства (7) применительно к принятому из КС искаженному коду с ММ $f(x) = y(x) + \xi(x)$ путем деления этого многочлена на образующий $g(x)$. Если $E(x) = 0$, то принимается решение, что $f(x) = y(x)$. Если $E(x) \neq 0$, то синдром используется как адрес искажений кода. Помехозащитное ДКУ есть функциональное объединение УДММ и устройства съема синдрома, отражающее состояние УДММ в момент $q = n$ так, что код

$$K \{E(x)\} = x_d^T(q) \Big|_{q=n}.$$

Таким образом, УДММ в фазе вычисления остатка описывается ЛДДС вида (6).

Утверждение 2. Матрица \mathbf{B}_k ЛДДС УДММ кодирующего устройства (3) с точностью до операции транспонирования совпадает с последней (k -й) строкой $\tilde{\mathbf{G}}^k$ матрицы $\tilde{\mathbf{G}}$, входящей в состав образующей матрицы $\mathbf{G} = \left[\mathbf{I}_{(k \times k)} \quad \tilde{\mathbf{G}} \right]$ так, что выполняется соотношение

$$\mathbf{B}_k^T = \tilde{\mathbf{G}}^k = \mathbf{K} \left\{ g(x) + x^m \right\}, \quad (9)$$

где $\mathbf{K} \{ (\bullet) \}$ — код ММ (\bullet) . □

Доказательство. Рассмотрим процесс кодирования для случая помехозащищенного кода a , имеющего единицу только в младшем разряде, а в остальных — нули $\{ \text{ММ} : a(x) = 1 \}$. Это значит, что входная последовательность $u_k(q)$ с учетом передачи кодов и ММ старшим разрядом вперед будет иметь вид

$$u_k(q) = \left[u_k(0) = 0, u_k(1) = 0, \dots, u_k(k-2) = 0, u_k(k-1) = 1, u_k(k) = 0 \dots \right].$$

В течение первых $(k-1)$ тактов ЛДДС УДММ кодирующее устройство будет находиться в нулевом состоянии. При приеме элемента $u_k(q)|_{q=k-1} = 1$ ЛДДС устройство деления модулярного многочлена КУ в силу (3) перейдет в состояние

$$x_k(q+1)|_{q+1=k} = A_k x_k(q)|_{x_k(q)|_{q=0, k-1}} = 0 + B_k u_k(q)|_{u_k(q)|_{q=k-1}} = 1 = \mathbf{B}_k.$$

Данное соотношение в транспонированном виде $\{ x_k(k) = \mathbf{B}_k \}^T$ определяет код

$$\mathbf{K} \left\{ \text{rest} \frac{a(x)x^m}{g(x)} \Big|_{a(x)=1} = \text{rest} \frac{x^m}{g(x)} = g(x) + x^m \right\}$$

остатка от деления, выводимый из КУ и задаваемый последней k -й строкой $\tilde{\mathbf{G}}^k$ матрицы $\tilde{\mathbf{G}}$ кодов остатков так, что выполняется цепочка равенств

$$x_k^T(k) = \mathbf{B}_k^T = \tilde{\mathbf{G}}^k = \mathbf{K} \left\{ g(x) + x^m \right\}. \quad \blacksquare$$

Соотношение (9) совместно с представлением функционирования рекуррентного КУ позволяет сконструировать его векторно-матричное описание в форме ЛДДС вида (3)—(4).

Алгоритм 1 (A1) формирования матриц $\{ \mathbf{A}_k, \mathbf{B}_k, \bar{\mathbf{A}}, \mathbf{C}_k, \mathbf{N} \} = \Psi(g(x), \mathbf{G})$

ЛДДС рекуррентного помехозащитного кодирования

1. По заданному информационному массиву W мощности $[W] = V_u$ определить размерность k помехозащищенного информационного кода в силу соотношения $k = \min \arg \left\{ 2^k \geq V_u = [W] \right\}$.

2. По заданным категории системы, характеризующейся величиной $P_{\text{доп}}$ — допустимой вероятностью приема ложной команды, и параметру модели двоичного канала связи в форме p — вероятностью искажения разряда (бита) кода, заданному выражением $p = \max \{ p_{01}, p_{10} \}$, определить кратность исправляемой ошибки s

$$s = \min \arg \left\{ N_c = 2^m - 1 \geq N_{\text{ош}} = \sum_{i=1}^s C_n^i \& \sum_{i=s+1}^n C_n^i p^i (1-p)^{n-i} \leq P_{\text{доп}} \right\},$$

где N_c — число синдромов, $N_{\text{ош}}$ — число исправляемых ошибок.

3. В зависимости от величины s -кратности исправляемой ошибки — выбрать из таблиц неприводимых многочленов или сформировать с помощью БЧХ-технологии [9] реализацию образующего ММ $g(x)$ степени m и сформировать (n, k) -формат помехозащищенного кода, где n удовлетворяет условию $n = k + m$.

4. Вычислить D -образ ММ $g(x)$ в форме

$$g(d) = D\{g(x)\} = \tilde{g}(x^{-1})\Big|_{x^{-1}=d}, \text{ где } \tilde{g}(x^{-1}) = x^{-m}g(x).$$

5. Сконструировать передаточную функцию $\Phi_k(d)$ УДММ КУ на образующий ММ $g(x)$ в форме $\Phi_k(d) = \frac{1}{g(d)}$.

6. Пользуясь правилом Мейсона не касающихся контуров, построить две предварительные структурные реализации передаточной функции $\Phi_k(d)$ на элементах памяти (ЭП) с передаточной функцией $\Phi_{\text{ЭП}}(d) = d$ в двух канонических базисах.

7. Произвести разметку входов и выходов ЭП каждой структурной реализации переменными $x_{ki}(q+1)$ на входе и $x_{ki}(q)$ на выходе, присвоив выходу самого правого ЭП переменную $x_{k1}(q)$, а его входу — $x_{k1}(q+1)$, и сформировать векторно-матричное описание (ВМО) автономной версии УДММ $x_k(q+1) = \mathbf{A}_k x_k(q)$, „списав“ реализации матриц \mathbf{A}_k с отмеченных структурных реализаций $\Phi_k(d)$.

8. Сформировать матрицу входа \mathbf{B}_k УДММ КУ (3) в форме (9).

9. Структурно с использованием правила Мейсона или аналитически определить передаточные функции УДММ КУ (3) для двух базисных реализаций матрицы \mathbf{A}_k состояния УДММ для процесса кодирования как $\Phi_k(d) = \mathbf{C}_k (d^{-1}\mathbf{I} + \mathbf{A}_k)^{-1} \mathbf{B}_k$.

10. Выбрать для дальнейшего использования структурную реализацию передаточной функции УДММ КУ, отмеченная версия которой характеризуется матрицей \mathbf{A}_k ее состояния, удовлетворяющей условию $\mathbf{A}_k = \arg \left\{ g^{-1}(d) = \mathbf{C}_k (d^{-1}\mathbf{I} + \mathbf{A}_k)^{-1} \mathbf{B}_k \right\}$.

11. Сформировать матрицу $\bar{\mathbf{A}}$ УДММ КУ, переведенного в режим регистра сдвига, по отмеченной версии, выбранной в п. 10 структурной реализации $\Phi(d)$ с разорванными обратными связями.

12. Дополнить УДММ УК устройством коммутации структуры УДММ и точки подключения входа канала связи с выхода ИДИ на выход устройства деления модулярных многочленов.

13. На конкретном примере проверить правильность функционирования устройства рекуррентного кодирования, задаваемого парой ВМО (3) и (4) со сформированными матрицами $(\mathbf{A}_k, \mathbf{B}_k, \mathbf{N})$ и $(\bar{\mathbf{A}}, \mathbf{C}_k)$. ■

Утверждение 3. Матрица \mathbf{B}_d входа декодирующего рекуррентного устройства (6) удовлетворяет соотношению

$$\mathbf{B}_d = (\mathbf{H}^n)^T. \quad (10)$$

Доказательство этого утверждения использует тот факт, что синдром E , вычисляемый в соответствии с соотношением $E = \mathbf{fH}$, удовлетворяет цепочке

$E = \mathbf{fH} = (y + \xi)\mathbf{H} = (a\mathbf{G} + \xi)\mathbf{H} = a\mathbf{GH} + \xi\mathbf{H}|_{\mathbf{GH}=0} = \xi\mathbf{H}$ равенств. Это соотношение показывает, что в ВМО (6) процесса декодирования можно положить $u_d(q) = \xi(q)$ так, что оно с учетом (5) принимает вид

$$x_d(q+1) = \mathbf{A}_d x_d(q) + \mathbf{B}_d \xi(q), x_d(0) = 0. \quad (11)$$

Выражение (11) используем при формировании синдромов ошибок, которые образуют строки проверочной матрицы \mathbf{H} в силу соотношения $\mathbf{H}^{n+1-i} = E^i$, где E^i — синдром ошибки в i -м разряде принятого из КС искаженного ПЗК, \mathbf{H}^{n+1-i} — $(n+1-i)$ -я строка матрицы \mathbf{H} . Тогда в соответствии с (6) и при условии $\xi(q): 000\dots 001$ входная последовательность $u_d(q)$ будет иметь вид $u_d(q) = [u_d(0) = 0, u_d(1) = 0, \dots, u_d(n-2) = 0, u_d(n-1) = 1, u_d(n) = 0\dots]$.

В течение первых $(n-1)$ тактов ЛДДС устройство деления модулярных многочленов ДКУ будет находиться в нулевом состоянии. При приеме элемента $u_d(q)|_{q=n-1}=1$ ЛДДС УДММ КУ в соответствии с (6) перейдет в состояние

$$x_d(q+1)|_{q+1=n} = A_d x_d(q)|_{x_d(q)|_{q=0, n-1}=0} + B_d u_d(q)|_{u_d(q)|_{q=n-1}=1} = \mathbf{B}_d.$$

Данное соотношение в транспонированном виде $\{x_d(n) = \mathbf{B}_d\}^T$ определяет код

$$\mathbf{K} \left\{ \text{rest} \frac{\xi(x)}{g(x)} \Big|_{\xi(x)=1} = \text{rest} \frac{1}{g(x)} = 1 \right\}$$

остатка от деления, вводимого из КС в ДКУ кода ошибки с ММ $\xi(x) = 1$, задающей синдром E ошибки в младшем разряде и задаваемой последней (n -й) строкой \mathbf{H}^n проверочной матрицы \mathbf{H} так, что выполняется цепочка равенств

$$E^i \Big|_{i=1} = x_d^T(n) \Big|_{\substack{u_d(n-1)=1 \\ u_d(q)=0; q=0, n-2}} = \mathbf{B}_d^T = \mathbf{H}^{n+1-i} \Big|_{i=1} = \mathbf{H}^n. \quad \blacksquare$$

Соотношение (10) совместно с описанием функционирования рекуррентного ДКУ позволяет сконструировать его векторно-матричное описание в форме ЛДДС вида (6).

Алгоритм 2 (A2) формирования матриц $\{\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d\} = \Psi(g(x), \mathbf{H})$

ЛДДС рекуррентного помехозащитного декодирования

1. Выполнить пп. 1—4 алгоритма A1 синтеза рекуррентного КУ.
2. Сконструировать передаточную матрицу-столбец $\Phi_d(d) = \arg\{x_d(d) = \Phi_d(d)u_d(d)\}$

УДММ ДКУ на образующий ММ $g(x)$ в форме $\Phi_d(d) = \frac{1}{g(d)} \text{col}(\Phi_j(d); j = \overline{1, m})$, где пе-

редаточные функции $(\Phi_j(d); j = \overline{1, m})$ подлежат вычислению.

3. В качестве матрицы \mathbf{A}_d состояния векторно-матричного описания УДММ ДКУ (6) принять матрицу \mathbf{A}_k , удовлетворяющую условиям п. 9 алгоритма A1 так, что становится справедливым матричное соотношение $\mathbf{A}_d = \mathbf{A}_k = \mathbf{A}$.

4. Сформировать матрицу \mathbf{B}_d входа ВМО (6) УДММ ДКУ с помощью соотношения (10).

5. Структурно, реализовав ВМО (6) УДММ ДКУ с матрицами $(\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d)$, сформированными в п. 3, 4, графически, с помощью правила Мейсона, или аналитически, с помощью соотношения $\Phi_d(d) = (d^{-1}\mathbf{I} + \mathbf{A}_d)^{-1} \mathbf{B}_d$, сформировать передаточную матрицу-столбец $\Phi_d(d) = g^{-1}(d) \text{col}(\Phi_j(d); j = \overline{1, m})$, с последующим вычислением $\text{col}(\Phi_j(d); j = \overline{1, m}) = g(d)(d^{-1}\mathbf{I} + \mathbf{A}_d)^{-1} \mathbf{B}_d$.

6. На конкретном примере проверить правильность функционирования устройства рекуррентного декодирования (6) со сформированной парой матриц $(\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d)$. ■

Пример. На основе использования алгоритмов синтеза рекуррентных кодирующих и декодирующих устройств осуществлено их проектирование по следующим исходным данным. Пусть массив сообщений W характеризуется мощностью $[W] = V_u = 120$ и кратностью исправляемой ошибки $s = 2$. Схемы кодирующего и декодирующего устройств приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

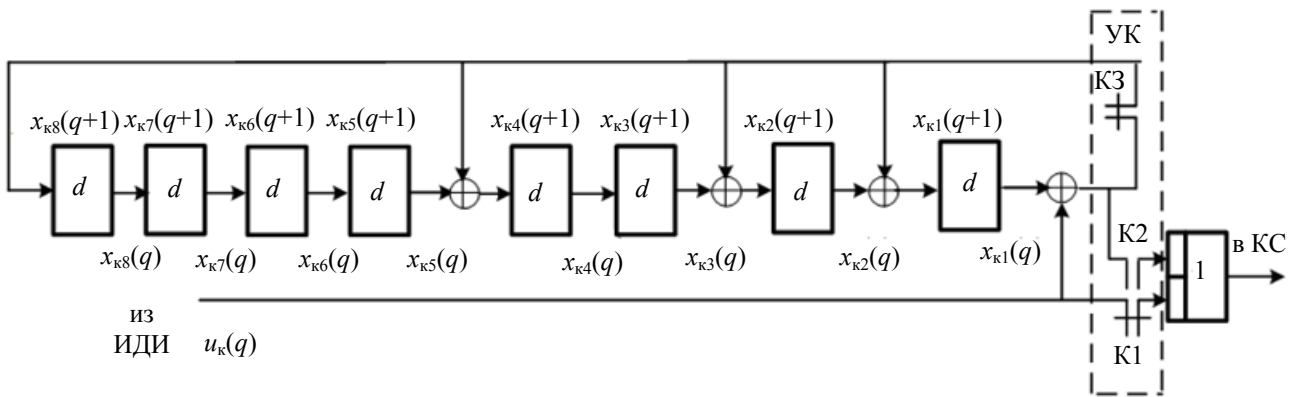


Рис. 2

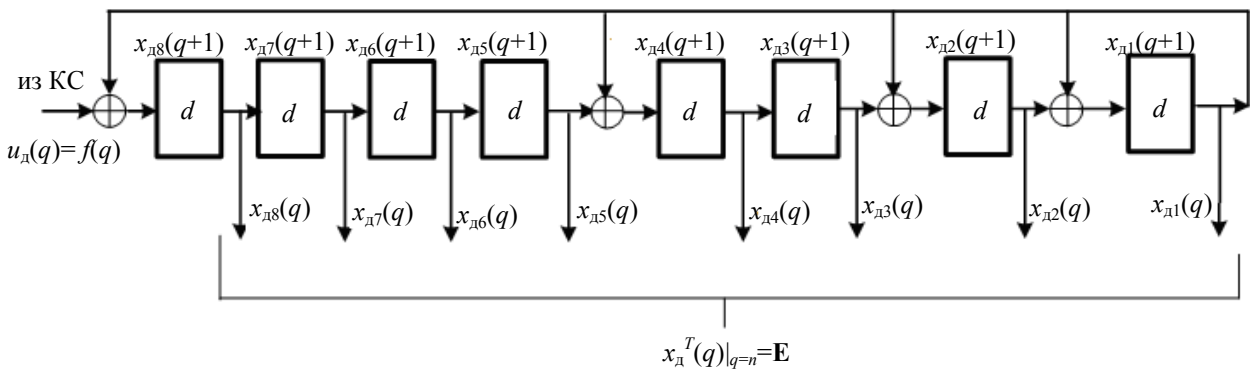


Рис. 3

Заключение. Поставленная задача решена. Показано, что представление процессов преобразования кодов в задаче помехозащитного кодирования и декодирования средствами линейных двоичных динамических систем на основе связи матриц входа с образующей и проверочной матрицами имеет элегантную алгоритмическую поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гилл А. Линейные последовательностные машины. М.: Наука, 1974.
2. Фараджеев Р. Г. Линейные последовательностные машины. М.: Сов. радио, 1975.

3. Кирюшин А. А., Рассветалова Л. А., Ушаков А. В. Модальное управление в задаче синтеза двоичных динамических систем в логике линейных триггеров // Автоматика и телемеханика. 1993. № 7.
4. Рассветалова Л. А., Ушаков А. В. Двоичное динамическое наблюдение в задаче помехоустойчивого кодирования // Автоматика и телемеханика. 1993. № 6.
5. Ушаков А. В. Синтез циклических кодирующих и декодирующих устройств в логике произвольных триггеров // Автоматика и телемеханика. 1997. № 11.
6. Заде Л., Дезоер Ч. Теория линейных систем. М.: Наука, 1970.
7. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1976.
8. Тугтевич В. Н. Телемеханика. М.: Высш. школа, 1985.
9. Мельников А. А., Ушаков А. В. Двоичные динамические системы дискретной автоматики. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005.
10. Rosenthal J. Some interesting problems in systems theory which are of fundamental importance in coding theory // Proc. 36th Conf. Decision Control. San Diego, CA, 1997. Vol. 5. P. 4574—4579.

Сведения об авторах

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

В. Т. Тозик

АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНОГО МНОЖЕСТВА ПРОСТЫХ РАЗРЕЗОВ В ДВУХПОЛЮСНЫХ СЕТЯХ

Рассматривается задача поиска простых разрезов в двухполюсных структурно-сложных сетях. В основу предлагаемого метода положена алгебраическая модель сети, базирующаяся на алгебре кубических комплексов. Это позволяет предложить эффективную с точки зрения трудоемкости процедуру определения полного множества простых разрезов.

Ключевые слова: двухполюсная сеть, простой разрез, структурная функция, алгебра кубических комплексов.

Задача определения полного множества простых разрезов в двухполюсных сетях нетривиальна. Конструктивный метод ее решения предложен только для плоских графов путем построения полного множества циклов в соответствующих двойственных графах. Однако для достаточно больших графов с нетривиальной структурой (не сводимой к плоской) задача становится непреодолимо сложной ввиду комбинаторных трудностей полного перебора.

В основу предлагаемого в настоящей работе метода положена алгебраическая модель графа, использующая введенную алгебру простых цепей [1] и алгебру кубических комплексов [2], что позволяет предложить достаточно эффективную с точки зрения трудоемкости процедуру определения простых разрезов.

Как было показано в работе [1], структура двухполюсной сети (α, β) может быть представлена булевой структурной функцией (СФ) в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) с помощью простых цепей (элементарных конъюнкций K_j ранга r):

$$f_{\alpha\beta} = \bigvee_{j=1}^m K_j = \bigvee_{j=1}^m \left[\bigwedge_{i=1}^r \lambda x_i \right], \quad (1)$$

где m — число простых цепей сети.

Ту же функцию (1) можно представить в конъюнктивной нормальной форме (КНФ) с помощью простых разрезов (элементарных дизъюнкций D_j ранга s)

$$f_{\alpha\beta} = \bigwedge_{j=1}^t D_j = \bigwedge_{j=1}^t \left[\bigvee_{i=1}^s x_i \right], \quad (2)$$

где t — число простых разрезов двухполюсной сети.

В работе [1] представлен алгоритм, позволяющий определить кубическое покрытие $\Pi(L_1)$, соответствующее ДНФ булевой СФ, записанной в виде простых цепей (1). Теперь рассмотрим выражение (2). С помощью правила де Моргана [2] можно перейти к дизъюнктивной форме отрицания булевой СФ:

$$\bar{f}_{\alpha\beta} = \bigvee_{j=1}^t \bar{D}_j, \quad (3)$$

$$\bar{D}_j = \overline{x_1 \vee x_2 \vee x_2 \vee \dots \vee x_s} = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \dots \bar{x}_s. \quad (4)$$

Отрицанию булевой СФ (3) соответствует покрытие $\Pi(L_0)$ множества вершин n -мерного куба L_0 , на которых данная функция принимает нулевые значения, причем каждой конъюнкции \bar{D}_j ранга s (4) соответствует некоторый куб $C_j \in \Pi(L_0)$. Целью настоящей работы является создание метода определения полного множества таких кубов $\bigcup_{j=1}^t C_j$, каждый

куб C_j которого соответствует конъюнкции \bar{D}_j (4), поставленной в соответствие простому разрезу. Приведем теоретико-множественное представление этой двойственной задачи:

L_1 — подмножество состояний связности сети ($f_{\alpha\beta} = 1$):

$$L_1 \subseteq \Pi(L_1) = \bigcup_{j=1}^m C_j \Rightarrow f_{\alpha\beta} = \bigvee_{j=1}^m K_j,$$

K_j — конъюнкция, поставленная в соответствие простой цепи;

L_0 — подмножество состояний несвязности сети ($f_{\alpha\beta} = 0$):

$$L_0 \subseteq \Pi(L_0) = \bigcup_{j=1}^t C_j \Rightarrow \bar{f}_{\alpha\beta} = \bigvee_{j=1}^t \bar{D}_j,$$

\bar{D}_j — конъюнкция, поставленная в соответствие простому разрезу.

Введем некоторые определения, основанные на положениях работы [2].

Определение 1. Куб $C = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ размерности n есть n -мерный вектор, каждая координата которого a_i принимает значения из множества $\{0, 1, X\}$. Координаты $a_i \in \{0, 1\}$ называются связанными, $a_i = X$ — свободными.

Определение 2. Кубы $C_j = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ и $C_s = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ равны между собой $C_j = C_s$, если $\forall_i (a_i = b_i)$.

Определение 3. Кубы $C_j = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ и $C_s = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ находятся в отношении строгого включения $C_j \subset C_s$, если $\exists_i (a_i \in \{0, 1\} \& b_i = X)$ и не $\exists_i (a_i = X \& b_i \in \{0, 1\} \vee a_i = \bar{b}_i)$.

Определение 4. Кубы C_j и C_s находятся в отношении нестрогого включения $C_j \subseteq C_s$, если $C_j = C_s$ или $C_j \subset C_s$.

Определение 5. Множество кубов Π и множество вершин L_i находятся в отношении нестрогого включения $L_i \subseteq \Pi$, если любая вершина $l \in L_i$ включена в некоторый куб $C \in \Pi$, т.е. $l \subseteq C$. В дальнейшем будем говорить, что множество Π покрывает множество L_i , если $L_i \subseteq \Pi$.

Определение 6. Кубы C_j и C_s несравнимы ($C_j \sim C_s$), если $C_j \not\subseteq C_s$ и $C_s \not\subseteq C_j$.

Ниже дается определение операции объединения, которое отличается от приведенного в работе [2]. Чтобы различать эти две операции, будем обозначать определенную ниже операцию символом \bigcup^+ .

Определение 7. Результат операции объединения двух кубов C_j и C_s определяется как

$$C_j \bigcup^+ C_s = \begin{cases} C_j, & \text{если } C_s \subseteq C_j; \\ C_s, & \text{если } C_j \subseteq C_s; \\ \{C_s, C_j\}, & \text{если } C_j \sim C_s. \end{cases}$$

Операция объединения \bigcup^+ обладает свойством коммутативности и ассоциативности. Результат операции объединения двух множеств кубов Π_d и Π_e определяется как множество $\Pi = \Pi_d \bigcup^+ \Pi_e$, полученное объединением Π_d и Π_e в обычном теоретико-множественном смысле с последующим удалением кубов C_j таких, что $C_j \subseteq C_s$, или C_s таких, что $C_s \subseteq C_j$; $C_j, C_s \in \Pi$.

Объединение множества Π с самим собой приводит к множеству, в котором каждая пара кубов несравнима. В дальнейшем, чтобы отобразить это свойство, будем писать: $\Pi = \bigcup^+ \Pi$.

Определение 8. Результат $\#$ -операции двух кубов $C_j = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ и $C_s = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ определяется как

$$C_j \# C_s = \begin{cases} C_j, & \text{если } \exists_i (a_i = \bar{b}_i); \\ \emptyset, & \text{если } C_j \subseteq C_s; \\ \{C_1, C_2, \dots, C_t, \dots, C_k\}, & \text{причем каждой паре координат } \forall_{i=1}^n (a_i, b_i) \text{ таких, что} \\ & a_i = X, b_i \neq X, \text{ соответствует куб } C_i = (a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, \bar{b}_i, a_{i+1}, \dots, a_{n-1}, a_n). \end{cases}$$

$\#$ -операция некоммутативна и неассоциативна. Для множества кубов и одного куба, а также для двух множеств кубов $\Pi_d = \{C_1^d, C_2^d, \dots, C_m^d\}$ и $\Pi_e = \{C_1^e, C_2^e, \dots, C_k^e\}$ $\#$ -операция определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Pi_d \# C_j &= \{C_1^d \# C_j, C_2^d \# C_j, C_j, \dots, C_m^d \# C_j\}; \\ \Pi_d \# \Pi_e &= \left(\left(\dots \left(\left(\Pi_d \# C_1^e \right) \# C_2^e \right) \# \dots \right) \# C_k^e \right). \end{aligned}$$

Определение 9. Максимальным для заданного множества кубов Π_d называется такой куб C_j , что $C_j \# \Pi_d = \emptyset$, и при замене в C_j хотя бы одной связанной координаты на свободную $C_j \# \Pi_d \neq \emptyset$.

Множество, содержащее все максимальные для Π_d кубы, будем обозначать $\max(\Pi_d)$. Легко показать, что для Π_d множество $\max(\Pi_d)$ единственное.

Определение 10. Простым кубом C_j для булевой СФ называется такой, что $C_j \in \max(\Pi(L_1))$ либо $C_j \in \max(\Pi(L_0))$. Иными словами, простым кубом называется такой куб C_j , для которого в $\Pi(L_1)$ или $\Pi(L_0)$ не существует C_s такой, что $C_j \subseteq C_s$.

В дальнейшем множества простых кубов будем обозначать Z .

Можно показать, что

$$\bigcup^+ (I \# \Pi) = \max(I \# \Pi), \quad (5)$$

где I — куб размерности n , в котором все компоненты свободные.

Поиск простых разрезов может быть осуществлен в два этапа. Вначале определяется полное множество простых цепей, а затем с помощью введенных выше операций и отношений алгебры кубов определяется полное множество простых разрезов.

В работе [1] было предложено осуществлять решение первой задачи на n -мерном кубическом комплексе S^n , это позволило найти покрытие булевой СФ в виде множества кубов $\Pi(L_1) = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$, соответствующих простым цепям.

Отрицанию булевой СФ (3) соответствует покрытие $\Pi(L_0)$ множества вершин n -мерного куба L_0 , на которых данная функция принимает нулевые значения, причем каждой конъюнкции \bar{D}_j (4) соответствует $C_j \in \Pi(L_0)$.

Утверждение 1. Если куб $C_j \in \Pi(L_0)$ соответствует конъюнкции \bar{D}_j (4), поставленной в соответствие j -му простому разрезу, то $C_j \in Z(L_0)$, т.е. C_j является простым кубом для L_0 .

Доказательство. Каждый простой разрез отличается от другого по крайней мере одним элементом, поэтому любые две конъюнкции \bar{D}_j и \bar{D}_s , поставленные в соответствие j -му и s -му простым разрезам, отличаются друг от друга по крайней мере одной буквой. В соответствии с этим кубы C_j и C_s несравнимы ($C_j \sim C_s$), т.е. $C_j \not\subseteq C_s$ и $C_s \not\subseteq C_j$ для $C_j, C_s \in \Pi(L_0)$. Поскольку в каждую конъюнкцию \bar{D}_j буквы входят только в инверсном виде и в силу того, что простой разрез является минимальным по включению множеством элементов, для любого куба $C_j \in \Pi(L_0)$ с ценой R_j не существует куба $C_t \in \Pi(L_0)$ с ценой $R_t \leq R_j - 1$ такого, что $C_j \subset C_t$. Таким образом, все кубы $C_j \in \Pi(L_0)$ являются простыми.

Утверждение 2. Множество простых кубов $Z(L_0)$ является покрытием $\Pi(L_0)$ множества вершин n -мерного куба L_0 , каждый куб $C_j \in \Pi(L_0)$ которого соответствует конъюнкции \bar{D}_j , записанной с помощью простых разрезов.

Доказательство. Предположим обратное. Без потери общности можно допустить, что существует простой куб $C_j \in Z(L_0)$ такой, что $C_j \notin \Pi(L_0)$. В соответствии с утверждением 1 все кубы $C_j \in \Pi(L_0)$ являются простыми. Отсюда $\Pi(L_0) \subseteq Z(L_0)$ и можно записать

$$Z(L_0) = \{\Pi(L_0), C_j\}. \quad (6)$$

Так как оба множества простых кубов $Z(L_0)$ и $\Pi(L_0)$ покрывают одно и то же множество вершин L_0 , и только L_0 , то

$$Z(L_0) \equiv \Pi(L_0). \quad (7)$$

Поскольку множество простых кубов для L_0 единственно, то из (6) и (7) следует, что либо $C_j \notin Z(L_0)$, либо $C_j \in \Pi(L_0)$. Полученное противоречие доказывает данное утверждение.

На основании вышеизложенного можно предложить алгоритм определения множества кубов $\Pi(L_0)$, соответствующих множеству простых разрезов.

Алгоритм

1) определить множество кубов $\Pi(L_1)$, соответствующих множеству простых цепей, с помощью алгоритма, предложенного в [1];

2) тогда $\Pi(L_0) = \bigcup^+ [I \# \Pi(L_1)]$;

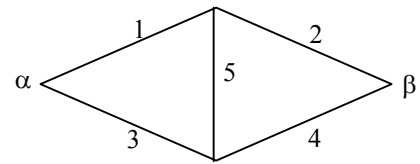
3) конец.

Утверждение 3. В результате алгоритма получается множество кубов $\Pi(L_0)$, соответствующее полному множеству простых разрезов.

Доказательство. Для полностью определенной булевой СФ множество простых кубов $Z(L_0)$ совпадает с множеством максимальных кубов для L_0 . Поэтому из (5) следует $Z(L_0) = \bigcup^+ [I \# \Pi(L_1)]$, а из утверждения 2 — $\Pi(L_0) = Z(L_0)$. Утверждение доказано.

Замечание. Выполнение \bigcup^+ -операции можно осуществлять как после завершения $[I \# \Pi(L_1)]$, так и после каждого $\#$ -вычитания куба $C_j \in \Pi(L_1)$, проводимого на i -м шаге алгоритма. В приведенном ниже примере используется вторая модификация выполнения \bigcup^+ -операции.

Пример. Рассмотрим предложенный метод на примере сети, представленной на рисунке. Применение алгоритма определения полного множества простых цепей к данной сети разобрано в [1]. Поэтому рассмотрим только работу алгоритма определения полного множества простых разрезов, считая заданным исходное множество простых цепей и соответствующих им кубов $\Pi(L_1)$. Для упрощения примера предположим существование только реберных разрезов



$$\Pi(L_1) = \Pi_1 = \begin{cases} X & X & 1 & 1 & X \\ 1 & 1 & X & X & X \\ 1 & X & X & 1 & 1 \\ X & 1 & 1 & X & 1 \end{cases} \begin{matrix} C_1^1 \\ C_2^1 \\ C_3^1 \\ C_4^1 \end{matrix},$$

$$I = (X \ X \ X \ X \ X).$$

В соответствии со свойствами $\#$ -операции

$$\Pi_2 = I \# C_1^1 = \begin{cases} X & X & 0 & X & X \\ X & X & X & 0 & X \end{cases} \begin{matrix} C_1^2 \\ C_2^2 \end{matrix},$$

$$\Pi_3 = \Pi_2 \# C_2^1 = \begin{cases} 0 & X & 0 & X & X \\ X & 0 & 0 & X & X \\ 0 & X & X & 0 & X \\ X & 0 & X & 0 & X \end{cases} \left. \begin{matrix} C_1^3 \\ C_2^3 \\ C_3^3 \\ C_4^3 \end{matrix} \right\} \begin{matrix} C_1^2 \# C_2^1 \\ C_2^2 \# C_2^1 \end{matrix},$$

$$\Pi_4 = \Pi_3 \# C_3^1 = \begin{cases} 0 & X & 0 & X & X \\ 0 & 0 & 0 & X & X \\ X & 0 & 0 & 0 & X \\ X & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & X & X & 0 & X \\ X & 0 & X & 0 & X \end{cases} \left. \begin{matrix} C_1^4 = C_1^3 \# C_3^1 = C_1^3 \\ C_2^4 \\ C_3^4 \\ C_4^4 \\ C_5^4 = C_3^3 \\ C_6^4 = C_4^3 \end{matrix} \right\} C_2^3 \# C_3^1,$$

$$\Pi_5 = \bigcup^+ \Pi_4 = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & X & 0 & X & X \\ X & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & X & X & 0 & X \\ X & 0 & X & 0 & X \end{pmatrix} \\ \begin{cases} C_1^5 = C_1^4 \supseteq C_2^4 \\ C_2^5 = C_4^4 \\ C_3^5 = C_5^4 \\ C_4^5 = C_6^4 \supseteq C_3^4 \end{cases} \end{cases},$$

$$\Pi_6 = \Pi_5 \# C_4^1 = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & X & 0 & X & X \\ X & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & X \\ 0 & X & 0 & 0 & X \\ 0 & X & X & 0 & 0 \\ X & 0 & X & 0 & X \end{pmatrix} \\ \begin{cases} C_1^6 = C_1^5 \\ C_2^6 = C_2^5 \\ C_3^6 \\ C_4^6 \\ C_5^6 \\ C_6^6 = C_4^5 \end{cases} \end{cases} C_3^5 \# C_4^1,$$

$$\Pi(L_0) = \Pi_7 = \bigcup^+ \Pi_6 = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & X & 0 & X & X \\ X & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & X & X & 0 & 0 \\ X & 0 & X & 0 & X \end{pmatrix} \\ \begin{cases} C_1^7 = C_1^6 \supseteq C_4^6 \\ C_2^7 = C_2^6 \\ C_3^7 = C_5^6 \\ C_4^7 = C_6^6 \supseteq C_3^6 \end{cases} \end{cases}.$$

Покрытие Π_7 представляет собой множество кубов $\Pi(L_0)$, соответствующее полному множеству простых разрезов: $\{(1,3), (2,3,5), (1,4,5), (2,4)\}$.

Оценка трудоемкости метода. Как правило, наиболее эффективными являются алгоритмы с трудоемкостью, степенной относительно размерности задачи. Понятие „степенного“ алгоритма близко к принятому в зарубежной литературе определению „хорошего“ алгоритма. Степенная оценка наглядно поясняется с позиций программирования. Линейную оценку имеют алгоритмы, просматривающие информацию единственный раз. Квадратичная оценка связана с „циклом в цикле“. Дальнейший рост порядка оценки соответствует наличию в алгоритме более длинных цепочек вложенных друг в друга циклов.

Другой класс составляют переборные алгоритмы, связанные с просмотром возможных ситуаций — „кандидатов в ответ“ задачи. Обычно число ситуаций экспоненциально возрастает относительно размерности задачи. Тем самым экспоненциальная (а тем более факториальная) трудоемкость переборного алгоритма растет быстрее, чем любая степенная функция.

В работе [1] доказана теоретическая эффективность алгоритма определения простых цепей. Оценка трудоемкости для него, измеряемая числом Δ -операций, ниже квадратичной относительно размерности задачи, представляемой числом простых цепей сети.

Трудоемкость алгоритма определения простых разрезов оценим по числу #-операций и операций сравнения кубов при выполнении \bigcup^+ -операции. Число простых цепей будем по-прежнему обозначать буквой m , а число простых разрезов буквой t . Размерность задачи определяется числом простых разрезов в сети.

Число #-операций может быть оценено как произведение числа кубов m в исходном покрытии $\Pi(L_1)$ на среднее число кубов в покрытии Π_i при выполнении $(\Pi_i \# C_j^1)$. Среднее число кубов в Π_i может быть принято равным t , поскольку после выполнения

$\Pi_{i+1} = \bigcup^+ (\Pi_i \# C_j^1)$ число кубов в Π_{i+1} приблизительно равно t . Таким образом, число #-операций при выполнении алгоритма приблизительно равно mt .

Число попарных операций сравнения при выполнении $\bigcup^+ \Pi_i$ равно $g(g-1)/2$, где g — число кубов в Π_i . Приняв поправочный коэффициент, учитывающий превышение числа кубов в $(\Pi_i \# C_j^1)$ над $\bigcup^+ (\Pi_i \# C_j^1)$, равным в среднем k , можно записать, что число сравнений при выполнении \bigcup^+ -операции равно $kt(kt-1)/2 \approx (kt)^2/2$. Таким образом, общая трудоемкость алгоритма может быть оценена как $T \cong mt + (kt)^2/2$, т.е. трудоемкость алгоритма пропорциональна квадрату размерности задачи. Таким образом, можно сделать вывод об эффективности предложенного метода определения полного множества простых разрезов в двухполюсных сетях. Представление структуры сети в виде кубов кубического комплекса позволяет возможность предложить чрезвычайно эффективные методы поиска простых цепей и разрезов, поскольку множества кубов хорошо представляются в памяти компьютера массивами двоичных кодов, а операции над ними — соответствующими программными средствами. Предложенные методы алгоритмически просты и не накладывают никаких ограничений на структуру исследуемых сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тозик В. Т. Математический аппарат для анализа структурных свойств сетей // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 12. С. 22—30.
2. Миллер Р. Теория переключаемых схем. Т.1. М.: Наука, 1970. 416 с.

Сведения об авторе

Вячеслав Трофимович Тозик

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра инженерной и компьютерной графики; заведующий кафедрой;
E-mail: tozik@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой инженерной и компьютерной графики

Поступила в редакцию 11. 02.10 г.

УДК 621.3.088.7

Г. А. ПОЛЬТЕ, А. П. САЕНКО

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Рассматриваются пути улучшения и оценки качества изображения методами нечеткой логики, в частности, с помощью известного способа определения границ объекта.

Ключевые слова: нечеткая логика, обработка изображений.

Введение. Применяемые в настоящее время способы измерения параметров деталей приборов можно разделить на контактные и бесконтактные — по типу взаимодействия с исследуемым объектом. При изготовлении оптических объективов высокого качества любой

контакт с рабочей поверхностью линзы может привести к ухудшению оптических свойств, поэтому в таких случаях предпочтительно использовать бесконтактные методы, основанные на обработке изображений. Так, например, в процессе измерения по такому методу важно правильно определить границы измеряемого объекта, что может быть затруднено из-за недостаточной резкости изображения, наличия теней и шумов. Поэтому одна из важнейших задач исследований заключается в нахождении границ объекта.

Обработка цифровых изображений с помощью методов нечеткой логики. В работах [1, 2] рассмотрены основные принципы обработки изображений с использованием методов нечеткой логики, а также указаны их преимущества перед классическими. Изображение рассматривается как нечеткое множество и обрабатывается методами нечеткой логики (рис. 1).



Рис. 1

Вначале происходит фаззификация изображения — преобразование изображения к нечеткому множеству. Далее степень принадлежности элементов нечеткого множества (иными словами, пикселей изображения) изменяется в соответствии с базой нечетких правил. И, наконец, происходит дефаззификация изображения — преобразование значений функций принадлежности в четкие (реальные) значения яркости.

Определение границ объекта с использованием методов нечеткой логики. В работе [3] описан способ определения границ объекта с помощью методов нечеткой логики, авторы использовали базу нечетких правил, состоящую из 8 элементов, обозначенных на рис. 2 как № 1—8. Входные переменные системы нечеткого вывода принимали одно из двух нечетких значений: „черное“ или „белое“. Выходная переменная также может принимать одно из двух нечетких значений: „граница“ или „не граница“.

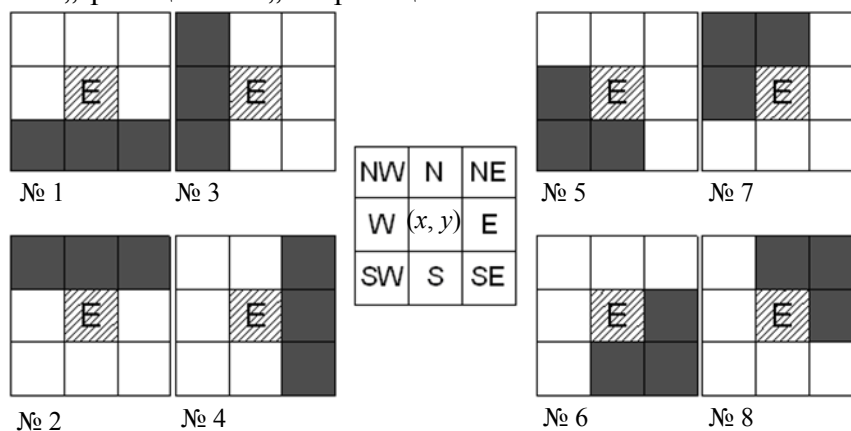


Рис. 2

Авторы настоящей статьи предлагают использовать подобный подход с теми же 8 правилами при обработке изображения, полученного от бесконтактной измерительной системы, с целью повышения его качества. Возможные значения восьми входных и одной выходной

переменных сопоставляются нечеткому множеству, состоящему из двух элементов — „черного“ и „белого“ — с Z - и S -образными функциями принадлежности соответственно (рис. 3, D , у.е. здесь I — уровень яркости, D — степень принадлежности цвету: 1 — черному, 2 — белому).

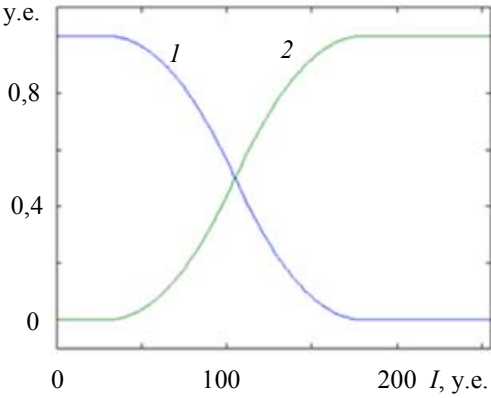


Рис. 3

Далее системой нечеткого вывода анализируется каждый пиксел изображения, после чего ему присваивается новое значение яркости в зависимости от значений яркости восьми соседних пикселов. Результат такой обработки приведен на рис. 4 (a , b , d — исходное изображение; b , z , e — результат обработки). Из рисунка, в частности, видно, что изображение b , а также фрагмент изображения z и функция яркости e обладают более высокими значениями контрастности и резкости наряду с меньшим

уровнем зашумленности по сравнению с исходным изображением (x — длина обрабатываемого элемента — точки).

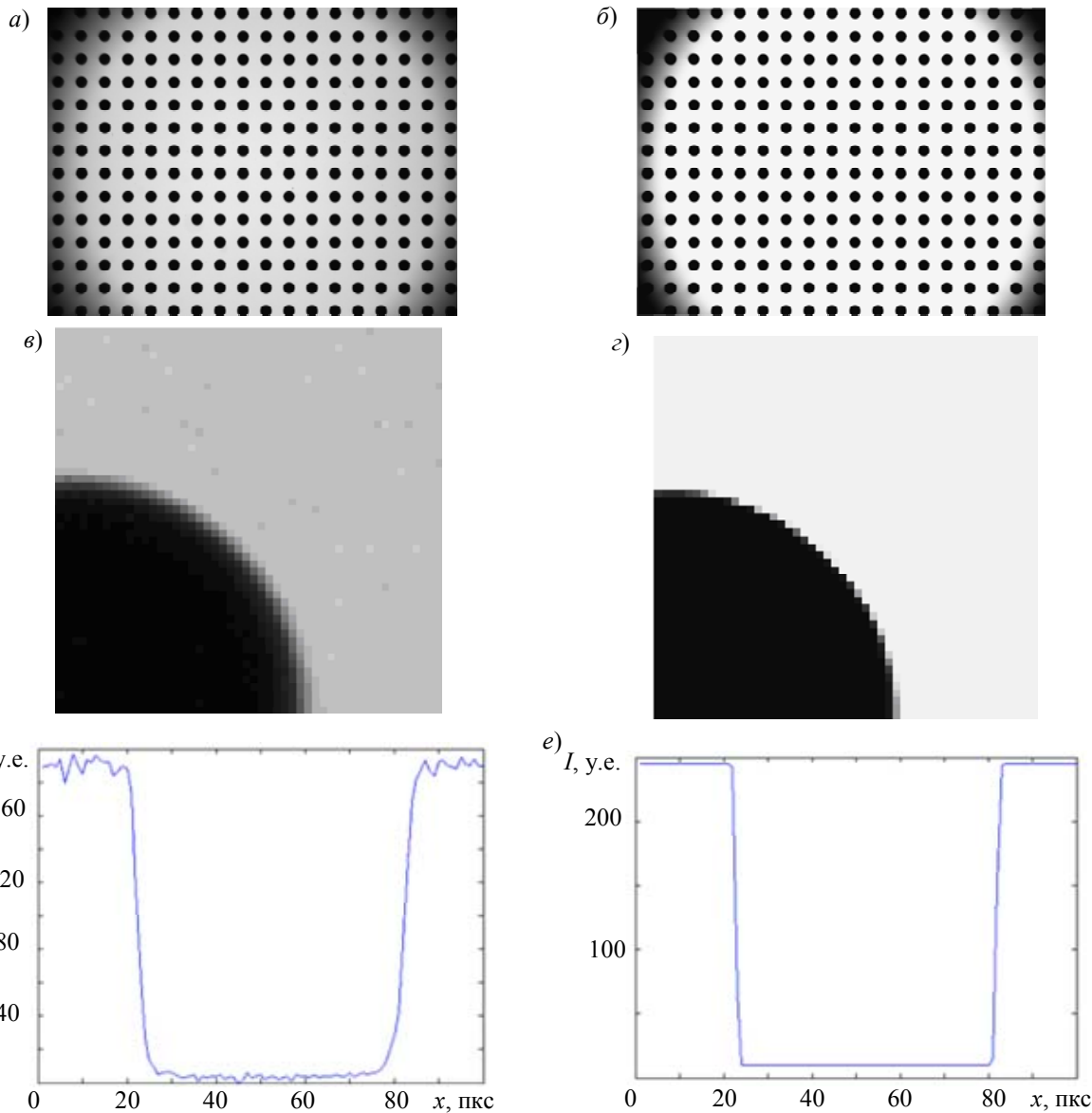


Рис. 4

Количественная оценка качества изображения методами нечеткой логики. Качество изображения зависит от многих параметров, основными из которых для черно-белого полутонового изображения являются [4]:

- резкость количественно можно оценить как длину перехода в пикселах;
- контрастность количественно можно оценить как разность максимального и минимального значений яркости изображения;
- шум количественно можно оценить как среднее арифметическое разброса значений яркости на изображении;
- виньетирование количественно можно оценить как контраст между центральной и периферийной областями одного цвета на изображении;
- кривизна поля изображения количественно можно оценить как разность значений резкости фрагментов из периферийной и центральной областей.

Результаты количественной оценки указанных параметров для исходного изображения и полученного после обработки, а также оценка соответствующих характеристик по десятибалльной шкале (0 — наихудший показатель, 10 — наилучший) приведены в табл. 1.

Таблица 1

	Исходное изображение		Результат обработки	
	абсолютное значение	оценка (0—10)	абсолютное значение	оценка (0—10)
Резкость	13	7	12	9
Контрастность	224	6	235	9
Шум	2,22	6	2,07	7
Виньетирование	142	3	131	5
Кривизна поля изображения	0,5	5	0,5	5
Качество изображения (0—5)	2,67		4,23	

Основные параметры изображения используются в качестве входных переменных системы нечеткого вывода для оценки его качества. При этом каждая переменная описывается одним из трех термов: П — „плохо“, У — „удовлетворительно“, Х — „хорошо“. Выходная переменная „качество изображения“ также описывается одним из трех указанных термов. В табл. 2 приведены некоторые правила для определения взаимосвязей между входными и выходной переменными.

Таблица 2

№	Резкость	Контраст	Шум	Виньетирование	Смещение фокуса	Качество изображения
1	Х	Х	Х	Х	Х	Х
2	П	П	П	П	П	П
3	У	У	У	У	У	У
4	П	Х	Х	Х	П	У

Например, в пакете прикладных программ MatLab правила задаются в виде матрицы следующего вида [5]:

```
ruleList = [...
x1 x2 ... xn y1 y2 ... yn w o ];
```

при этом x_1 x_2 ... x_n — индексы функций принадлежности для соответствующих входных переменных, y_1 y_2 ... y_n — индексы функций принадлежности для соответствующих выходных переменных, w — вес правила, o — логический оператор „И“ или „ИЛИ“. Так, правила, приведенные в табл. 2, задаются следующим образом:

```
ruleList = [...
3 3 3 3 3 3 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1
2 2 2 2 2 2 1 1
1 3 3 3 1 2 1 1 ].
```

Результат работы системы нечеткого вывода для количественной оценки качества данных изображений (по пятибалльной шкале от нуля — наихудшего, до пяти — идеального значения качества изображения) составляет 2,67 для исходного и 4,23 — для получившегося изображений.

Выводы. Методы нечеткой логики являются мощным инструментом для представления и обработки знаний в виде правил вида „если—то“, системы нечеткого вывода разрабатываются быстрее и получаются более простыми по сравнению с четкими аналогами, в них легко внедряются экспертные знания. Нечеткая логика может быть успешно применена при решении задач обработки изображений, например, для повышения качества изображения и его количественной оценки, что и было продемонстрировано.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kerre E., Nachtgeael M. Fuzzy techniques in image processing. Physica-Verlag, 2000.
2. Tizhoosh H. R. Fuzzy-Bildverarbeitung: Einführung in Theorie und Praxis. Springer, 1998.
3. Alshennawy A. A., Aly A. A. Edge Detection in Digital Images Using Fuzzy Logic Technique. World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009. N 51.
4. Bovik A. C. Handbook of Image and Video Processing. Elsevier, 2005.
5. Штовба С. Д. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб: БХВ-Петербург, 2005.

Сведения об авторах

- Галина Александровна Польте** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: galinkan@rambler.ru
- Алексей Петрович Саенко** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: alexey.saenko@gmail.com

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
05.10.10 г.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 53.083.92

Ю. А. БАЛОШИН, А. А. СОРОКИН, А. В. АРСЕНЬЕВ,
М. Г. ДУДИН, А. Н. ВОЛЧЕНКО

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ТКАНЕЙ И ОРГАНОВ БИООБЪЕКТОВ

Для исследования функциональной активности тканей и органов биообъектов предлагается неинвазивный метод ближнепольного высокочастотного зондирования. Рассмотрены физико-биологические основы метода и представлен измерительный комплекс для его реализации в клинических условиях. В качестве иллюстрации возможностей метода приведены результаты определения функциональной активности ростковых зон костей у подростков и детей.

Ключевые слова: ближнепольное ВЧ-зондирование, ростковые зоны, функциональная активность клеток и тканей.

Введение. Хорошо известно, что возникновение и развитие многих заболеваний опорно-двигательного аппарата у детей и подростков связано с нарушением основных процессов регуляции жизнедеятельности организма. Эти процессы находятся под контролем генетического кода и осуществляются благодаря работе основных директивных систем: нервной, эндокринной, иммунной, ферментативной.

Передача и обмен информации между органами и системами для поддержания гомеостаза происходят при помощи нейрогуморальных и биоэлектрических взаимодействий. В частности, информация от таких систем, как эндокринная, ферментативная и иммунная, поступает в виде химических соединений, белковых структур, ионов и т.д. (гормоны, ферменты, иммунные комплексы [1—4]). В нервной системе взаимодействия происходят еще и за счет электрического (первичного) импульса [5].

Логично предположить, что одним из главных условий должного взаимодействия между органами и системами является поддержание необходимого уровня функциональной активности клеток, тканей (соединений), передающих и принимающих „сигнал“. В целом это удобно обозначить термином „функциональная активность клеток и тканей“ (далее — ФАКТ).

Оценка ФАКТ в детской ортопедической практике является одной из актуальных задач. На сегодняшний день эту задачу в клинических условиях косвенно решают с помощью различных методов диагностики: рентгенографии, МРТ-диагностики, компьютерной томографии, радиоизотопной диагностики, ультразвуковых исследований, иммуно-ферментного и биохимического анализа различных сред организма и др. Информативность и диагностическая ценность перечисленных методов широко варьируют в зависимости от конкретной ситуации.

Нельзя не отметить, что при использовании перечисленных диагностических методик невозможно исключить определенного негативного воздействия на человека. К примеру, при проведении стандартного в ортопедии и травматологии обследования — рентгенографии — пациент получает определенную дозу лучевой нагрузки, аналогичная ситуация складывается и при радиоизотопном исследовании скелета (сцинтиграфии). Кроме того, большинство методик требует специального дорогостоящего оборудования, специфических условий эксплуатации; обследование одного пациента может занимать от десятков минут до нескольких часов. Именно поэтому некоторые методы не находят широкого применения в диагностике и мониторинге заболеваний опорно-двигательного аппарата у детей и подростков.

Вместе с тем появление в клинической практике эффективных неоперативных способов лечения с помощью различных физических полей (электрического, магнитного, электромагнитного, теплового) значительно увеличивает востребованность простых и информативных методов контроля ФАКТ.

Таким образом, все вышесказанное определяет необходимость разработки и внедрения принципиально новых методов диагностики, которые должны отвечать следующим требованиям: безопасность (особенно важно в педиатрической практике), информативность, простота, доступность и возможность широкого применения.

Физико-биологические основы метода. Основными предпосылками к разработке предлагаемого метода контроля ФАКТ послужили известные работы, посвященные электрической системе регуляции жизнедеятельности сложных многоклеточных организмов [5, 6].

Из материалов перечисленных работ можно выделить следующие основные моменты:

1) процессы метаболизма, протекающие в клеточной структуре живой ткани, под воздействием на нее внешних факторов связаны с появлением, переносом и распространением электрических зарядов;

2) качество процессов жизнедеятельности организма (норма или патология) меняет его электродинамические параметры, и прежде всего — диэлектрическую проницаемость тканей.

Отсюда следует, что прямая или косвенная оценка диэлектрической проницаемости может служить показателем электрической активности тканей и соответственно ее функциональной активности.

Известно несколько методов измерения диэлектрической проницаемости веществ в различных агрегатных состояниях в постоянном и переменном электрических полях [7]. Некоторые из них с успехом применяются в медицине. Примером является метод реографии, в основе которого лежит определение электрических свойств биологических тканей по импедансу (комплексному сопротивлению) либо по его изменению. Было установлено, что импеданс живой ткани на частоте электромагнитного поля до нескольких мегагерц включает в себя активное и емкостное сопротивление [6].

Эти результаты с учетом требований к способу выявления ФАКТ определили метод реализации поставленной задачи — метод ближнепольного ВЧ-зондирования, особенности которого детально рассмотрены в работе [9], суть его можно пояснить следующим образом. Датчик, представляющий собой малую антенну, включается в колебательный контур генератора высокой частоты. При контакте датчика с исследуемой областью поверхности тела пациента импеданс этой области оказывает влияние на суммарный импеданс антенны. Это, в свою очередь, приводит к изменению частоты колебательного контура генератора. На рис. 1 приведена схема емкостной части суммарного импеданса C^* антенна—биообъект: C_d — от-

крытый конденсатор (антенна), C_0 — эквивалентная емкость эпидермиса и подкожных тканей, C_k — емкость ткани исследуемого органа.

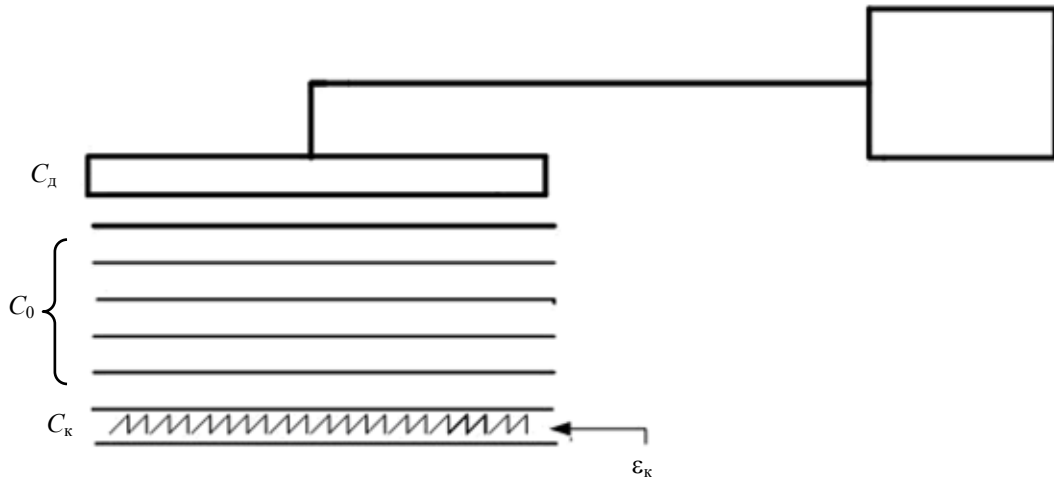


Рис. 1

Оценку влияния исследуемой области на изменение частоты генератора можно провести следующим образом:

$$\omega \sim \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow \frac{\delta C^*}{C^*} \approx \frac{\delta \omega}{\omega}.$$

Устройство для диагностики ФАКТ. Структурная схема измерительного комплекса для ближнепольного ВЧ-зондирования [9] представлена на рис. 2.

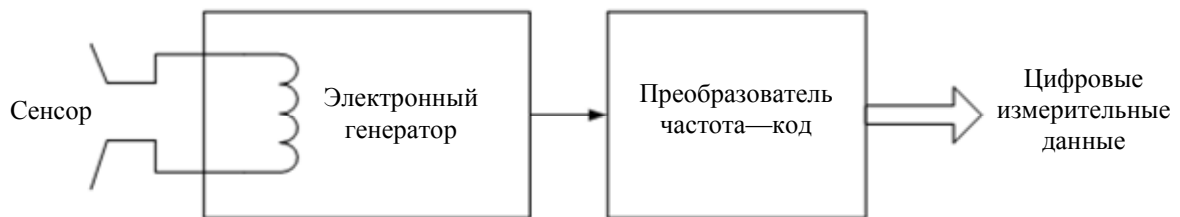


Рис. 2

Чувствительным элементом комплекса, как уже было отмечено, является сенсор, который может рассматриваться как антенна. В ближней зоне поля антенны электрическая составляющая проникающего электромагнитного поля сенсора изменяется под воздействием ориентационной поляризации молекул и ионов биологической среды, изменяется импеданс сенсора. Так как сенсор является частью колебательного контура генератора, то это приводит к изменению частоты колебаний сигнала этого генератора. Частота сигнала генератора находится в интервале 3—4 МГц. Мощность электромагнитного поля сенсора менее 0,1 мкВт, что можно сравнить с фоновым воздействием внешней среды. Изменение частоты несет информацию об электрической реакции биологической среды, а значит и о процессах в ней. После преобразования сигнала в цифровой код программно реализуются необходимые алгоритмы обработки и анализа измерительных данных.

Таким образом, при использовании метода ближнепольного ВЧ-зондирования информация о функциональной активности биологических тканей содержится в значении частоты генератора ВЧ. Причем, если эквивалентная емкость сенсора увеличивается, то в исследуемой области возрастает электрическая, а значит и функциональная, активность биологической ткани за счет увеличения ее диэлектрической проницаемости, что приводит к снижению частоты генератора. Соответственно если функциональная активность биологической ткани уменьшается, то частота генератора возрастает.

Результаты экспериментальных исследований. С помощью рассмотренного выше измерительного комплекса проведены экспериментальные исследования, которые в определенном смысле можно рассматривать как этап апробации физико-биологических основ его работы.

На рис. 3, а сопоставлены между собой взятые из ГОСТ значения диэлектрической проницаемости (ϵ) некоторых жидкостей: гипертонический, физиологический растворы, растворы некоторых органических веществ в воде (обозначены цифрами) с показаниями измерительного комплекса (цифры со штрихом).

На рис. 3, б представлены результаты исследования глубины проникновения поля датчика в биологическую ткань. В качестве тестовой биологической ткани было выбрано свиное мясо, наиболее близкое по биологическим параметрам к мышечным тканям человека. Мясо было разрезано на плоские куски, площадь которых в несколько раз превышала площадь чувствительного элемента измерительного датчика, толщина (x) каждого отдельного куска составляла 3 мм.

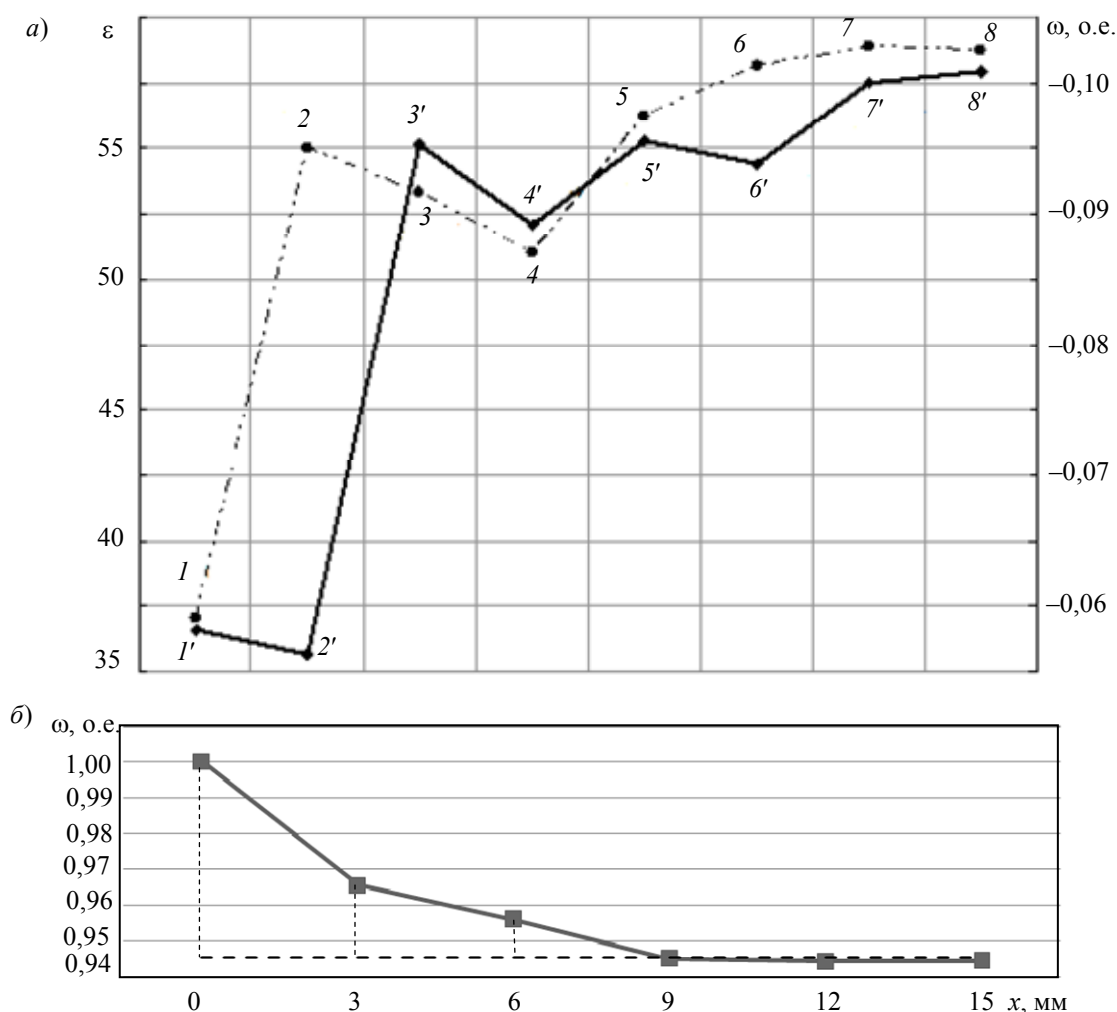


Рис. 3

Проанализировав эти результаты, можно говорить о том, что разработанный измерительный комплекс позволяет корректно фиксировать электрическую активность исследуемых объектов. В случае регистрации тех же параметров от биотканей органов, находящихся под кожей на глубине в несколько сантиметров (с учетом результатов рис. 3, б), оценка их функциональной (электрической) активности может быть произведена с учетом схемы, приведенной на рис. 1.

Определялся уровень ФАКТ области ростковых зон (РЗ) костей конечностей у детей и подростков [9]. Пациенты отбирались по клиническим признакам как условно здоровые, т.е. не имеющие явно выраженных проблем в опорно-двигательном аппарате. Всего было обследовано 250 человек (в возрасте от 4 до 17 лет).

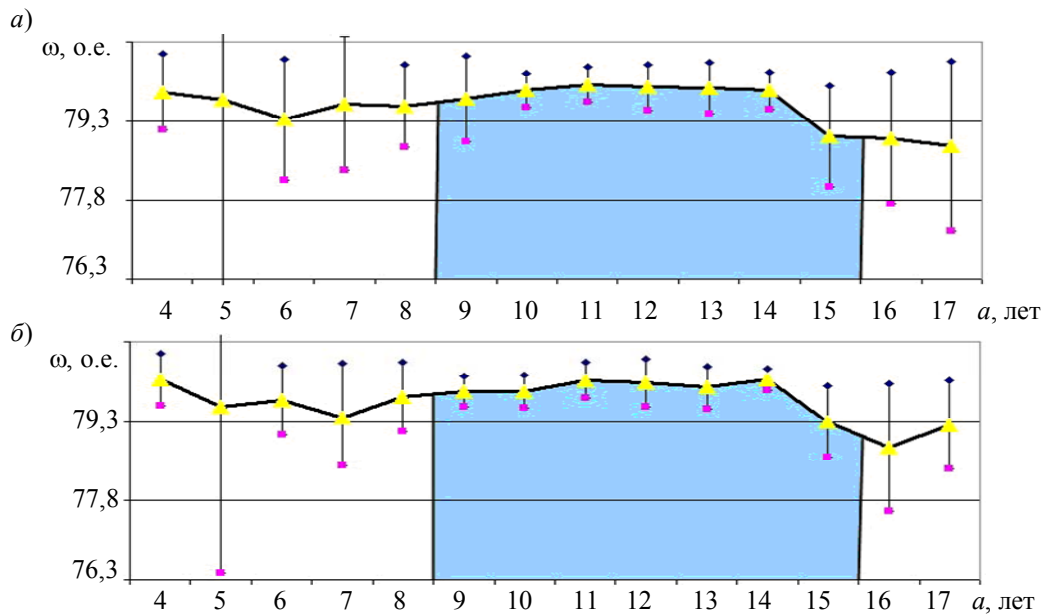


Рис. 4

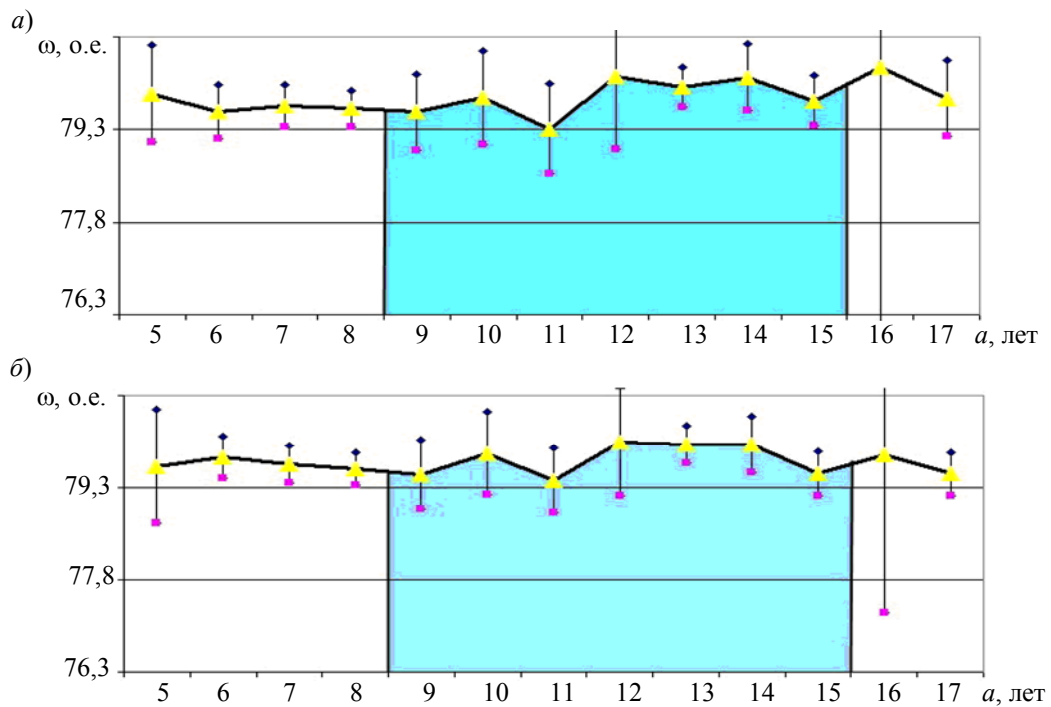


Рис. 5

На рис. 4 и 5 представлены результаты клинических обследований детей на базе Восстановительного центра детской ортопедии и травматологии „Огонек“, проведенных с помощью измерительного комплекса. Графики отражают относительный уровень активности РЗ костей мальчиков (рис. 4) и девочек (рис. 5) различных возрастных групп (*a* — правая, *б* — левая нога). В таблице приведены сведения о распределении пациентов по возрасту и половой принадлежности.

Возраст, лет	Количество мальчиков	Количество девочек
4	5	1
5	2	4
6	6	12
7	4	8
8	7	10
9	11	6
10	15	5
11	14	17
12	13	8
13	12	9
14	27	9
15	17	9
16	6	2
17	6	5

Заключение. Целью проведенных обследований было определение так называемой нормы ФАКТ, получаемой от РЗ костей в разных возрастных группах детей.

Полученные результаты показали, что рассматриваемый метод регистрации, в данном случае ФАКТ области РЗ, дает информацию, которая соответствует общим физиологическим данным нормальных темпов роста у детей и подростков, а именно: наибольшая активность РЗ (рост и формирование скелета) у мальчиков и девочек наблюдается в возрастном интервале от 9 до 15 лет (см. рис. 4 и 5). У мальчиков область активности в указанном интервале выражена более явно. У девочек изменения в уровне активности интервале 11—15 лет по сравнению с мальчиками могут быть объяснены перестройкой их организма в этот период.

В дальнейшем предполагается продолжить работу по определению функциональной активности как РЗ, так и других важных тканей и органов человека с целью создания метода скрининг-диагностики и новых медицинских технологий по лечению широкого круга заболеваний человеческого организма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анохин П. К. Философские аспекты теории функциональной системы: Избранные труды. М.: Наука, 1978. 400 с.
2. Вельтищев Ю. Е. Рост ребенка: закономерности, отклонения, патология и превентивная терапия: Лекция № 12. М.: Московский НИИ протезирования и детской хирургии МЗ РФ, 1994. 74 с.
3. Гилберт С. Биология развития. М.: Мир, 1995. 352 с.
4. Старкова Н. Т. Клиническая эндокринология: Руководство. СПб: Питер, 2002. 566 с.
5. Электрическая система регуляции процессов жизнедеятельности / Под ред. Г. Н. Зацепиной. М.: Изд-во МГУ, 1992. 160 с.
6. Самойлов В. О. Медицинская биофизика. СПб: Спец. лит., 2007. 560 с.
7. Браун В. Диэлектрики. М.: ИЛ, 1961. 327 с.
8. Медведев В. П., Куликов А. М. Подростковая медицина. СПб: Спец. лит., 1999. 731 с.
9. Балошин Ю. А., Сорокин А. А., Арсеньев А. В., Дудин М. Г. Пат. „Способ диагностики функциональной активности РЗ костей у детей и подростков и устройство для его осуществления“. Положит. реш. от 17.06. 2010 г.

Сведения об авторах

- Юрий Александрович Балашин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики
- Анатолий Александрович Сорокин** — канд. техн. наук, доцент; Балтийский государственный технический университет „Военмех“, кафедра радиоэлектронных систем управления, Санкт-Петербург; E-mail: an_sor@mail.ru
- Алексей Валентинович Арсеньев** — канд. мед. наук; СПб ГУЗ Восстановительный центр детской ортопедии и травматологии „Огонек“; заведующий IV клиническим отделением; E-mail: stivamat@rambler.ru
- Михаил Георгиевич Дудин** — д-р мед. наук, профессор; СПб ГУЗ Восстановительный центр детской ортопедии и травматологии „Огонек“, кафедра детской ортопедии и травматологии; главный врач; E-mail: dudin@admiral.ru
- Александр Николаевич Волченко** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики; E-mail: wolf2684@mail.ru

Рекомендована кафедрой физики

Поступила в редакцию 03.09.10 г.

УДК 621.391

В. В. СЕВАСТЬЯНОВ, Э. К. КАЗИМИРОВ
**МНОГОКАНАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО
ДЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ОРГАНЫ И ТКАНИ ГРУППЫ ПАЦИЕНТОВ**

Разработано устройство для использования в развернутых госпиталях при массовых поражениях людей в случае различных чрезвычайных ситуаций (для снятия болевых синдромов, предупреждения шоковых состояний, быстрой регенерации костной и мышечной ткани, для регенерации микрососудов, при острых нарушениях мозгового кровообращения).

Ключевые слова: *пациент, органы, ткани, стимуляция, задающий генератор, формирователь импульсов, система индивидуальных адаптеров.*

Введение. Ранее авторами были разработаны устройства, предназначенные для применения в специализированных медицинских центрах, санаториях неврологического, нейрохирургического и травматологического профилей [1—4]. Устройства относятся к области биомедицинской техники, связанной с электровоздействием на органы, ткани и молочные железы человека и животных.

Специфические функциональные свойства нервной системы и управляемой ею мышечной системы теснейшим образом связаны с генерацией и передачей естественных электрических потенциалов, а также специфической чувствительностью дендритов и аксонов нейронов центральной нервной системы к таким воздействиям. Этим обусловлена принципиальная возможность применения искусственных электрических сигналов для управления информационно-энергетическими функциями и регенеративно-трофическими процессами в нервной и мышечной системах организма. Метод востребован в большинстве областей клинической медицины, включая восстановление сенсорных функций, лечение болевых синдромов, нейроэлектростимуляционное протезирование, подавление эпилептогенеза и дискинетических расстройств. Важным преимуществом метода является отсутствие побочных явлений,

свойственных нейрофармакологически активным лекарственным препаратам. Не менее важным фактором являются возможность индивидуального амбулаторного и клинического применения, а также невысокая стоимость по сравнению с современной фармакотерапией и традиционной реабилитацией.

Используемые в медицине различные устройства для воздействия импульсов тока на органы и ткани вырабатывают непрерывный выходной сигнал или последовательность импульсов заданной формы и длительности, параметры которых изменяются по определенным законам. Например, в устройстве „Аппарат для генерирования положительных и отрицательных импульсов, используемых для лечения живого организма“, защищенном патентом США № 3946745 (1976 г.), разнополярные импульсы вырабатываются задающим генератором, а затем раздельно формируются выходными каскадами.

В устройствах для электровоздействия на организм, защищенных патентами ФРГ № 1539722 (1972 г.), 1589503 (1973 г.), 2049595 (1973 г.) и 2147704 (1972 г.), полярность выходного сигнала изменяется автоматически. В устройстве „Аппарат для возбуждения мышцы импульсами“, защищенном патентом Франции № 2242996 (1975 г.), применяются пачки импульсов с плавным нарастанием амплитуды. Однако реализация данного режима усложнена предложенным схемным решением. От рассмотренных аппаратов выгодно отличается „Чрезкожный стимулятор“ (патент Франции № 213891, 1974 г.), в котором для избирательного электровоздействия на заданные живые структуры используются последовательности сигналов с определенным частотным спектром.

Известно, что афферентную импульсацию с рецепторов тканей можно получить при раздражении их электрическим током, который при определенных условиях является универсальным раздражителем нервной и мышечной ткани. Известные устройства воздействия импульсов тока на живые органы и ткани предназначены для одновременного обслуживания только одного пациента, при обслуживании нескольких пациентов с помощью одного аппарата необходимо учитывать индивидуальные характеристики их организмов. Устройство должно вырабатывать сигнал, структура которого позволяет адаптировать воздействие для различных по физиологическому состоянию пациентов. Ниже приводится описание устройства для лечебного воздействия, обладающее подобными свойствами.

На рис. 1 приведена структурная схема многоканального устройства для воздействия импульсов тока на органы и ткани пациентов.

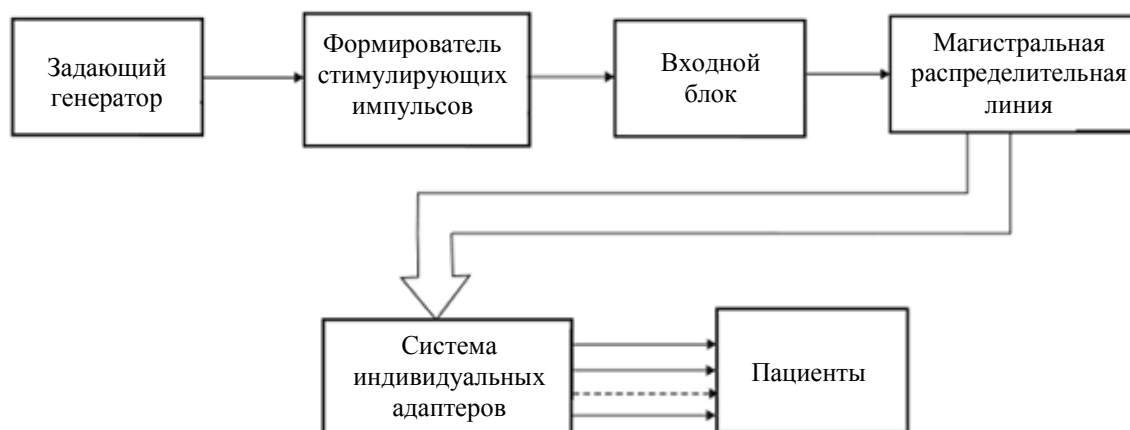


Рис. 1

Задающий генератор вырабатывает последовательность импульсных сигналов. Формирователь стимулирующих импульсов обеспечивает модуляцию импульсов генератора по длительности, частоте следования и амплитуде, а также определяет форму этих импульсов. Выработанная последовательность импульсов управляется формирователем периодов возбуждения и пауз, в таком виде она подается на блок изменения полярности стимулирующих

импульсов, которым управляет устройство автоматического изменения полярности импульсов. Структура формирователя стимулирующих импульсов приведена на рис. 2.

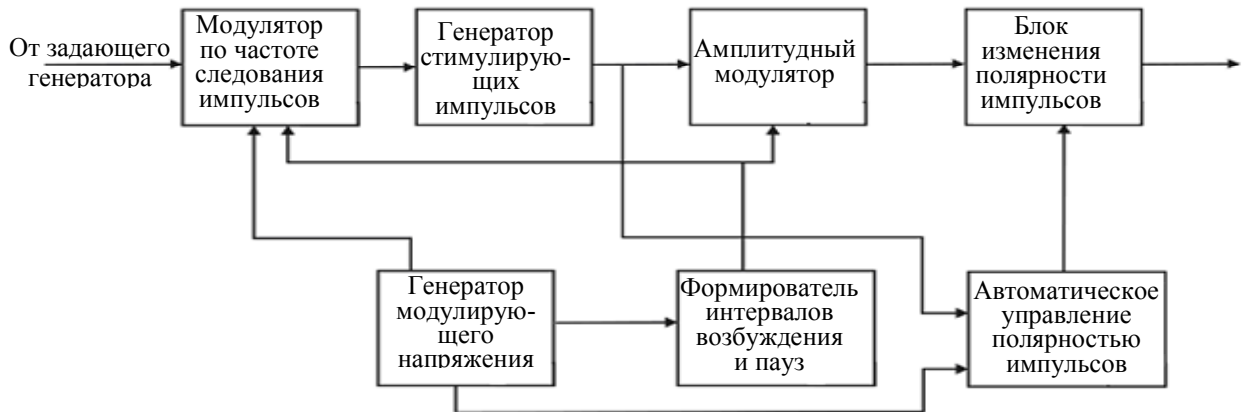


Рис. 2

Выходной блок представляет собой комбинацию двух усилителей однополярных импульсов, имеющих общую нагрузку и позволяющих получить выходной сигнал с изменяемой полярностью импульсов по заданному закону. Один из вариантов исполнения выходного блока и блока изменения полярности показан на рис. 3.

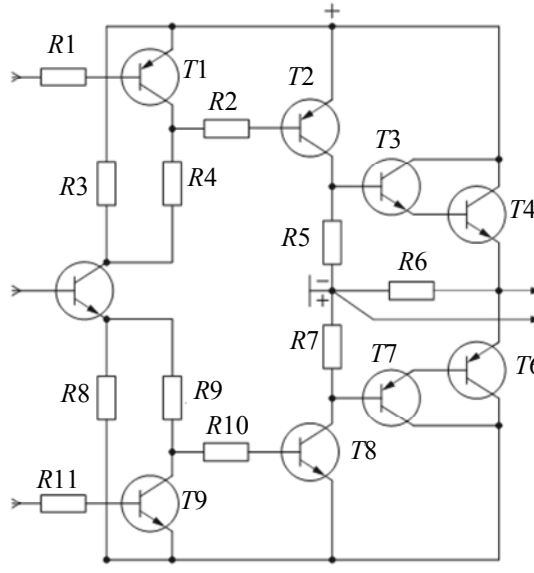


Рис. 3

Усилитель сигнала включает предварительный усилитель и связанный с ним эмиттерный повторитель, имеющие автономную шину питания. Эмиттерные повторители выполнены на составных транзисторах T_3, T_4 и T_6, T_7 соответственно. Предварительные усилители выполнены на транзисторах T_2, T_8 с нагрузками R_5, R_7 и базовыми резисторами R_2, R_{10} соответственно. Ключевые схемы содержат транзисторы T_1 и T_9 с нагрузками R_4, R_9 и базовыми резисторами R_1, R_{11} соответственно. На рис. 4 представлена структурная схема индивидуально адаптера.

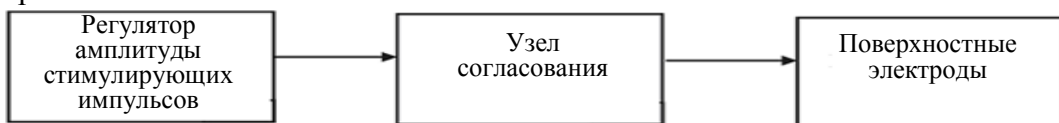


Рис. 4

Все адаптеры параллельно подключаются к отводам магистральной линии, связанной с выходным блоком. Для визуального контроля наличия входного сигнала каждый адаптер снабжен индикатором (светодиодом).

Описанное устройство реализует концепцию параллельного воздействия импульсов тока на группу (порядка ста) пациентов. Регулировка параметров выходного сигнала обеспечивает индивидуальный характер воздействия с учетом состояния отдельного пациента. Это достигается путем регулировки стимулирующего сигнала, осуществляемой в индивидуальном адаптере пациента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Севастьянов В. В., Казимиров Э. К. Электровоздействие как защитный фактор в искусственной и меняющейся среде обитания человека и животных // „Электростимуляция органов и тканей“. Тез. докл. 2-й Всесоюз. конф. с международным участием. Киев, 1979. С. 235—237.
2. Севастьянов В. В., Казимиров Э. К., Светлаков А. В. К вопросу об электростимуляционной аппаратуре для массового обслуживания // Тез. докл. Республиканской науч. конф. „Актуальные проблемы электростимуляции“. Киев, 1983. С. 68—70.
3. А. с. 730356. Способ стимуляции скелетной мускулатуры. Приоритет изобретения 1974 г. Заявл. 07.01.1980 г., опубл. 30.04.1980 г. Бюл. № 16.
4. Севастьянов В. В., Казимиров Э. К. Длительная многоканальная электростимуляция — эффективный метод реабилитации инкурабельных больных на дому // Reabilitacijos metodu ir priemoniu efektyvumas: lietuvos reabilitologu asociacijos konferencijos medžiaga. Birštonas, 2002. P. 25—26.

Сведения об авторах

- Виктор Викторович Севастьянов** — д-р мед. наук, профессор; Марийский государственный технический университет, кафедра радиотехнических и медико-биологических систем, Йошкар-Ола; E-mail: cpr@mari-el.ru
- Эдуард Константинович Казимиров** — Марийский государственный технический университет, кафедра радиотехнических и медико-биологических систем, Йошкар-Ола; радиоинженер; E-mail: cpr@mari-el.ru

Рекомендована кафедрой
радиотехнических и
медико-биологических систем

Поступила в редакцию
09.06.10 г.

УДК 621.396:681.323

С. И. ЗИАТДИНОВ

ДИСКРЕТНЫЕ АЛГОРИТМЫ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ СГЛАЖИВАНИЕМ ОТСЧЕТОВ ВХОДНОГО СИГНАЛА

Рассмотрены цифровые дифференцирующие фильтры. Показано, что с ростом порядка фильтра резко увеличивается дисперсия шумов квантования. Исследована возможность промежуточного суммирования отсчетов входного сигнала с целью снижения влияния шумов квантования на ошибки вычисления производной.

Ключевые слова: дискретизация сигнала, промежуточное суммирование, алгоритм дифференцирования.

Общие положения. Задача дифференцирования импульсных последовательностей достаточно часто возникает при построении измерителей линейных и угловых скоростей движения объекта. В работе „Микропроцессорные системы...“ [см. лит.] рассмотрен вопрос дифференцирования цифровой последовательности $g[n]$, являющейся результатом квантова-

ния по уровню и дискретизации по времени с периодом T непрерывной функции времени $g(t)$. В ней был разработан следующий алгоритм для вычисления первой производной

$$\dot{g}[n] = T^{-1} \sum_{i=0}^m a_i g[n-i], \quad (1)$$

где весовые коэффициенты

$$a_i = (-1)^i \sum_{l=1}^m \frac{1}{l!} C_l^i,$$

C_l^i — биномиальные коэффициенты, причем $C_l^i = 0$, если $i > k$.

Частотная передаточная функция дифференцирующего фильтра с алгоритмом (1) определяется следующим соотношением:

$$K_M(j\omega) = T^{-1} \sum_{i=0}^m a_i e^{-j\omega iT},$$

ей соответствует амплитудно-частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики

$$K_M(\omega) = T^{-1} \sqrt{\left(\sum_{i=0}^m a_i \cos \omega iT \right)^2 + \left(\sum_{i=0}^m a_i \sin \omega iT \right)^2},$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{i=0}^m a_i \sin \omega iT}{\sum_{i=0}^m a_i \cos \omega iT}.$$

Относительное отклонение АЧХ рассматриваемого дифференцирующего фильтра от частотной характеристики идеального дифференциатора с АЧХ вида $K(\omega) = \omega$ можно определить с помощью выражения

$$\Delta = \frac{K(\omega) - K_M(\omega)}{K(\omega)} = \frac{\Delta K(\omega)}{K(\omega)}.$$

В табл. 1 представлены результаты расчетов зависимости абсолютной величины относительной ошибки $|\Delta|$ от частоты $f = \omega / 2\pi$ гармонического входного сигнала для дифференцирующих фильтров различных порядков при периоде дискретизации $T=0,001$ с.

Таблица 1

$f, \text{Гц}$	$ \Delta , \%$					
	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$
20	0,066	0,52	$0,75 \cdot 10^{-2}$	$0,49 \cdot 10^{-3}$	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,53 \cdot 10^{-4}$
40	0,26	2,06	0,12	0,072	$0,85 \cdot 10^{-2}$	$0,28 \cdot 10^{-2}$
60	0,59	4,51	0,58	0,32	0,089	0,022
80	1,05	7,74	1,78	0,82	0,45	0,054
100	1,64	11,6	4,14	1,43	1,47	0,058

В табл. 2 представлены результаты расчетов абсолютной величины отклонения ФЧХ рассматриваемых фильтров от ФЧХ идеального дифференциатора.

Таблица 2

$f, \text{Гц}$	$ \Delta\varphi , \dots^\circ$					
	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$
20	3,6	0,0282	0,028	$5,92 \cdot 10^{-4}$	$2,87 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$
40	7,2	0,2205	0,2153	0,0184	0,0081	0,0012
60	10,8	0,7171	0,6754	0,1334	0,0489	0,0189
80	14,4	1,6189	1,4310	0,5262	0,1387	0,12
100	18	2,9896	2,3813	1,4726	0,1961	0,4552

Проанализировав представленные данные, можно сделать следующие выводы. С ростом порядка дифференцирующего фильтра отклонение его АЧХ от АЧХ идеального дифференциатора резко уменьшается. Так, относительная ошибка $|\Delta| < 0,1\%$ при $T=0,001$ с для фильтра первого порядка обеспечивается на частоте меньше 30 Гц; третьего — меньше 40 Гц; четвертого — меньше 45 Гц; пятого — меньше 60 Гц; шестого — меньше 120 Гц. Вместе с тем дифференцирующий фильтр второго порядка имеет гораздо худшие амплитудно-частотные характеристики даже по сравнению с фильтром первого порядка. Аналогичное происходит с фильтром третьего порядка при частоте входного сигнала выше 60 Гц.

Из данных табл. 2 следует, что с ростом порядка дифференцирующего фильтра происходит резкое уменьшение фазовой ошибки.

Методические ошибки дифференцирования. Среднеквадратическая ошибка определения производной случайного стационарного сигнала в дискретные моменты времени может быть найдена как математическое ожидание квадрата разности между значением производной и вычисленным с помощью выражения (1) значением [1]:

$$\sigma^2 = M \left\{ \left(\dot{g}[n] - T^{-1} \sum_{i=0}^m a_i g[n-i] \right)^2 \right\} = -\ddot{R}(0) - 2T^{-1} \sum_{i=0}^m a_i \dot{R}[iT] + T^{-2} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m a_i a_j R[i-j], \quad (2)$$

где $R(\tau)$ — корреляционная функция сигнала $g(t)$; $\ddot{R}(\tau)$ — корреляционная функция производной сигнала $\dot{g}(t)$; $\dot{R}(\tau)$ — взаимная корреляционная функция сигнала и его производной. При этом относительная среднеквадратичная ошибка дифференцирования

$$\Delta = \sigma / \sigma_{\dot{g}}. \quad (3)$$

Соотношения (2) и (3) позволяют находить необходимое значение m при заданном периоде дискретности T или выбирать период дискретности по заданному значению методической ошибки и порядку дифференцирующего фильтра.

На практике весьма важен случай дифференцирования входного сигнала гармонического вида

$$g(t) = A \sin(\beta t + \psi)$$

с амплитудой A , круговой частотой β и с равномерно распределенной на интервале случайной фазой ψ . Для данного сигнала

$$\begin{aligned} \sigma_g^2 &= 0,5A^2; \quad \sigma_{\dot{g}}^2 = 0,5\beta^2 A^2; \quad K(\tau) = 0,5A^2 \cos \beta\tau; \\ \dot{R}(\tau) &= -0,5\beta A^2 \sin \beta\tau; \quad \ddot{R}(\tau) = -0,5\beta^2 A^2 \cos \beta\tau. \end{aligned} \quad (4)$$

Результаты расчетов относительной среднеквадратичной ошибки с использованием соотношений (2)—(4) при $T = 10^{-3}$ с для различных значений частоты входного сигнала $f = \beta/2\pi$ и порядка дифференцирующего фильтра m представлены в табл. 3.

Таблица 3

$f, \text{ Гц}$	$\Delta, \%$					
	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$
20	6,28	0,53	0,049	0,005	$5,18 \cdot 10^{-4}$	—
40	12,54	2,11	0,394	0,079	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$0,35 \cdot 10^{-2}$
60	18,77	4,69	1,32	0,395	0,123	$3,96 \cdot 10^{-6}$
80	22,96	8,28	3,08	1,23	0,508	0,216
100	31,07	12,81	5,93	2,93	1,51	0,796

Анализ полученных данных показывает, что относительная среднеквадратичная ошибка дифференцирования $\Delta \leq 0,1\%$ может быть получена для фильтра первого порядка при частоте входного сигнала $f < 3$ Гц, второго — при $f < 10$ Гц, третьего — при $f < 30$ Гц, четвертого — при $f < 45$ Гц, пятого — при $f < 60$ Гц, шестого — при $f < 120$ Гц.

Очевидно, что при одной и той же ошибке дифференцирования фильтрам различного порядка будет соответствовать различный период дискретизации входного сигнала. В табл. 4 приведены значения периода дискретизации для фильтров различного порядка, при которых ошибка дифференцирования $\Delta \leq 0,1\%$ при $\beta = 1$ рад/с.

Таблица 4

m	1	2	3	4	5	6
$T, \text{мс}$	2,1	54,8	159	266,7	361,4	441

Влияние шумов квантования. Квантование по уровню приводит к появлению дополнительных случайных ошибок, которые в большинстве случаев представляются дискретным белым шумом, имеющим равномерное распределение и дисперсию $D_k = \delta^2 / 12$, где δ — цена единицы младшего разряда.

При этом в случае вычисления первой производной, согласно выражению (1), суммарная дисперсия ошибки квантования будет равна

$$D_k = T^{-2} \delta^2 \sum_{i=0}^m a_i^2 / 12 = T^{-2} \delta^2 F(m).$$

Значения функции $F(m)$ и среднеквадратичной ошибки квантования σ_k , отнесенной к величине δ/T , при различном порядке дифференцирующего фильтра приведены в табл. 5.

Таблица 5

m	1	2	3	4	5	6
$F(m)$	2	6,5	14,7	31	68	160
$\sigma_k T/\delta$	0,407	0,738	1,11	1,61	2,38	3,66

Из представленных данных видно, что рост порядка фильтра приводит к резкому увеличению результирующей ошибки квантования.

Рассмотрим вопрос компенсации роста случайной ошибки, вызванной квантованием, путем дополнительного суммирования (сглаживания) отсчетов входного сигнала дифференцирующего фильтра. Пусть на вход дифференцирующего фильтра с периодом T поступает непрерывная последовательность отсчетов входного сигнала $g[n]$. С помощью сумматора осуществляется текущее суммирование k отсчетов входного сигнала $g[n]$, $g[n-1]$, ..., $g[n-(k-1)]$ и формируются промежуточные суммы

$$g_\Sigma[n] = \sum_{i=0}^{k-1} g[n-i]. \tag{5}$$

Промежуточные суммы (5) далее с периодом $T_\Sigma = LT$ ($L \geq k$) поступают в дискретный дифференцирующий фильтр, алгоритм работы которого определяется соотношением (1). В результате выражение, соответствующее алгоритму работы рассматриваемого дифференцирующего фильтра, можно записать следующим образом:

$$\dot{g}[n] = T_\Sigma^{-1} k^{-1} \sum_{i=0}^m a_i \sum_{j=0}^{k-1} g[n-(Li+j)].$$

Проанализируем влияние числа суммируемых отсчетов k на ошибки вычисления производной $\dot{g}[n]$ входной последовательности $g[n]$. При этом среднеквадратичная ошибка вычисления первой производной находится из соотношения

$$\sigma^2 = M \left\{ \left(\dot{g}[n] = T_\Sigma^{-1} k^{-1} \sum_{i=0}^m a_i \sum_{j=0}^{k-1} g[n-(Li+j)] \right)^2 \right\} =$$

$$= -\ddot{R}(0) - 2T_\Sigma^{-1} \dot{g}[n] = T_\Sigma^{-1} k^{-1} \sum_{i=0}^m a_i \sum_{j=0}^{k-1} \dot{R}[Li+j] + T_\Sigma^{-2} \sum_{i=0}^m \sum_{p=0}^m a_i a_p \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{c=0}^{k-1} R[L(i-p) + (j-c)]. \tag{6}$$

Для компенсации увеличивающихся с ростом порядка дифференцирующего фильтра ошибок квантования необходимо формировать промежуточные суммы из $k \geq F(m)$ отсчетов входного сигнала. При этом возникает дополнительная методическая ошибка $\Delta_{\text{доп}}$, которую в дальнейшем положим равной, например, $\Delta_{\text{доп}} = \Delta$. Данное требование можно выполнить правильным выбором периода дискретности T взятия дополнительных отсчетов при сохранении основного периода дискретности $T_{\Sigma} = LT$.

Основной период дискретности T_{Σ} определяется заданной величиной методической ошибки и для $\Delta \leq 0,1\%$, $\beta = 1$ рад/с находится из табл. 4.

Результаты расчетов по формуле (6) периода дискретности T взятия дополнительных отсчетов при $\Delta_{\text{доп}} = \Delta = 0,1\%$ и $\beta = 1$ рад/с с учетом данных табл. 4 приведены в табл. 6.

Таблица 6

m	1	2	3	4	5	6
k	2	6,5	14,7	31	68	160
T_{Σ} , мс	2,1	54,8	159	266,7	361,4	441
T , мс	1,95	0,56	0,425	0,145	0,035	0,0135

Из полученных данных следует, что в случае использования фильтров высокого порядка для снижения уровня шумов, вызванных квантованием, необходимо брать большое количество дополнительных отсчетов входного сигнала. Это приводит к резкому увеличению методической ошибки дифференцирования.

Выводы

1. Использование дифференцирующих фильтров высокого порядка приводит к резкому росту ошибок, связанных с шумами квантования.

2. Промежуточное суммирование отсчетов входного сигнала позволяет снизить влияние шумов квантования на ошибки вычисления производной.

ЛИТЕРАТУРА

Микропроцессорные системы автоматического управления / Под ред. В. А. Бесекерского. Л.: Машиностроение, 1988. 365 с.

Сведения об авторе

Сергей Ильич Зиатдинов

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий; E-mail: kaf53@GUAP.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-сетевых технологий

Поступила в редакцию
29.09.10 г.

В. Г. ГАЛАЛУ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ КОД—НАПРЯЖЕНИЕ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ

Предложена структура преобразователя код—напряжение (ПКН) с суммированием равных токов на аттенюаторе лестничного типа, которая может применяться в цепи обратной связи цифровых вольтметров повышенной точности. Приведены результаты экспериментального исследования ПКН на четыре десятичных разряда с относительной погрешностью менее 0,01 %.

Ключевые слова: аттенюатор лестничного типа, генератор тока, делитель напряжения.

Современные цифровые вольтметры (ЦВ) с ручным и автоматическим выбором пределов измерения имеют до 12 диапазонов измерения с перекрытием в 2—3—10 раз, например, 1, 3, 10, 30 или 1, 2, 5, 10 В. Для измерения напряжения меньше 1 В исследуемые сигналы усиливают при помощи измерительных усилителей, а большие — ослабляют с помощью делителей. Чаще всего порог срабатывания компараторов составляет 10—20 мкВ, в связи с чем для обеспечения требуемой разрядности ЦВ диапазон выходных напряжений преобразователя код—напряжение (ПКН) должен составлять 0—999,9, 0—1999,9 или 0—2999,9 мВ. Рассмотрим возможности создания двоично-десятичного ПКН с диапазоном выходных напряжений 0—999,9 мВ.

Основными требованиями к таким ПКН можно считать следующие: возможность гибридного или микроэлектронного исполнения, технологичность производства, значения сопротивления резисторов в диапазоне 1—100 кОм, минимум подгоняемых резисторов, малая потребляемая мощность и т.п. Наиболее полно перечисленным требованиям отвечают двоично-десятичные ПКН с суммированием равных токов на аттенюаторе лестничного типа. Теория двоичных ПКН такого типа хорошо разработана [1, 2]. Например, для одной декады ЦВ, работающей в коде 8-4-2-1, можно использовать аттенюатор $R—2R$ (рис. 1).

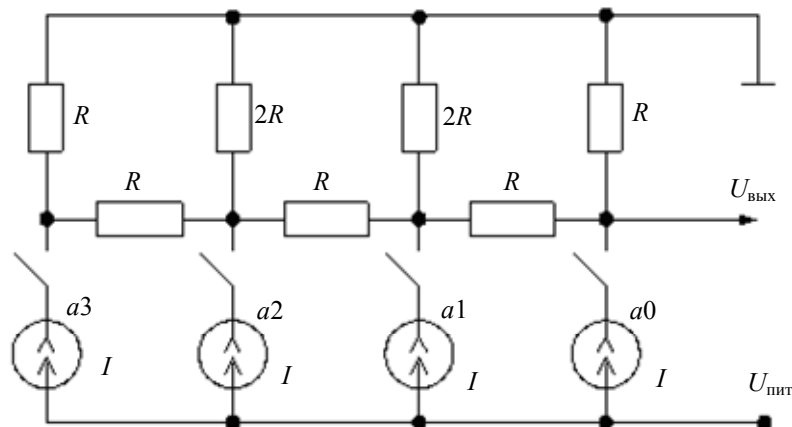


Рис. 1

Нагрузка каждого генератора тока (см. рис. 1) равна $2/3R$, и максимальное выходное напряжение составит:

$$U_m = \frac{2}{3}RI \left(a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot \frac{1}{2} + a_2 \cdot \frac{1}{4} + a_3 \cdot \frac{1}{8} \right). \quad (1)$$

Для выходного напряжения 0—999,9 мВ весовые коэффициенты старшей декады должны составлять 800, 400, 200 и 100 мВ, для более младшей декады — 80, 40, 20 и 10 мВ и т.д.

На рис. 2 представлена схема аттенюатора для двоично-десятичного ПКН на 4 десятичных разряда. Для преобразования входного кода в напряжение генераторы равных и стабильных токов коммутируются на узловые точки 1—16 (старшая декада 1—4).

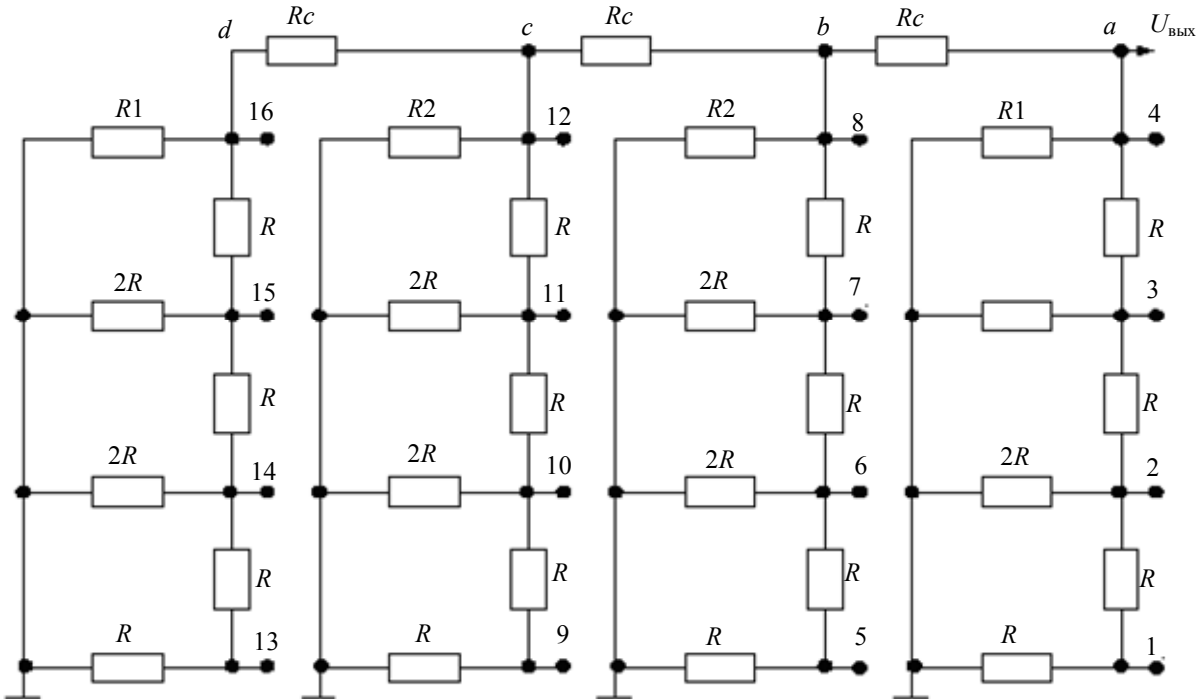


Рис. 2

Выходное напряжение для такого ПКН должно составлять:

$$U_m = \frac{2}{3} RI \left(a_4 \cdot 1 + a_3 \cdot \frac{1}{2} + a_2 \cdot \frac{1}{4} + a_1 \cdot \frac{1}{8} \right) + \frac{1}{10} \cdot \frac{2}{3} RI \left(a_8 \cdot 1 + a_7 \cdot \frac{1}{2} + a_6 \cdot \frac{1}{4} + a_5 \cdot \frac{1}{8} \right) + \frac{1}{100} \cdot \frac{2}{3} RI \left(a_{12} \cdot 1 + a_{11} \cdot \frac{1}{2} + a_{10} \cdot \frac{1}{4} + a_9 \cdot \frac{1}{8} \right) + \frac{1}{1000} \cdot \frac{2}{3} RI \left(a_{16} \cdot 1 + a_{15} \cdot \frac{1}{2} + a_{14} \cdot \frac{1}{4} + a_{13} \cdot \frac{1}{8} \right). \quad (2)$$

Цепочный делитель на 10 может быть реализован способом, представленным на рис. 3.

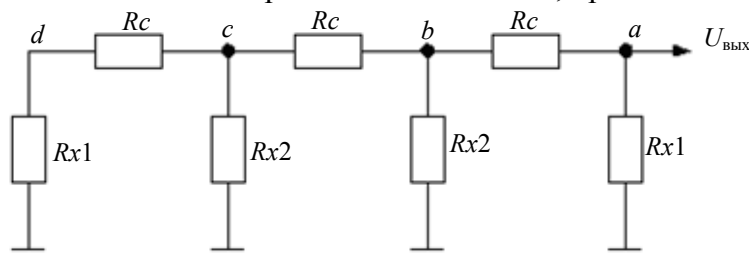


Рис. 3

Так как схема десятичного делителя связана с двоичными делителями декад, то резисторы R_{x1} и R_{x2} для обеспечения точного двоичного деления должны приближаться по номиналу к R и совместно с резисторами связи R_c обеспечивать сопротивления нагрузки, в каждой узловой точке равные $2/3R$. Для деления на 10 в точке a необходимо, чтобы выполнялось условие $R_c/R_{x1}=9$. Тогда эквивалентная схема для выходной ячейки делителя примет вид, представленный на рис. 4.

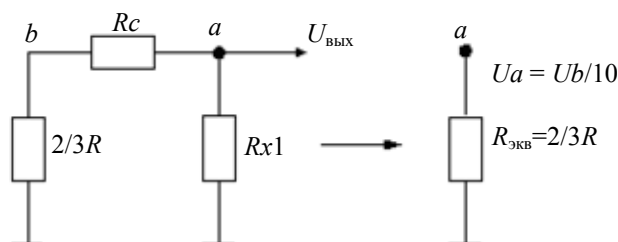


Рис. 4

$$R_{\text{экв}} = \frac{Rx1 \left(Rc + \frac{2}{3} R \right)}{Rx1 + Rc + \frac{2}{3} R} = \frac{2}{3} R. \quad (3)$$

Зная, что $Rx = Rc/9$, найдем Rc :

$$\frac{Rc}{9} \left(Rc + \frac{2}{3} R \right) = \frac{2}{3} R \left(\frac{Rc}{9} + Rc + \frac{2}{3} R \right). \quad (4)$$

Обозначим $x = Rc$ и получим следующее квадратное уравнение:

$$\frac{x^2}{9} + \frac{2}{3} Rx - \frac{2}{3} R \cdot \frac{10}{9} x - \frac{4}{9} R^2 = 0, \text{ или } x^2 - 6Rx - 4R^2 = 0, \quad (5)$$

отсюда

$$x = 3R \pm \sqrt{9R^2 + 4R^2} = 3R \pm R\sqrt{13}, \quad (6)$$

таким образом, $x = Rc = 6,605\ 55R$.

Расчетные значения резисторов $R1$ определяются из эквивалентной схемы, приведенной на рис. 5.

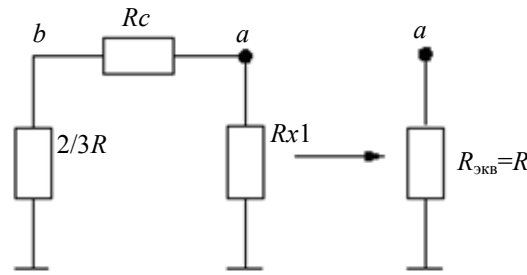


Рис. 5

$$R_{\text{экв}} = \frac{R1(Rc + 2/3R)/2}{R1 + (Rc + 2/3R)/2} = R. \quad (7)$$

При $Rc = 6,605\ 55R$ получим $R1 = 1,159\ 43R$.

Аналогичным образом можно получить значения резисторов $R2$ из рис. 6.

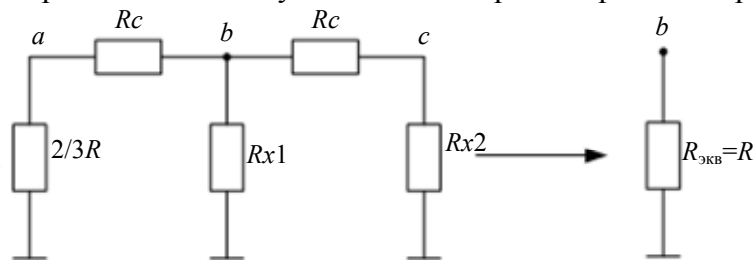


Рис. 6

$$R_{\text{экв}} = \frac{R2(Rc + 2/3R)/2}{R2 + (Rc + 2/3R)/2} = R. \quad (8)$$

При $Rc = 6,605\ 55R$ получим $R2 = 1,379\ 35R$.

Для проверки основных теоретических положений исследовался макет 16-разрядного двоично-десятичного ПКН (4 десятичных разряда) с выходным напряжением 0—999,9 мВ. В аттенуаторе использовались следующие резисторы: $R=2000$, $2R=4000$, $R1=1,159\ 43R = 2319$, $R2=1,379\ 35R=2759$, $Rc=6,605\ 55R=13\ 211$ Ом. Все резисторы были типа С2-29 или С2-31 класса 0,1 (0,2) и подбирались с абсолютной погрешностью ± 2 Ом.

Для формирования выходных напряжений использовались 4 прецизионных генератора тока, выполненные на полевых транзисторах КП305, операционных усилителях ОРА820 и источнике опорного напряжения REF 02 (5 В). Номинальный ток генераторов был равен 600 мкА, внутреннее сопротивление $R_i > 10$ МОм. При подключении одного генератора тока к узловым точкам 1—16 были получены следующие результаты.

Выход 4, мВ				Выход 16, мВ			
800,08	79,97	7,897	0,799	801,30	80,02	7,996	0,802
400,15	39,95	3,996	0,399	400,00	40,07	3,988	0,397
199,77	19,96	1,997	0,199	199,86	20,03	1,997	0,198
99,85	9,99	1,000	0,099	99,84	10,01	0,987	0,098

При одновременном подключении четырех генераторов к узловым точкам 1—4 или 13—16 формировались суммарные напряжения ($1500 \pm 0,2$) мВ с относительной погрешностью менее 0,01 %. Для прецизионных измерений использовался цифровой вольтметр-калибратор В1-18 с разрешающей способностью 1 мкВ. Схема симметрична, выходы 4 и 16 равноценны.

На основании полученных результатов могут быть сделаны следующие выводы.

1. Предложенная схема двоично-десятичного ПКН даже без подстройки генераторов тока обеспечивает требуемые двоичные и десятичные коэффициенты деления с относительной погрешностью менее $\pm 0,2$ %.

2. Сопротивления нагрузки для всех узловых точек были одинаковы и составляли $2/3R = (1333 \pm 2)$ Ом, для измерений использовался цифровой омметр Е 7-10 класса 0,01 %.

3. Получение других диапазонов выходных напряжений, например 0—1999,9 мВ или 0—2999,9 мВ, не вызывает проблем: для этого к узловым точкам 4 и 2 подключаются дополнительные генераторы 600 мкА, которые и смещают выходное напряжение на 1000 (2 генератора) или 2000 мВ (4 генератора).

Разработанная схема перспективна для построения ЦВ повышенной точности на 4—5 десятичных разрядов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
2. Галалу В. Г. Преобразователи код-напряжение с суммированием взвешенных токов на аттенуаторе лестничного типа // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53. № 1. С. 54—58.

Сведения об авторе

Валентин Гаврилович Галалу — канд. техн. наук, доцент; Таганрогский технологический институт Южного Федерального университета, кафедра автоматизированных систем научных исследований и экспериментов;
E-mail: asni@fep.tsure.ru

Рекомендована кафедрой
автоматизированных систем научных
исследований и экспериментов

Поступила в редакцию
06.08.07 г.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 536.8:621.384

И. А. Коняхин, А. Д. Мерсон, А. Н. Тимофеев

АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ ИНВАРИАНТОВ ДЛЯ АНАМОРФОТНЫХ КОНТРОЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ СКРУЧИВАНИЯ

Рассматриваются инварианты, позволяющие упростить методику расчета параметров оптико-электронной системы с анаморфотным контрольным элементом. Исследована зависимость чувствительности системы измерения угла скручивания от параметров анаморфирования.

Ключевые слова: проектные инварианты, анаморфотные контрольные элементы, оптико-электронные системы, деформации скручивания.

Многие задачи в производственной и научной деятельности предусматривают измерение специфической угловой координаты объекта — деформации скручивания. При этом под углом скручивания подразумевается поворот контролируемого объекта (блока или элемента конструкции) относительно линии, соединяющей объект и некоторый базовый пункт (оси скручивания).

Примером задачи на измерение угла скручивания является контроль углового положения блоков систем навигации, передачи референтного направления, определения деформаций натуральных образцов и моделей, скручивания осей, труб и цилиндрических опор.

Известные автоколлимационные системы для измерения угла скручивания с контрольными элементами в виде тетраэдрических призм формируют специальный световой пучок, распространяющийся под определенным углом к оси, что не позволяет их использовать в условиях малого (десятки миллиметров) светового диаметра трассы между контролируемым объектом и базовым пунктом, например, при размещении системы непосредственно внутри деформируемой цилиндрической опоры или вала [1]. Для измерения угла скручивания автоколлимационным методом в условиях узкой трассы были предложены анаморфотные контрольные элементы (КЭ) [1, 2]. При повороте контролируемого объекта вместе с анаморфотным КЭ изменяется форма изображения марки в плоскости анализа автоколлиматора. Параметры формы изображения определяются в результате микропроцессорной обработки видеокadra, сформированного матричным анализатором автоколлиматора, что позволяет найти величину угла скручивания.

Проблема проектирования таких измерительных систем обусловлена сложностью аналитического описания анаморфирования, в частности, неявным и нелинейным характером зависимости характеристик формы изображения от параметров КЭ и величины измеряемого угла скручивания. Для создания инженерной методики проектирования анаморфотных КЭ

необходимо разработать и исследовать проектные инварианты, под которыми понимаются расчетные выражения, аналитическая форма которых не изменяется при варьировании структуры КЭ и параметров анаморфирования.

Определим выражение для статической характеристики системы измерения скручивания с анаморфотным КЭ (рис. 1).

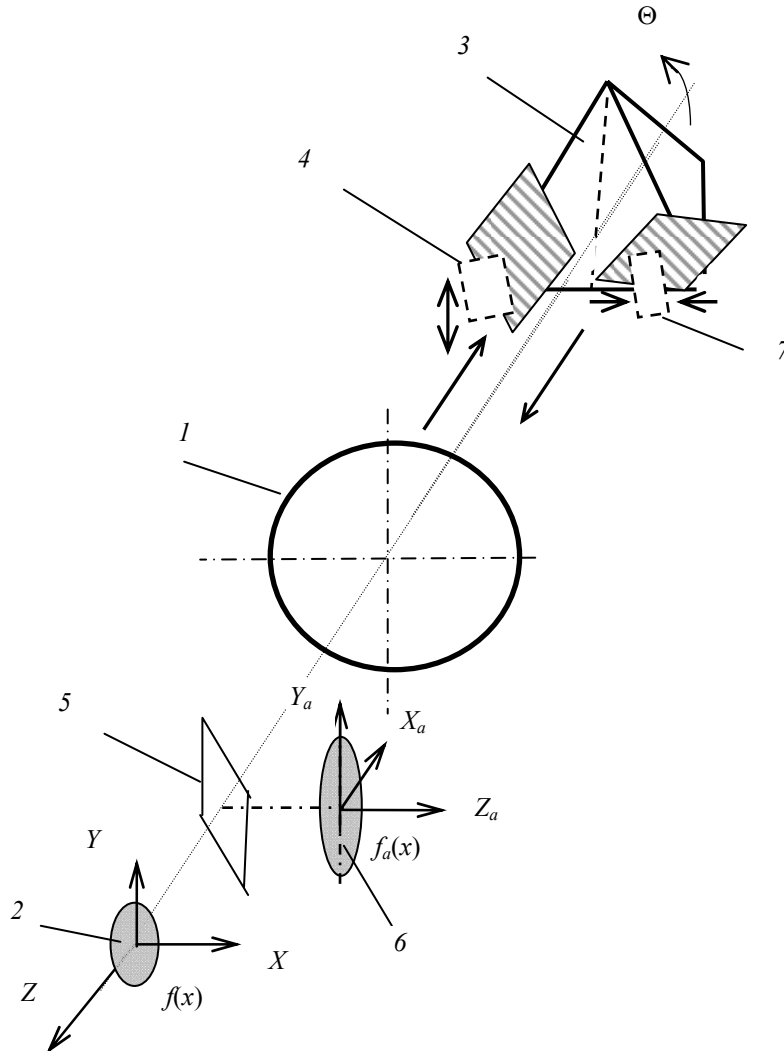


Рис. 1

Система включает автоколлиматор, установленный на базовом пункте, и отражатель, расположенный на контролируемом объекте. Объектив 1 автоколлиматора формирует излучение марки 2, расположенной в его фокальной плоскости, в параллельный пучок лучей, падающий на отражатель.

Отражатель включает ретрорефлектор 3, например, призму БКР-180° и КЭ, в наиболее простом варианте являющийся одиночной анаморфотной системой 4, выполненной в виде двух оптических клиньев [2—4] и расположенной на половине апертуры ретрорефлектора (компонент 7 полагаем отсутствующим). Пучок автоколлиматора после трансформации анаморфотным КЭ 4 и отражения от ретрорефлектора 3 формирует в фокальной плоскости приемного канала, образованного светоделителем 5, изображение марки 6, которое анализируется видеосистемой в составе матричного фотоприемника и обрабатывающего микропроцессора (на рисунке не показаны).

Под действием анаморфотной системы 4 изменяется расходимость (увеличивается или уменьшается) пучка в сечениях, параллельных некоторой плоскости, проходящей через ось пучка (так называемая плоскость анаморфирования, на рис. 1 заштрихована). Коэффициент

анаморфирования A численно равен отношению углов расходимости пучка после и до анаморфотной системы. Примем для рассматриваемой системы $A > 1$ (угол расходимости пучка увеличивается).

Пусть координаты y и x точек линии контура излучающей марки l связаны некоторой функцией $y = f(x)$ в системе координат XYZ , ось OZ которой совпадает с оптической осью объектива l (осью скручивания).

Координаты x_a, y_a точек контура изображения b марки в системе координат $X_a Y_a Z_a$, оси которой при условном совмещении фокальных плоскостей были бы сонаправлены осям системы XYZ , связаны функцией f_a , зависящей от исходной функции $f(x)$, коэффициента анаморфирования A и величины Θ поворота КЭ на угол скручивания:

$$y_a = f_a(x_a, \Theta) = f_a(f(x), A, \Theta). \quad (1)$$

После обработки видеокadra и определения координат x_a, y_a контура изображения марки в результате решения уравнения (1) находится угол Θ .

Для построения проектных инвариантов используем наиболее простую характеристику формы изображения марки, соответствующую линейному виду функции $f(x)$, описывающей какую-либо часть контура марки (марка может быть треугольной, четырехугольной, многоугольной формы). Тогда контур марки определяется отрезками прямой, заданной уравнением вида $y = kx + b$ (рис. 2).

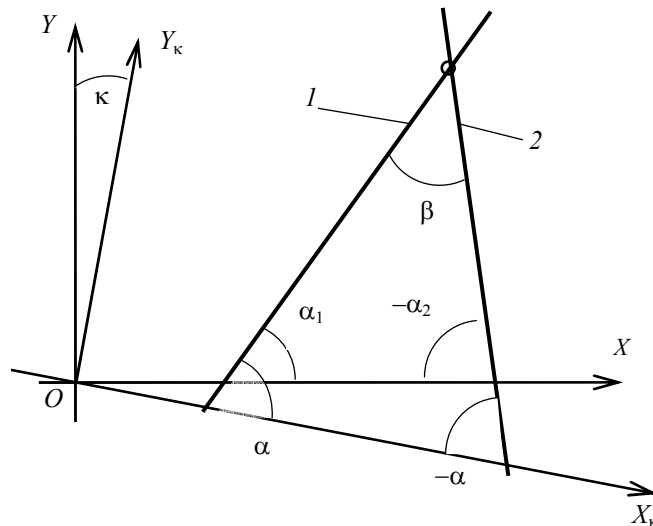


Рис. 2

Характеристикой формы марки является угол β между прямыми контура:

$$\beta = \arctg \left(\left| \frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 k_2} \right| \right) \quad (2)$$

или, при определенных условиях, разность Δk угловых коэффициентов прямых

$$\Delta k = k_1 - k_2, \quad (3)$$

где $k_1 = \operatorname{tg} \alpha_1$, $k_2 = \operatorname{tg} \alpha_2$ (см. рис. 2).

Выразим характеристики формы β и Δk через параметры анаморфотного КЭ.

Координаты точек x_a, y_a прямых контура изображения марки при повороте КЭ на угол скручивания Θ определяются выражением (действие ретрорефлектора, не влияющего на расходимость пучка, не учитывается):

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a \\ x_a k_a + b_a \end{bmatrix} = M M_A M^T \begin{bmatrix} x \\ kx + b \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где матричный сомножитель M_A определяет анаморфирование, M и M^T — прямая и транспонированная матрицы поворота на угол Θ относительно оси OZ . Эти матрицы задаются выражениями:

$$M = \begin{bmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta \\ \sin \Theta & \cos \Theta \end{bmatrix}; M_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Решив уравнение (4) относительно k_a углового коэффициента прямой контура анаморфированного изображения, получим для изображения первого прямолинейного края марки (рис. 2, 1):

$$k_{1A} = \frac{A \sin \alpha_1 + (A-1) \cos(\alpha_1 + \Theta) \sin \Theta}{\cos \alpha_1 + (A-1) \sin(\alpha_1 + \Theta) \sin \Theta}, \quad (6)$$

где $\alpha_1 = \arctg k_1$ — угол между первой прямой контура исходной марки и осью OX .

Выражение для углового коэффициента контура изображения второго края марки (рис. 2, 2) аналогично (6) при подстановке вместо α_1 угла α_2 между второй прямой контура исходной марки и осью OX .

Статическая характеристика измерительной системы при использовании Δk как регистрируемого параметра формы изображения определяется при подстановке полученных выражений в соотношение (3), при использовании угла β — в соотношение (2):

$$\Delta k(\Theta) = \frac{4A(k_1 - k_2)}{\cos^2(2\Theta) - k_1 k_2 \sin^2(2\Theta) + (k_1 + k_2) \cos 2\Theta \sin 2\Theta}, \quad (7)$$

где вспомогательные функции: $\cos^2 2\Theta = 2 + (A-1)(1 - \cos 2\Theta)$, $\sin^2 2\Theta = (A-1) \sin 2\Theta$.

При следующем соотношении между угловыми коэффициентами:

$$k_1 = \tg \alpha = k; k_2 = \tg(-\alpha) = -k \quad (8)$$

выражение для статической характеристики упрощается, в частности, мультипликативное слагаемое в знаменателе будет равно нулю. Условие (8) может быть реализовано поворотом исходной системы координат относительно оси OZ на некоторый угол κ (см. рис. 2).

В соответствии с выражением (7) статическая характеристика является гармонической функцией аргумента Θ с периодом $T = 180^\circ$, что определяет диапазон однозначного измерения угла скручивания, равный интервалу $[0, 90^\circ]$.

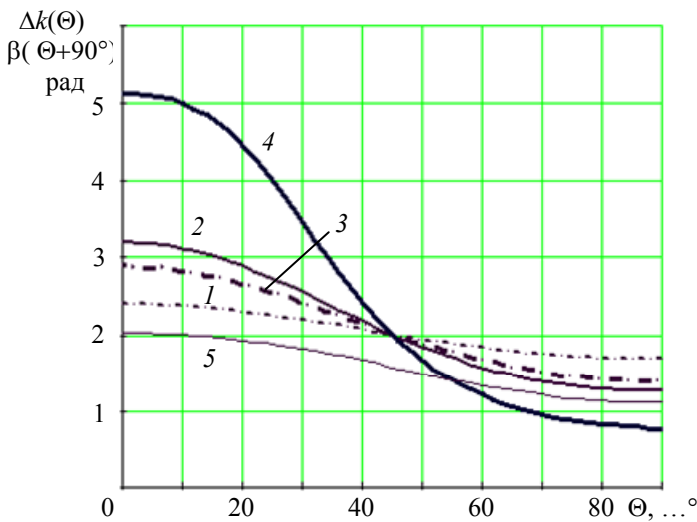


Рис. 3

На рис. 3 приведены графики статической характеристики для величины параметра контура $k = 1$ и двух значений коэффициента анаморфирования $A = 1,2$ (кривая 1) и $1,6$ (2). Для $A = 1,6$ также построен график (5) статической характеристики $\beta(\Theta+90^\circ)$ вида (2), его аналитическое выражение не приведено по причине сложности. Вид статических характеристик при использовании двух рассмотренных параметров формы аналогичен, при этом статическая характеристика $\Delta k(\Theta)$ описывается более простым аналитическим выражением.

Статическая характеристика нелинейна, ее крутизна S , определяющая чувствительность измерения, зависит от величины Θ_0 исходного разворота КЭ на угол скручивания. Графики зависимости $S(\Theta)$, полученные дифференцированием функции $\Delta k(\Theta)$ с

последующим взятием абсолютной величины, приведены на рис. 4 (параметры анаморфотного КЭ и обозначения те же, что и на рис. 3).

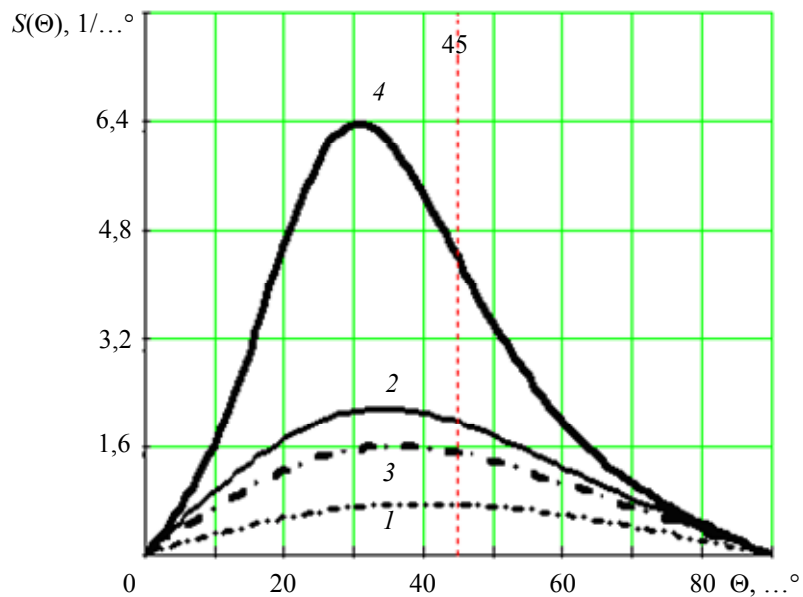


Рис. 4

Из графиков следует, что наибольшей чувствительности измерения S_m соответствует угол, величина Θ_0 которого в зависимости от величин параметров k , A находится в интервале $[30^\circ—40^\circ]$.

Величина S_m на 20—25 % превышает значение S_{45} чувствительности, соответствующей углу $\Theta_0 = 45^\circ$. Значение S_{45} определяется выражением

$$S_{45} = \frac{32kA(A-1)}{\left[(A+1)^2 - k^2(A-1)^2 \right]^2}. \quad (9)$$

Полученные соотношения соответствуют КЭ с анаморфотной системой в виде пары клиньев. Для этого типа анаморфотов практически трудно получить величину коэффициента анаморфирования, большую $A = 1,5$ [4], что определяет невысокую чувствительность измерения скручивания.

Для увеличения чувствительности возможно использовать КЭ, включающий две (и более) последовательно установленные по ходу луча анаморфотные системы. Например, вторая анаморфотная система 7 может устанавливаться на другой половине апертуры ретрорефлектора 3 (см. рис. 1).

При этом для уменьшения расходимости пучка эффективно использовать пару систем с рассогласованным анаморфированием, при котором плоскости анаморфирования взаимно перпендикулярны, а величины коэффициентов анаморфирования взаимно-обратны. В частности, для второй системы коэффициент анаморфирования равен A^{-1} (угол расходимости пучка уменьшается в плоскости анаморфирования).

Такая система рассчитывается по выражению, аналогичному (4), с добавлением после M_A сомножителя $M_{A^{-1}}$ вида:

$$M_{A^{-1}} = \begin{bmatrix} 1/A & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Полученные в результате расчетные выражения имеют тот же вид, что и выражения (6) и (7) для одиночной анаморфотной системы с заменой соответственно величин $\alpha_1 = \arctg(k_1)$

и $\alpha_2 = \operatorname{arctg}(k_2)$ описания прямых контура исходной марки на величины $\alpha_{1A} = \operatorname{arctg}(k_{1A})$, $\alpha_2 = \operatorname{arctg}(k_{2A})$ для прямых контура изображения марки, определяемых действием первой системы.

Значение S_{45} определяется выражением вида (9), но с заменой величины A на A^2 . Графики статической характеристики и зависимости чувствительности измерения для параметров анаморфирования $A = 1,2$ (кривая 3) и $1,6$ (4) приведены на рис. 3, 4. Из рассмотрения следует, что использование КЭ в виде композиции пар анаморфотов позволяет значительно повысить точность измерения.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) найдены соотношения, определяющие статическую характеристику и чувствительность измерения скручивания по известным параметрам анаморфотного КЭ;
- 2) полученные выражения являются инвариантами, позволяющими проектировать системы с требуемой чувствительностью измерения и видом статической характеристики при использовании КЭ в виде композиции анаморфотных систем.

Статья подготовлена по материалам исследований, выполняемых при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010 гг.)“ и федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джабиев А. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2000.
2. Коняхин И. А., Мерсон А. Д. Оптико-электронная система измерения угла скручивания на основе анаморфирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 10—14.
3. Коняхин И. А., Мерсон А. Д. Исследование возможности построения трехкоординатной анаморфотной системы измерения параметров угловой пространственной ориентации // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 1. С. 28—30.
4. Бегунов Б. Н. Трансформирование оптических изображений. М.: Искусство, 1965.

Сведения об авторах

- Игорь Алексеевич Коняхин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: igor@grv.ifmo.ru
- Алексей Дмитриевич Мерсон** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: mad777@grv.ifmo.ru
- Александр Николаевич Тимофеев** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
26.04.10 г.

А. С. ИВАНОВ, В. В. МАНУХОВ, А. Б. ФЕДОРЦОВ, Ю. В. ЧУРКИН

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ УГЛОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Описаны две оптико-механические схемы, реализующие быстрое изменение угла падения лазерного луча на поверхность неподвижного образца с последующей регистрацией интенсивности отраженного образцом луча. Входящие в состав устройства сферические собирающие линзы или сферические зеркала вместо эллиптических значительно снижают его себестоимость.

Ключевые слова: угол падения луча, лазерная интерферометрия, тонкие пленки.

В ряде экспериментов требуется измерять зависимость коэффициента отражения монохроматического луча от угла его падения на поверхность исследуемого образца. При этом необходимо обеспечить попадание луча в заданную фиксированную точку на поверхности неподвижного образца и максимально сократить время измерений. Полученные результаты могут быть использованы при определении толщины прозрачных и слабопоглощающих пленок [1—7], при лазерно-интерферометрических исследованиях электронных свойств полупроводников [8], при измерении шероховатости поверхности и в ряде других экспериментов.

Одним из устройств, позволяющих измерять угол падения луча лазера на поверхность неподвижного образца, является схема, предложенная профессором Мори [1, 2, 7], в которой лазер и фотоэлемент крепятся на соседних плечах пантографа, а исследуемый образец (пленка) располагается так, что его поверхность находится на оси шарнира, соединяющего эти плечи. Однако при использовании такой схемы минимальное время одного измерения составило около 10 с, т.е. скорость измерения недостаточно высока для решения ряда научных и технических задач, например, при измерении толщины жидких пленок, особенно в случае испарения или растекания. Авторами настоящей работы были предложены устройства [3—5] для изменения угла падения луча лазера на поверхность образца и измерения интенсивности отраженного излучения, единственным подвижным элементом которых является вращающееся плоское зеркало. Устройства позволяют получить рабочий диапазон изменения углов в 65° , основным преимуществом таких устройств является высокое быстродействие: время прохождения рабочего диапазона углов составляет около 1 мс при частоте измерений 50 с^{-1} . Это позволяет применять их при измерении толщины растекающихся или быстро испаряющихся пленок [5], а также контролировать толщину пленок (например, оксидных) при наращивании в режиме реального времени. Кроме того, такие приборы позволяют значительно сократить время контроля толщины образцов, когда необходимо провести измерения в большом числе точек на их поверхности. Однако в этих устройствах использованы сложные в изготовлении эллиптические зеркала, что делает прибор довольно дорогостоящим.

В настоящей статье описываются два разработанных, изготовленных и испытанных устройства, в которых вместо эллиптических зеркал используются сферические линзы или зеркала. Оптико-механическая схема прибора, в котором используются сферические линзы, приведена на рис. 1. Взаимосвязь оптико-механических элементов в устройстве следующая: луч лазера 1 направляется в точку N плоского зеркала 2, которое вращается электродвигателем с постоянной угловой скоростью ω вокруг оси, проходящей на его поверхности через точку падения N луча лазера (ось вращения зеркала перпендикулярна падающему лазерному лучу). Линза 3 и держатель образца 4 установлены так, что измеряемая точка образца 5 пленки

(точка M) является оптически сопряженной точке N . Линза $б$ и приемник излучения 7 расположены таким образом, что линза $б$ хотя бы частично перекрывает сектор (веер) лучей лазера. Отразившись от зеркала 2 , луч (вследствие непрерывного вращения зеркала 2) скользит по поверхности линзы 3 , все время преломляясь под разными углами в точку M . Отраженный в точке M от образца луч попадает на линзу $б$, пройдя через которую, попадает в точку P (оптически сопряженную точке M), в которой находится фотоприемник 7 . Сигнал с фотоприемника подается на вход регистрирующего устройства (например, осциллографа).

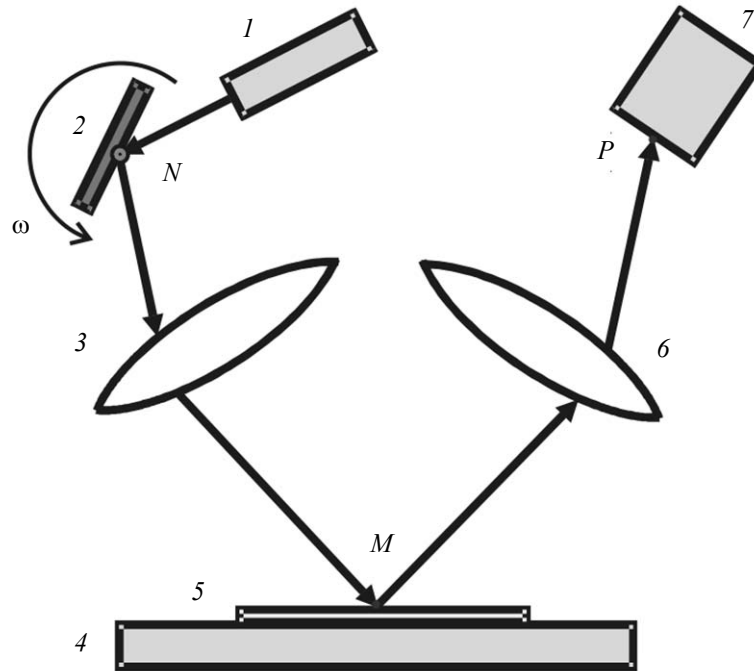


Рис. 1

При практической реализации устройства нами в качестве первой была использована линза диаметром 16 мм с фокусным расстоянием 12 мм. Исследуемый образец располагался на расстоянии 13—14 мм от нее. Всю поверхность линзы использовать не удалось вследствие того, что луч лазера, преломляясь вблизи краев линзы, не попадал в точку измерения, по-видимому, вследствие аберраций. Диапазон углов отклонения лазерного луча — примерно 36° (от начального значения 30° до конечного — 66°). По быстродействию прибор не отличается от прототипа и позволяет производить измерения с частотой 50 с^{-1} , это определяется угловой скоростью вращения плоского зеркала 2 . Время прохождения рабочего диапазона углов составляет около 1 мс.

Однако для измерения угловой зависимости коэффициента отражения инфракрасного лазерного луча описанное устройство возможно применять только при использовании линз, изготовленных из материалов, прозрачных в инфракрасной области спектра, так как стекло сильно поглощает излучение в этой области. Такие линзы дороги и малодоступны, номенклатура их невелика.

Для преодоления этого недостатка нами была предложена и исследована оптико-механическая схема с использованием сферических зеркал, имеющих наружную металлизацию, которые намного дешевле и доступнее эллиптических. Оптическая схема прибора приведена на рис. 2. Взаимосвязь оптико-механических элементов в устройстве следующая. Луч лазера 1 направляется на плоское зеркало 2 . Это зеркало вращается электродвигателем с постоянной угловой скоростью ω вокруг оси, лежащей на его поверхности и проходящей через точку падения луча лазера. Причем ось вращения зеркала перпендикулярна падающему лазерному лучу. Сферическое зеркало 3 и держатель образца 4 установлены так, что измеряемая

точка образца (точка N) является оптически сопряженной точке M . Сферическое зеркало 5 и приемник излучения 6 расположены так, что сферическое зеркало 5 перекрывает сектор (веер) лучей лазера 1, отраженных измеряемой точкой N образца при их попадании в эту точку при различных угловых положениях плоского зеркала 2, а вход приемника излучения находится в точке P , оптически сопряженной измеряемой точке N образца.

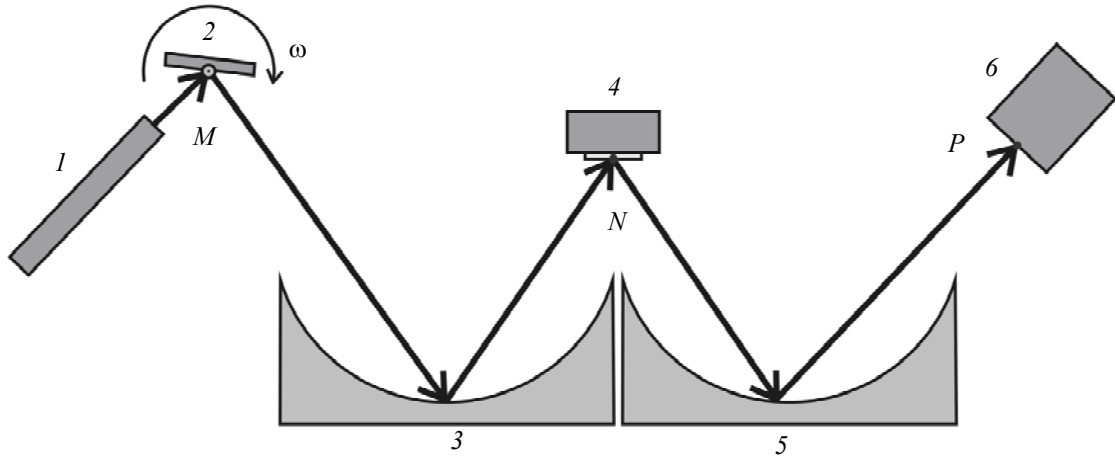


Рис. 2

В практически испытанном нами варианте оптического тракта были использованы вогнутые сферические зеркала с фокусным расстоянием 30 мм и наружным алюминированием. При этом было достигнуто изменение угла падения луча на образец 40° в диапазоне $12\text{--}52^\circ$ с последующей регистрацией параметров отраженного луча. По быстродействию прибор не отличается от приборов, описанных выше, и позволяет производить до 50 измерений в секунду. Время прохождения рабочего диапазона углов составляет около 1 мс.

Реализованные оптико-механические схемы позволяют получить достаточно большой диапазон углов, но меньше, чем схема, содержащая эллиптические зеркала. Это может несколько ограничивать область применения предложенных приборов. Однако сферические зеркала и линзы, входящие в состав этих устройств, гораздо дешевле и доступнее, чем эллиптические зеркала. Таким образом, несмотря на то что предложенные в данной статье устройства несколько уступают по своим параметрам устройствам на основе эллиптических зеркал, в ряде случаев их применение целесообразно вследствие доступности оптических элементов.

Работа выполнена при поддержке гранта № 9-4-4232 „Исследование методами лазерной интерферометрии“ ФЦП „Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010 гг.)“ и гранта № П184 „Исследование дисперсионных сил адгезии водорода к материалам для систем его хранения“ ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009—2013 гг.)“.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ohyama T., Mori Y. H. Optical method for measuring uniform thickness of the order of $10\ \mu\text{m}$ —1 mm of transparent solid and liquid films // Review of scientific instruments. 1987. Vol. 58, N 10. P. 1860—1864.
2. Nosoko T., Mori Y. H., Nagata T. Improved interferometer for measuring unsteady film thickness // Review of scientific instruments. 1996. Vol. 67, N 8. P. 2685—2690.
3. Иванов А. С., Летенко Д. Г., Торчинский И. А., Федорцов А. Б., Чуркин Ю. В. Быстрое измерение угловой зависимости коэффициента отражения лазерного луча неподвижным образцом // Приборы и техника эксперимента. 1991. № 4. С. 222—224.
4. Fedortsov A. B., Letenko D. G., Churkin Yu. V., Torchinsky I. A., Ivanov A. S. A fast operating device for measuring the thickness of transparent solid and liquid films // Review of scientific instruments. 1992. Vol. 63, N 7. P. 3597—3582.

5. 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.
6. Griffiths C. L., Weeks K. J. Optical monitoring of molecular beam epitaxy growth of AlN/GaN using single-wavelength laser interferometry: A simple method of tracking real-time changes in growth rate // J. Vacuum Science & Technology B. 2007. Vol. 25, N. 3. P. 1066—1071.
7. Ohmura R., Kashiwazaki S., Mory Y. H. Measurements of clathrate-hydrate film thickness using laser interferometry // J. Crystal Growth. 2000. Vol. 218, N. 2—4. P. 372—380.
8. Арешкин А. Г., Воробьев Л. Е., Иванов А. С., Комаровских К. Ф., Летенко Д. Г., Федорцов А. Б., Чуркин Ю. В. Бесконтактный лазерный интерференционный метод неразрушающего исследования рекомбинационных характеристик электронов и дырок в полупроводниках // Изв. РАН, сер. физическая. 1992. Т. 56, № 12. С. 121—129.

Сведения об авторах

- | | |
|-------------------------------------|--|
| Алексей Сергеевич Иванов | — канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный заочный технический университет, кафедра физики, Санкт-Петербург; E-mail: physics@nwrpi.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; заведующий кафедрой; E-mail: physics@nwrpi.ru |
| Юрий Валентинович Чуркин | — канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный заочный технический университет, кафедра физики, Санкт-Петербург; E-mail: yuch58@yandex.ru |

Рекомендована кафедрой
физики

Поступила в редакцию
11.06.10 г.

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 536, 621.1

А. Л. ЕМЕЛЬЯНОВ

ТЕПЛОТДАЧА В ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНОМ ПОТОКЕ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИБОРОВ

Проанализирована эффективность охлаждения теплообменных поверхностей воздушно-капельным потоком. Рассмотрены пути реализации этого способа охлаждения в автономных холодильных системах теплообмена.

Ключевые слова: испарительное охлаждение, коэффициент теплоотдачи, воздушно-капельный поток.

Охлаждение приборов с высокими значениями тепловыделения возможно путем их охлаждения смесью влажного воздуха и мелких капель воды. Использование такой смеси значительно эффективнее, чем сухого воздуха.

Во-первых, наружный воздух после увлажнения охлаждается до уровня психрометрической температуры (температуры „мокрого“ термометра), поэтому приобретает способность снижать температуру объекта. Во-вторых, находящиеся в воздухе капли воды, сталкиваясь с поверхностью нагретого объекта, образуют на поверхности тонкую пленку, нагреваются и, интенсивно испаряясь, дополнительно, через прямой контакт, охлаждают его. Указанные свойства перенасыщенного воздушного потока могут оказаться очень полезными, особенно в современных теплообменных системах при их охлаждении наружным воздухом [1].

Из сказанного выше становится очевидно, что процесс теплоотдачи в перенасыщенной воздушной среде должен существенно отличаться от теплоотдачи в сухом и даже влажном насыщенном воздухе. Действительно, если процессы теплообмена в потоках сухого и влажного ненасыщенного воздуха практически не различаются, то в перенасыщенном потоке воздуха помимо конвективного теплообмена происходит испарение прилипающих к объекту капель. Для учета процесса испарения необходим сравнительный анализ закономерностей охлаждения объекта сухим, увлажненным насыщенным и перенасыщенным воздухом.

Пусть нагретый объект имеет температуру t_n , наружный сухой воздух — температуру t_c , а насыщенный и перенасыщенный влажный воздух температуру t_m , причем $t_n > t_m > t_c$.

При охлаждении объекта потоком сухого воздуха с участка F поверхности объекта в среду переносится тепловой поток

$$Q_c = \alpha_T F (t_n - t_c), \quad (1)$$

где α_T — коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К).

При охлаждении объекта потоком увлажненного насыщенного воздуха в среду с участка F его поверхности соответственно будет уноситься тепловой поток

$$Q_m = \alpha_T F (t_n - t_m). \quad (2)$$

При охлаждении увлажненной перенасыщенной воздушно-капельной смесью помимо конвективного потока Q_M в среду начинает поступать тепловой поток Q_H , уносимый потоком пара от испаряющихся капель,

$$Q_H = q_H \alpha_m n F (d_H - d_M). \quad (3)$$

где q_H — удельная теплота испарения воды, Дж/кг; α_m — коэффициент массоотдачи между мокрой поверхностью и средой, кг/(м²·с); n — коэффициент заполнения участка F объекта испаряющимися каплями; d_H и d_M — коэффициент влагосодержания насыщенного воздуха при температуре t_H и t_M соответственно.

Тепловые потоки Q_M и Q_H направлены от объекта к среде. Следовательно, при теплообмене с воздушно-капельной смесью участок F поверхности охлаждается двумя тепловыми потоками ($Q_M + Q_H$).

При сравнении всех трех способов охлаждения учтем, что в пограничном слое „объект—воздушная среда“ процессы теплопроводности и диффузии пара имеют общую молекулярную природу. В частности, согласно i - d -диаграмме влажного воздуха и теории психрометра, коэффициенты α_T и α_m связаны между собой соотношением

$$\frac{q_H \alpha_m}{\alpha_T} \cong 2,5 \cdot 10^3 \text{ К}. \quad (4)$$

С учетом соотношения (4) суммарный тепловой поток, уносимый с участка F поверхности объекта воздушно-капельным потоком, можно определить с помощью общего выражения

$$Q_{BK} = \alpha_T F \left[(t_H - t_M) + 2,5 \cdot 10^3 n (d_H - d_M) \right]. \quad (5)$$

Расчетные соотношения (1), (2), (5) нуждаются в дополнительном комментарии. Во-первых, для всех трех вариантов обдува суммарный расход воздушного потока через теплообменник принимался одним и тем же. Во-вторых, учитывалось, что присутствие в воздухе водяного пара практически не влияет на состояние пограничного слоя у пластин и ребер теплообменника, поэтому в формулах присутствует общий коэффициент теплоотдачи α_T . Следовательно, увлажнение воздушного потока практически не влияет на интенсивность теплообмена. Эффективность обдува влажным насыщенным воздухом повышается только за счет снижения температуры воздуха до психрометрических значений. Во многих случаях этого уже вполне достаточно, чтобы, в частности, резко повысить холодильный коэффициент парокompрессионной холодильной машины в автономных системах теплообмена и значительно снизить ее энергопотребление.

Ситуация, однако, резко меняется, когда теплообменник охлаждается воздушно-капельной смесью. Капли вступают в контактный теплообмен с горячими ребрами трубок и резко интенсифицируют диффузный поток водяного пара от ребер и трубок в воздушную струю. Именно этот поток и приводит к резкому увеличению эффективного коэффициента теплоотдачи воздушно-капельной смеси. Следовательно, при обдуве воздушно-капельной смесью эффективность теплообмена растет как за счет снижения температуры воздуха, так и за счет увеличения эффективного коэффициента теплоотдачи.

Воспользуемся тем, что расчетные формулы (1), (2) и (5) позволяют сравнивать относительную эффективность всех трех способов охлаждения нагретых тел без привлечения конкретных значений коэффициента теплоотдачи α_T .

Так, коэффициент эффективности охлаждения предварительно увлажненным до насыщения потоком наружного воздуха относительно охлаждения сухим наружным воздухом можно оценить с помощью выражения

$$k_{M-c} = \frac{Q_M}{Q_c} = \frac{t_H - t_M}{t_H - t_c}. \quad (6)$$

Коэффициент эффективности охлаждения воздушно-капельной смесью, по аналогии с (6), можно оценивать с помощью выражения

$$k_{\text{BK-с}} = \frac{Q_{\text{BK}}}{Q_{\text{с}}} = \frac{[(t_{\text{H}} - t_{\text{M}}) + 2,5 \cdot 10^3 n (d_{\text{H}} - d_{\text{M}})]}{t_{\text{H}} - t_{\text{с}}}. \quad (7)$$

Выражения (6), (7) позволяют сравнить относительную эффективность всех трех рассмотренных способов охлаждения, в частности, их можно использовать при выборе способов совершенствования конденсатора холодильных машин, в том числе для малогабаритных транспортных кондиционеров. В таких кондиционерах конденсатор обычно имеет температуру поверхности $t_{\text{H}} = 50\text{—}75\text{ }^{\circ}\text{C}$, а охлаждается наружным воздухом с температурой $t_{\text{с}} = 30\text{—}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности $30\text{—}60\%$. Коэффициент влагосодержания воздуха в условиях насыщения при указанных температурах t_{H} достигает значений $d_{\text{H}} \sim 0,1\text{—}0,2$, $d_{\text{M}} \sim 0,01\text{—}0,03$.

В качестве примера примем, что температура поверхности конденсатора $t_{\text{H}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура среды $t_{\text{с}} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, психрометрическая температура среды $t_{\text{M}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а коэффициент заполнения пластин „пленкой“ воды $n = 0,2$. Коэффициент влагосодержания при насыщении воздуха влагой для выбранных t_{H} и t_{M} оказывается соответственно равен $d_{\text{H}} = d(t_{\text{H}}) \cong 0,10$ и $d_{\text{с}} = d(t_{\text{с}}) \cong 0,04$.

Из выражения (6) получаем

$$k_{\text{M-с}} = \frac{Q_{\text{M}}}{Q_{\text{с}}} = \frac{t_{\text{H}} - t_{\text{M}}}{t_{\text{H}} - t_{\text{с}}} = \frac{50 - 20}{50 - 35} = 2.$$

Из выражения (7) имеем

$$\begin{aligned} k_{\text{BK-с}} &= \frac{Q_{\text{BK}}}{Q_{\text{с}}} = \frac{[(t_{\text{H}} - t_{\text{M}}) + 2,5 \cdot 10^3 n (d_{\text{H}} - d_{\text{M}})]}{t_{\text{H}} - t_{\text{с}}} = \\ &= \frac{(50 - 20) + 2,5 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot (0,10 - 0,04)}{15} = \frac{30 + 30}{15} = 4. \end{aligned}$$

Таким образом, из примера видно, что при охлаждении конденсатора холодильной машины применение воздушно-капельного потока позволяет повысить его эффективность в несколько раз.

В заключение обратим внимание на ряд важных особенностей, с которыми следует считаться при замене наружного воздушного потока увлажненным до насыщения потоком или воздушно-капельной смесью.

Так, при изохлальной увлажнении воздушного потока без остаточных капель важно подавать в него определенное количество влаги, причем в виде очень мелких капель. Поступающая в поток влага должна, во-первых, успевать испаряться до попадания в теплообменник, а во-вторых, ее количества должно хватать, чтобы до психрометрической температуры успевал охладиться весь поток, а не только испаряющиеся капли.

Чтобы выполнить второе условие, следует придерживаться теплового баланса между смешивающимися потоками воздуха и воды

$$(c_p \rho G)(t_{\text{с}} - t_{\text{M}}) \cong q_{\text{и}} \left(\frac{dM}{d\tau} \right), \quad (8)$$

где c_p , ρ , G — удельная изобарная теплоемкость, плотность и расход воздуха соответственно; $dM/d\tau$ — расход воды, поступающей в поток.

Для выполнения первого условия при использовании форсунок следует добиваться, чтобы в поток попадали только очень мелкие капли, диаметр которых не превышает $0,01\text{ мм}$. Заметим, что с технической точки зрения изохлальное насыщение воздуха водяным

паром реализуется наиболее просто путем пропускания воздуха через вспомогательный щелевой теплообменник, пластины которого выполнены из капиллярно-пористого материала. Испарение в среду с мокрой поверхности снижается по мере выравнивания влагосодержания в зоне пограничного слоя. Можно, конечно, использовать и барботирование воздуха через слой воды. Этот способ увлажнения также обладает свойством саморегулирования [2].

Для образования воздушно-капельного потока, однако, самыми привлекательными остаются форсунки. Они просты в эксплуатации, не создают запахов застойной, „гнилой“ воды, имеют малые габариты, экономичны и обеспечивают управляемое извне регулирование расхода воды. В частности, с их помощью можно управлять в широких пределах коэффициентом смачивания поверхности конденсатора.

Наконец, нельзя забывать, что в тех случаях, когда наружный воздух имеет очень высокую относительную влажность и теряет способность охлаждаться, воздушно-капельная смесь остается единственным средством сохранения эффективной, энергетически выгодной работы охлаждающей холодильной машины в автономном конденсаторе и всей системы охлаждения прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архаров А. М., Архаров И. А., Афанасьев В. Н. и др. Теплотехника. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 712 с.
2. Мерчанский В. Д., Роголев В. А., Шувалов Ю. В., Денисов В. Н. Ресурсосберегающие аппараты и системы. СПб: Межд. академия наук экологии, безопасности человека и природы, 1999. 371 с.

Сведения об авторе

Анатолий Леонович Емельянов — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, кафедра кондиционирования воздуха; E-mail: info@petroclima.ru

Рекомендована кафедрой
кондиционирования воздуха

Поступила в редакцию
16.12.09 г.

М. И. Фокина, Н. О. Собежук, И. Ю. Денисюк

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНОГО МИКРОЭЛЕМЕНТА НА ТОРЦЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В УСЛОВИЯХ ЗНАЧИТЕЛЬНОГО ИНГИБИРУЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ КИСЛОРОДА НА ПРОЦЕСС ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИИ

Рассмотрен процесс формирования самоорганизованных полимерных микроэлементов на торце оптоволокна в ограниченном объеме фотополимера. Исследуются причины возникновения оптических потерь на стыке оптоволокна с микроэлементом.

Ключевые слова: волновод, оптоволокно, микролинза, сопряжение, самофокусировка, фотополимер.

Введение. Одной из актуальных задач волоконной оптики является сопряжение оптических волокон и введение излучения в волокно с наименьшими потерями. Соединение встык оптимально лишь для волокон равного диаметра с одинаковой апертурой, в других случаях требуется использование фокусирующей и коллимирующей конструкции. При введении в волокно излучения лазера или диода потери при соединении встык будут также неизбежны, поскольку размеры излучающей площадки как лазера, так и диода, больше диаметра волокна. Одним из возможных решений этой проблемы является использование торцевых фокусирующих микроэлементов.

В настоящее время разработано несколько эффективных методов, позволяющих получать микроэлементы, в том числе микролинзы, изготовленные как отдельно от волновода, так и непосредственно на торце оптоволокна. Создание микроэлементов на торце волокна предпочтительнее, поскольку изначально обеспечивает соосность элемента и волокна и отсутствие необходимости дальнейшего монтажа и юстировки.

Существует несколько наиболее известных способов получения торцевых микроэлементов, таких как оплавление лазером или газовой горелкой (элементы различного назначения) [1, 2], химическое травление волокна (фоконы) [3], нарезка ионным пучком (дифракционные микролинзы) [4]. Первые два уже нашли широкое применение, однако недостатком оплавления является возможная несоосность микроэлемента со световедущей жилой волокна, а недостатком травления — неизбежное химическое загрязнение поверхности. Технология нарезки ионным пучком позволяет получать микрорельеф очень высокого качества и с высоким разрешением, однако данный метод сложен в исполнении [4].

В последнее время проводятся многочисленные исследования в области получения на торце оптического волокна полимерных микроэлементов [5—7]. В основе метода лежит формирование элементов из мономерной композиции, нанесенной на торец, исходящим из волокна лазерным

излучением. Данная технология позволяет получать микроэлементы высокого качества, а также контролировать их размер и профиль [7]. Однако все разработки в этой, безусловно перспективной, области находятся на стадии лабораторных исследований, а экспериментальные результаты, представленные различными авторами, зачастую противоречивы, поскольку не учитываются зависимость процессов от типа использованного мономера, концентрации инициатора, объем мономера и скорость диффузии кислорода к области экспонирования.

В предшествующих работах нами были проведены исследования процессов формирования микроэлементов на торце оптоволокна и показана определяющая роль кислорода [8—10]. Кислород является ингибитором процесса фотополимеризации используемых акриловых мономеров и скорость его диффузии определяет скорость процесса формирования микроэлемента [11]. По этим причинам эксперименты, выполненные в настоящей работе, проводились в малом ограниченном объеме мономера — капле, нанесенной на торец оптоволокна, когда процессы ингибирования фотополимеризации кислородом, диффундирующим с поверхности капли в область экспонирования, наиболее сильно проявляются.

Эксперимент. Настоящая работа посвящена исследованию технологии получения полимерных микроэлементов на торце оптического волокна путем фотополимеризации исходящим из волокна излучением. На рис. 1 представлена схема проведения эксперимента по созданию торцевого элемента в ограниченном объеме мономерной композиции (d — диаметр).

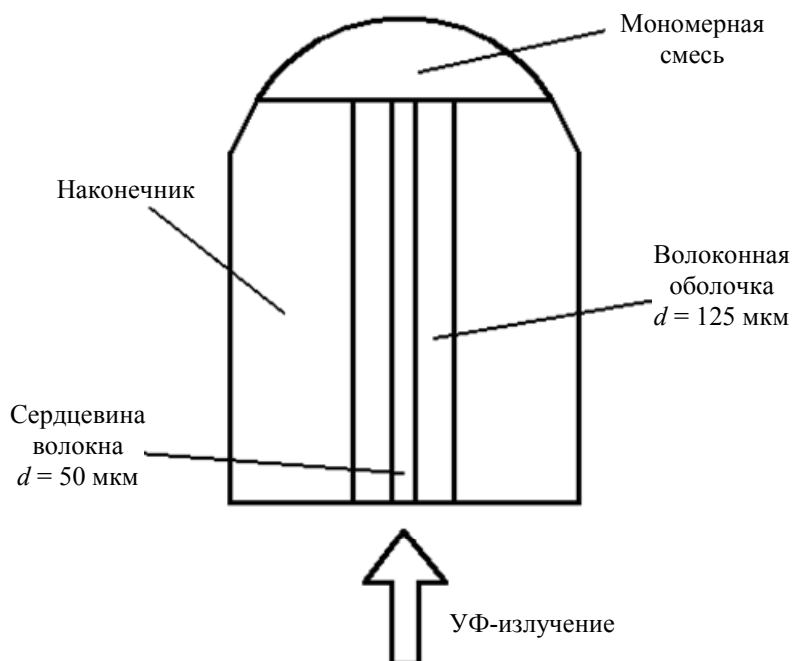


Рис. 1

В свободный конец многомодового волокна 50/125 вводилось излучение азотного лазера ($\lambda = 337$ нм), на другой — вертикально закрепленный — торец наносилась капля жидкой мономерной композиции, высота капли контролировалась визуально. В работе использовалась смесь акрилатов (в скобках указаны их массовые доли): 2-carboxyethyl acrylate (50 %), Bisphenol A glycerolate (20 %), 1,6-hexanediol diacrylate (10 %), Trimethylolpropane ethoxylate (1 EO/OH) methyl ether diacrylate (20 %). В качестве инициатора использовался dimetoksifenilatsetofenon (0,1 %) с максимумом поглощения на 250 нм. Показатель преломления композиции — 1,48. Экспозиция варьировалась от 3 до 45 с ($t = 3, 5, 10, 15, 25, 45$ с).

Ряд экспериментов позволил выделить несколько определенных этапов роста полимерных микроэлементов.

1. Процесс полимеризации начинается не мгновенно, а с того момента, как поглощенная мономером энергия достигнет определенного порогового значения. Задержка объясняется

тем, что первые импульсы уходят на выжигание кислорода в мономере, который является ингибитором процесса, а также на образование свободных радикалов из молекул инициатора. Этот этап формирования является инкубационным.

2. При минимальной экспозиции наблюдается образование квазисферической линзы (рис. 2). Данный этап является наиболее „трудновоспроизводимым“, поскольку процесс полимеризации протекает непрерывно с очень большой скоростью.

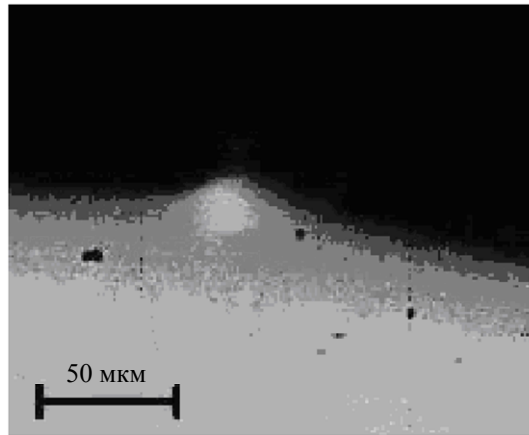


Рис. 2

3. Образование элемента цилиндрической/конической формы с закругленной вершиной, экспозиция 10 с (рис. 3).

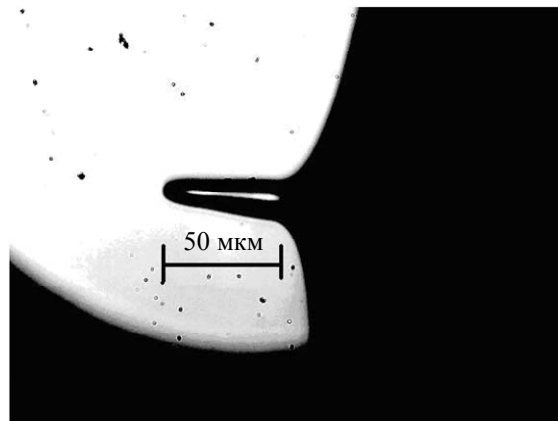


Рис. 3

4. Возможно образование структуры „перетяжка“, экспозиция 15 с (рис. 4). Возникновение подобной формы может быть объяснено тем, что в данной точке находится фокус линзы, образовавшейся на этапе 2.

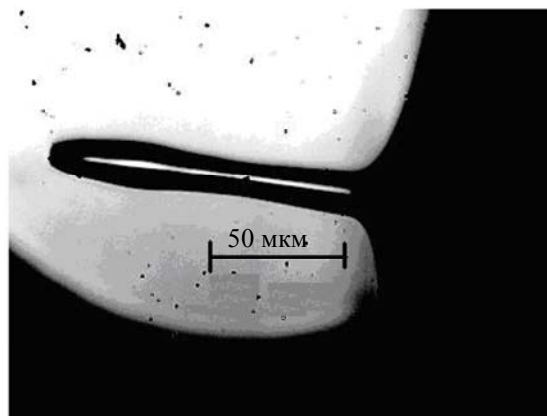


Рис. 4

5. При увеличении экспозиции происходит выравнивание профиля элемента. Опыты показали, что при достаточной экспозиции (45 с) эта форма (рис. 5) элемента является хорошо воспроизводимой (вероятность получения почти 100 %).

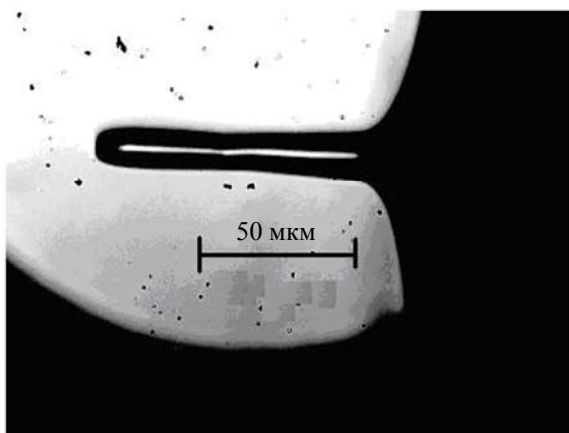


Рис. 5

Среди других особенностей процесса роста стоит отметить: отсутствие уширения элементов и увеличение радиуса кривизны микролинзы на конце элемента при большом времени облучения, высота элемента достигает высоты капли очень быстро за счет большой скорости полимеризации.

Во второй части исследования контролировалось качество микроэлементов. Схема эксперимента представлена на рис. 6. Сначала измерялась зависимость интенсивности излучения от расстояния между „чистым“ волоконным торцом и сканирующим волокном, соединенным с фотоприемником (рис. 6, а) далее — зависимость интенсивности от расстояния между сканирующим волокном и волокном с полимерным микроэлементом на торце (рис. 6, б). В качестве сканирующего использовалось волокно 9/125 в связи с практической важностью получения микроэлементов, обеспечивающих эффективное сопряжение одномодовых и многомодовых волокон.

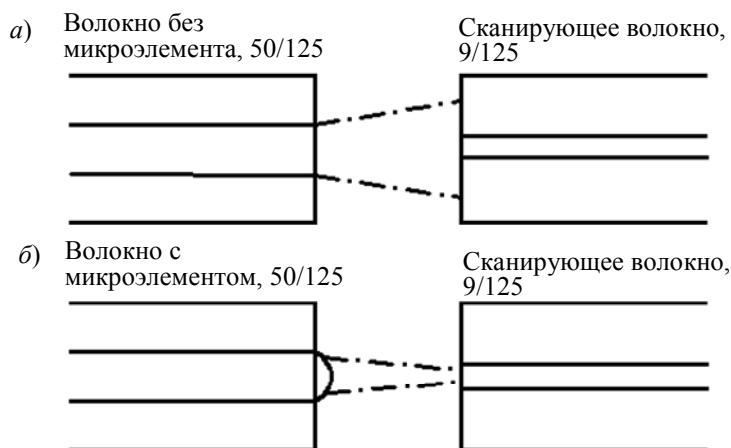


Рис. 6

На рис. 7 представлены полученные результаты измерений (зависимости силы тока фотоприемника, I , от расстояния между волокнами, l): 1 — полимерное образование на торце волокна отсутствует, 2 — при наличии полимерного образования. Кривая 2 имеет явно выраженный максимум, подтверждая то, что микроэлемент обладает фокусирующим действием, т.е. является микролинзой. Однако график показывает, что даже в точке максимума сила тока, а значит и интенсивность излучения, меньше, чем при соединении двух торцов встык.

Для выявления источника потерь был проведен следующий опыт: в волокно с микролинзой на конце вводилось лазерное излучение гелий-неонового лазера. Была получена картина, представленная на рис. 8. Сам элемент остается темным, зато наблюдаются существенные потери на границе полимер—кварц.

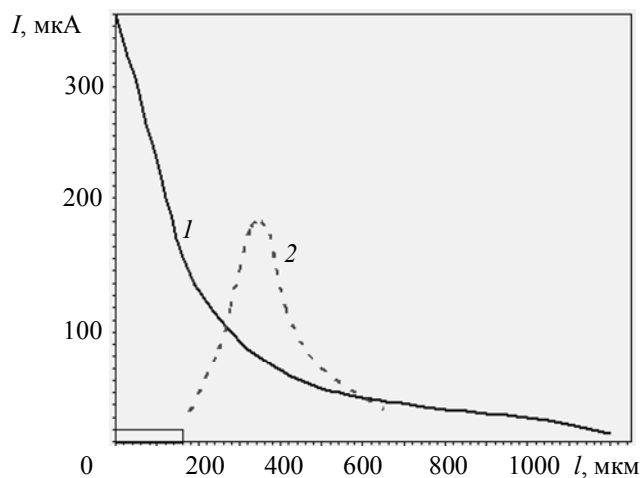


Рис. 7

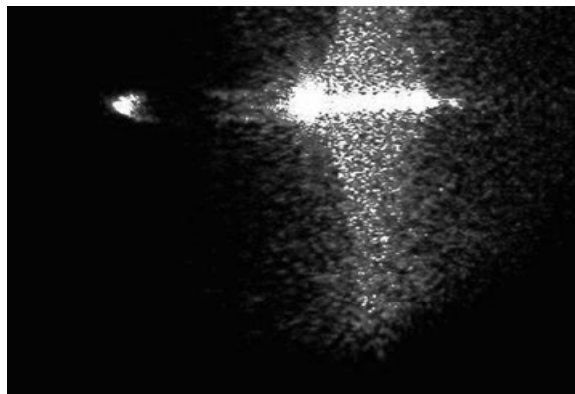


Рис. 8

Результаты. В ходе работы была изучена динамика роста/образования полимерных микроэлементов на торце оптического волокна. Одной из особенностей полученных образцов является то, что ширина всех элементов начиная с третьего этапа формирования приблизительно равна полуширине световедущей жилы. Это может быть объяснено следующим образом: после достижения порогового значения энергии процесс полимеризации протекает непрерывно и сопровождается плавным изменением показателя преломления, которое начинается после разрыва связей и образования свободных радикалов [5]. На рис. 9 приведена зависимость показателя преломления композиции n от экспозиции (E).

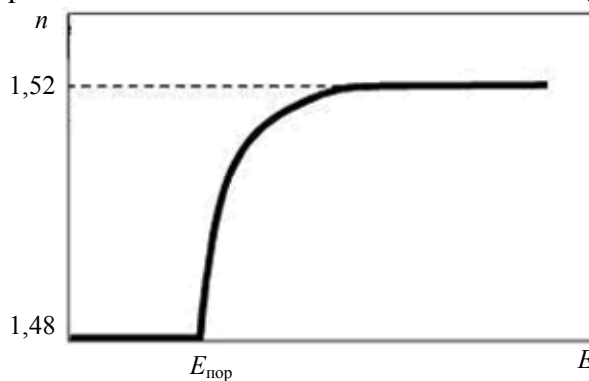


Рис. 9

Увеличение показателя преломления обусловлено увеличением общего числа связей в единице объема и более плотной упаковкой молекул. Для данного состава разница показателей преломления составляет 0,04 (1,48 для мономерной композиции и 1,52 — для полимера). В итоге наблюдается эффект самофокусировки света в среде, т.е. образование волновода, сердцевинкой которого является полимер, а оболочкой — мономерная смесь. Известно, что даже при полном внутреннем отражении свет выходит за границу вещества на расстояние, равное половине длины волны, и следовательно, можно было бы ожидать медленного роста элемента и в ширину. Однако этого не происходит, поскольку энергии вышедшего светового излучения недостаточно для выжигания кислорода, инициирования радикалов и начала полимеризации. Также направленному росту элемента способствует мономер с линейной структурой 2-carboxyethyl acrylate, присутствующий в композиции. Он содержит химически активные по

отношению к кварцу кислотные группы, что обеспечивает взаимодействие полимера с оптоволоконным торцом.

В ходе работы было установлено, что радиус кривизны формируемого микроэлемента увеличивается при увеличении экспозиции, рис. 3—5 иллюстрируют эту закономерность.

Исследования качества полученных элементов показали, что технология изготовления нуждается в доработке и оптимизации: потерь в самом микроэлементе не наблюдается, что подтверждает его волноводную структуру, зато имеются существенные потери на границе сопряжения микроэлемента и оптического волокна. Потери могут быть снижены за счет химической обработки торца, подбора мономерной композиции с показателем преломления, более близким по значению к показателю кварцевой сердцевины — 1,46. Также эффективным может оказаться изменение способа ввода излучения в волокно. Другой подход заключается в уменьшении размера мономерной капли и использовании минимального времени экспозиции, что позволит получить квазисферический элемент (см. второй этап формирования элемента).

Заключение. В работе исследованы процессы фотополимеризации композиции под действием света, выходящего из торца оптоволоконного при нанесении композиции на торец, и проведено экспериментальное исследование фокусировки света, выходящего из торца оптоволоконного сформированной микролинзой, и показано, что микролинза имеет длину фокуса около 400 мкм.

Показано, что наблюдаемые потери света в микроэлементе, сформированном по данному методу, определяются диаметром самоорганизованного фокуса и центральной жилы оптоволоконного, потери в самом элементе практически отсутствуют.

Работа выполнена при поддержке проекта Рособразования РПН 2.1.1.3937.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейко В. П., Березин Ю. Д., Чуйко В. А., Кромин А. К. Лазерные технологии формирования волоконно-оптических инструментов // Изв. РАН, сер. физическая. 1997. Т. 61, № 8. С. 1627—1631.
2. Вейко В. П., Петров А. А. Применение волоконных микролинз для повышения оптических межсоединений // Лазерные технологии. 2008. № 3. С. 68—84.
3. Yang Y., Lee J., Reichard K., Ruffin P., Liang F. Fabrication and implementation of a multi-to-single mode converter based on a tapered multimode fiber // Optic Communications. 2005. N 249. P. 129—137.
4. Schiapelli A., Kumar R., Prasciolu M., Cojoc D., Cabrini S. Efficient fiber-to-waveguide coupling by a lens on the end of the optical fiber fabricated by focused ion beam milling // Microelectronic Engineering. 2004. N 73—74. P. 397—404.
5. Hocinea M., Bachelot R., Ecoffet C., Fressengeasa N., Royer P., Kugel G. End-of-fiber polymer tip: manufacturing and modeling // Synthetic Metals. 2002. N 127. P. 313—318.
6. Bachelot R., Ecoffet C., Deloie D., Royer P. Integration of micrometer-sized polymer elements at the end of optical fibers by free-radical photopolymerization // Appl. Opt. 2001. Vol. 40, N 32. P. 5860—5871.
7. Плеханов А. И., Шелковников В. В. Оптические волокна с концевыми фотополимерными микролинзами // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1, № 1—2. С. 240—244.
8. Fokina M. I. Optical surface making by UV-curing of monomeric compositions in near field of coherent light source // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2007. Vol. 468. P. 385—394.
9. Fokina M. I., Burunkova J. E., Denisuk I. Yu. Influence of Photoactive Additive on Growth of Polymer Microelements on the top of Optical Fiber // Proc. SPIE. 2007. P. 6732—6740.
10. Fokina M. I., Kaporskiy L. N., Denisuk I. Yu. Nature of Microelements Self Writing in Fiber Tips in UV-Curable Composites // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2008. Vol. 497. P. 236—240.
11. Andrzejewska E. Photopolymerization kinetics of multifunctional monomers // Prog. Polym. Sci. 2001. Vol. 26. P. 605—665.

Сведения об авторах

- Мария Ивановна Фокина** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики наноразмерных систем; ассистент; E-mail: mari2506@rambler.ru
- Нина Олеговна Собошук** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики наноразмерных систем; инженер; E-mail: daedraazura@gmail.com
- Игорь Юрьевич Денисюк** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики наноразмерных систем; заведующий кафедрой; E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптики наноразмерных систем

Поступила в редакцию
23.03.10 г.

УДК 621.383.4

Э. С. ПУТИЛИН, Л. А. ГУБАНОВА

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОПТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Рассмотрены основные проблемы конструирования и изготовления многослойных систем, предназначенных для формирования энергетических характеристик оптических элементов и волнового фронта прошедшего и отраженного излучения.

Ключевые слова: *оптические покрытия, просветляющие покрытия, светораспределительные, зеркальные, поляризующие, градиентные слои.*

Использование оптических приборов и методов исследования в различных областях науки и техники приводит к необходимости создания многослойных диэлектрических, металлodieлектрических систем, удовлетворяющих различным требованиям к их свойствам и возможному их сочетанию. Это, в первую очередь, оптические, физико-механические, химические и другие свойства. Оптические свойства определяются спектральными зависимостями энергетических или амплитудных коэффициентов пропускания (отражения). Амплитудные и энергетические коэффициенты пропускания (отражения) являются функцией показателя преломления, оптической толщины и порядка расположения слоев на поверхности оптического элемента. В зависимости от сочетания этих параметров могут быть получены зеркальные, просветляющие, фильтрующие, свето- и спектроделительные, градиентные и фазово-компенсирующие покрытия.

На современном этапе развития фотоники, оптоинформатики, оплотехники, лазерной оптики требования к оптическим свойствам покрытий существенно расширяются. Следует упомянуть часто противоречивые требования: во-первых, непрерывно увеличивающийся спектральный диапазон (несколько сотен нанометров) работы приборов, во-вторых, существенное сужение спектрального диапазона (несколько десятых нанометра), в-третьих, возможность работы в нескольких спектральных диапазонах. Помимо этого ужесточаются требования к лучевой, механической, химической стойкости и прочности покрытий. Отдельной проблемой является необходимость сочетания способности формировать не только спектральные характеристики, но и форму волнового фронта отраженного (прошедшего) излучения. Многослойные покрытия, нанесенные на преломляющие и отражающие грани оптических элементов, позволяют формировать не только спектральные зависимости с заданным распределением энергетических коэффициентов пропускания и отражения, но и форму

волнового фронта отраженного или прошедшего излучения. Это может быть обеспечено благодаря уникальным свойствам тонкопленочных систем. Незначительная масса и относительная простота их реализации позволяют широко применять интерференционные покрытия. В некоторых случаях оптические элементы с нанесенными на них покрытиями работают в сходящихся или расходящихся пучках. Оптические свойства многослойных диэлектрических систем в значительной степени зависят от угла падения излучения на них. При увеличении угла падения спектральные зависимости смещаются в коротковолновую область и деформируются. Степень деформации спектральных кривых зависит от поляризации падающего излучения [1]. При изменении толщины слоев, формирующих диэлектрические системы, происходят аналогичные изменения. Поскольку энергетические характеристики покрытий зависят от угла падения на них излучения, то ужесточаются требования к поляризационным свойствам оптических покрытий. Отдельную задачу представляет собой осаждение покрытий на нестойкие стекла, кристаллы и полимеры. В настоящее время выделяют следующие большие группы покрытий.

Просветляющие покрытия. Основная, почти классическая, задача просветляющих покрытий — увеличение рабочего спектрального диапазона и уменьшение остаточного отражения в зоне прозрачности подложки (20—100 нм, интегральный коэффициент отражения не более 0,5 %) [2]. Для деталей, работающих в различных приборах, необходимо обеспечить минимальное отражение, часто близкое к нулю на одной, двух длинах волн или в их интервале. Для одной длины волны эта задача реализуется в большинстве случаев. В двух длинах волн структура покрытия определяется как расстоянием между рабочими длинами волн, так и показателем преломления материала, из которого изготовлена оптическая деталь. Уменьшение коэффициента отражения в заданном интервале длин волн в первую очередь определяется его шириной, т.е. величиной отношения длинноволновой границы к коротковолновой 1:2, 1:3, 1:4 и т.д. При создании покрытий, работающих в широком спектральном диапазоне, включающем ультрафиолетовую, видимую и ближнюю инфракрасную части спектра, решение задачи увеличения диапазона осложняется тем, что оно существенно зависит не только от показателя преломления просветляемого материала, но и его зоны прозрачности последнего.

Количество стабильных, химически устойчивых, стойких к воздействию внешней атмосферы пленкообразующих материалов невелико. Основную сложность вызывает отсутствие прозрачных в широкой спектральной области пленкообразующих материалов с большим показателем преломления. Наибольшие сложности возникают при создании антиотражающих покрытий на оптических материалах с малым показателем преломления и прозрачных в ультрафиолетовой части спектра. Однако при использовании современных методов синтеза оптических покрытий (определение числа, порядка расположения, оптической толщины и показателей преломления слоев) удается создавать конструкции, обеспечивающие заданные требования [3, 4]. Такие конструкции содержат слои, толщина которых не превышает нескольких нанометров, что вызывает значительные технологические сложности, связанные как с контролем толщины слоев в процессе их изготовления, так и со стабильностью параметров пленок во времени. Это требует создания новых методов контроля толщины слоев в процессе осаждения и исследования изменения свойств этих слоев в процессе эксплуатации [5—8].

Не меньший интерес в последнее время вызывают покрытия, работающие в области вакуумного ультрафиолета [8]. Создание таких покрытий в настоящее время сдерживается из-за отсутствия знаний о показателях преломления пленкообразующих материалов, прозрачных в этой области спектра, и приборов, позволяющих характеризовать эти материалы с приемлемой точностью.

Особый интерес в последние годы проявляется к просветляющим покрытиям с переменным по толщине показателем преломления. Хотя свойства таких покрытий известны

очень давно, их экспериментальная реализация в промышленных условиях к настоящему времени почти отсутствует [9, 10].

Свето- и спектрорделительные покрытия. При разработке и создании спектрорделительных покрытий, особенно применяемых в оптоэлектронике и оптической связи, основная проблема заключается в уменьшении рабочего спектрального диапазона и зоны, в которой коэффициент отражения или пропускания меняется быстро (крутизна спектральной характеристики, определяемая как $dT/d\lambda$ или $dR/d\lambda$, должна иметь максимальное значение в этом диапазоне). Зоны прозрачности (шириной до нескольких десятых нанометра), подавления (до нескольких десятков нанометров) и контрастность, определяемая как отношение максимального и минимального пропускания, должны иметь фиксированное значение, определяемое эксплуатационным назначением [2].

Основная сложность, возникающая при создании таких покрытий, заключается в необходимости обеспечения минимального значения полуширины и максимального значения $dT/d\lambda$ ($dR/d\lambda$) [11]. Классический путь ее преодоления — использование систем, состоящих из большого числа четвертьволновых слоев с малой разницей в показателях преломления пленкообразующих материалов. Однако при этом зона максимального отражения уменьшается пропорционально разнице в показателях преломления. Аналогичный результат может быть достигнут при использовании материалов с большой разницей показателей преломления пленкообразующих материалов при меньшем числе слоев, что не всегда возможно в ультрафиолетовой и видимой областях спектра из-за отсутствия таких материалов. При решении этой задачи необходимо искать компромиссный вариант, позволяющий в случае разумного количества слоев достичь заданных свойств покрытия. Этот компромисс определяется свойствами пленкообразующих материалов (собственные напряжения и коэффициент термического расширения пленок) и материала подложки [12, 13].

Зеркальные покрытия. Создание систем с максимальным коэффициентом отражения на кратных и не кратных целому числу длинах волн, расширение спектрального диапазона, захватывающего области спектра от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной, как и создание узкополосных зеркал, с минимальной шириной области максимального отражения, является актуальной задачей. Задача разработки конструкции таких зеркал в принципе может быть решена с помощью современных методов синтеза многослойных диэлектрических систем. Повышение коэффициента отражения до значения, близкого к ста процентам, значительно увеличивает общую толщину диэлектрической системы, это приводит к тому, что система начинает разрушаться под действием механических напряжений, возникающих в слоях. Возможным выходом из этой ситуации является подбор пар слоев, взаимно компенсирующих как собственные, так и термические напряжения [14].

При создании широкополосных систем перспективно использование металлodieлектрических систем, подобный подход может быть использован при создании лазерных систем, если напряженность электрического поля световой волны, доходящей до металлического слоя, уменьшается на один-два порядка. Особый интерес представляют системы, в состав которых входят слои с заданным распределением показателя преломления по толщине. В таких системах нет границ разделов между слоями, изготовленными из различных материалов (это значительно увеличивает механическую прочность и лучевую стойкость покрытия), а также возможно реализовать узкополосные системы, работающие как на кратных, так и не кратных целому числу длинах волн [15].

Поляризирующие покрытия. В ряде современных приборов используется излучение как когерентных, так и некогерентных источников с определенным состоянием поляризации, что выдвигает дополнительные требования к поляризации отраженного и прошедшего светового потока. Если для лазерных источников расходимость излучения мала, то для ряда других источников она может достигать нескольких десятков градусов, также они могут обладать

достаточно большим спектральным диапазоном излучения. Это существенно ужесточает требования к конструкции многослойных систем, отражающих или пропускающих излучение с произвольным, предварительно заданным состоянием поляризации и расходимости в широком спектральном диапазоне. Воспроизводимость спектральных характеристик таких покрытий определяется точностью измерений в процессе изготовления и стабильностью режимов осаждения [16].

Степень постоянства толщины слоев многослойных диэлектрических систем определяется функциональным назначением покрытия и находится в интервале 0,01—0,0001. Эти требования к покрытиям существенно ограничивают применимость перечисленных ниже способов изготовления. В настоящее время для получения покрытий используются следующие методы: термическое (резистивное, электронно-лучевое, реактивное, лазерное) испарение веществ в вакууме, катодное (на постоянном токе, высокочастотное, ионно-плазменное) распыление в среде инертных или активных газов, осаждение из растворов пленкообразующих соединений (методы золь-гель), формирование слоев из газовой фазы, содержащей пленкообразующие соединения, травление поверхности подложек и т.д. Выбор способа определяется требованиями к равномерности толщины слоев по поверхности оптического элемента.

Наиболее распространенными в последние годы в оптической промышленности были методы резистивного и электронно-лучевого испарения веществ в вакууме. Методы катодного распыления, в том числе ионно-плазменные, в оптической промышленности использовались для ионно-плазменной обработки оптических поверхностей, окончательной чистки оптических поверхностей перед осаждением слоев, так называемые методы ионной поддержки — для создания слоев с повышенной механической прочностью [17]. Методы осаждения слоев из растворов пленкообразующих соединений активно использовались в оптической промышленности в 1950—1960-х гг. В последние годы к ним снова проявляется повышенный интерес [18, 19]. Наименее используется в настоящее время метод осаждения покрытий из газовой фазы.

Широкое использование термического испарения веществ в вакууме обусловлено наличием методов контроля толщины и показателей преломления слоев в процессе осаждения, возможностью получения пленок с заданным распределением толщины слоев по поверхности элемента, а также сравнительно небольшим временем осаждения одного слоя (скорость осаждения — порядка нескольких нанометров в секунду). Механическая прочность получаемых покрытий относится к нулевой или первой группе (электронно-лучевое испарение) и первой-второй (резистивное испарение). Способ позволяет формировать слои из материалов с любыми значениями температуры испарения.

Основной недостаток катодного распыления — малая скорость осаждения, при скоростях осаждения, сравнимых со скоростью термического испарения, происходит недопустимый разогрев деталей, изготовленных из оптического стекла, до значений, при которых деформируется поверхность.

Формирование покрытий из растворов пленкообразующих соединений — интерес к этому методу в последние годы вызван более глубоким пониманием процессов образования твердой пленки на поверхности оптического элемента, а также возможностью получения слоев с малым показателем преломления благодаря возможности управлять пористостью пленок [20]. Кроме того, легирование пленок позволяет создавать структуры с управляемым поглощением. Необходимость стабилизации свойств пленок с помощью обязательного прогрева существенно увеличивает время формирования одного слоя, однако эта проблема снимается при массовом производстве однотипных покрытий. Равномерность пленок по толщине на поверхности детали, так же как и сама толщина, определяется технологическими факторами (скорость подъема или слива жидкости).

Получение пленок травлением поверхности оптического элемента — один из первых способов создания просветляющих покрытий, широко применялся в оптической промышленности в 1930—1940-х гг., но не используется из-за наличия вредных веществ. В настоящее время к нему снова проявляется интерес в связи с возможностью получения широкополосных просветляющих покрытий, обладающих высокой лучевой стойкостью [18, 19].

Испарение веществ в вакууме позволяет получать слои с заданным распределением толщины слоя по поверхности оптического элемента, при этом точность воспроизведения градиента толщины слоя составляет несколько нанометров на миллиметр. Метод позволяет получать распределение толщины на размерах от нескольких миллиметров до сотен миллиметров с помощью простейших диафрагм, помещаемых между испарителем и деталью [20]. Для контроля распределения толщины слоя в процессе формирования возможно использовать существующие методы фотометрического контроля толщины слоев. Отсутствие пленкообразующих материалов с необходимыми значениями показателей преломления требует формирования слоев одновременно из двух или нескольких испарителей, содержащих разные пленкообразующие материалы. В процессе осаждения на поверхности оптического элемента различных пленкообразующих соединений, не вступающих в химическую реакцию, образуется пленка с показателем преломления, определяемым концентрацией паров, конденсирующихся на поверхности. Преимущество метода термического испарения заключается в том, что существует возможность определения показателя преломления слоя в каждый момент образования пленки и тем самым — управления процессом осаждения.

Градиентные покрытия. Особый тип составляют покрытия с переменным по поверхности элемента амплитудным или энергетическим коэффициентом отражения или пропускания. Одной из областей их использования является лазерная техника, в которой они могут применяться как элементы резонаторов лазеров, формирующих излучение с узкой диаграммой направленности. Конструкция таких систем (показатель преломления, оптическая толщина слоев, распределение толщины по поверхности оптического элемента) определяется требованиями к форме волнового фронта отраженного или прошедшего излучения и величиной максимального и минимального коэффициентов отражения [21, 22].

В общем виде задача одновременного формирования заданных энергетических и фазовых характеристик отраженного или прошедшего излучения с помощью многослойных тонкопленочных систем может быть сформулирована следующим образом: необходимо сконструировать многослойную систему (системы), осаждаемую на одну или несколько поверхностей оптической детали или деталей. Такая система должна иметь не только определенные (заданные) спектральные энергетические характеристики отражения (R), пропускания (T) по поверхности детали, но и формировать заданный волновой фронт отраженного или прошедшего излучения при известной форме фронта падающего излучения (управлять изменением разности фаз между падающим и отраженным по поверхности оптического элемента излучением). Для решения такой задачи необходимо применять покрытия, толщина слоев которых имеет определенное (заданное) распределение по поверхности оптической детали [22, 23].

Все вышесказанное делает проблему формирования слоев с заданным распределением толщины весьма актуальной, так как решить ее необходимо при любом способе использования оптических покрытий. Покрытие, нанесенное на искривленную поверхность (например, сферическую), должно иметь асферический профиль для того, чтобы оно могло определять спектральный состав и энергетические характеристики излучения. Естественно, изменение толщины покрытия по поверхности детали приводит к формированию фронта волны, которое должно учитываться при абберрационном расчете оптического элемента. Исключение составляют оптические поверхности, форма которых совпадает с формой фронта падающей волны. В этом случае покрытие должно иметь толщину, постоянную по поверхности подложки. Следует отметить, что имеющиеся к настоящему времени способы управления профилем

осаждаемых покрытий (например, при помощи масок-экранов) неудовлетворительны по воспроизводимости, точности и производительности, что делает необходимым поиск других, более эффективных способов получения слоев с заданными геометрическими свойствами. Основное влияние на профиль покрытия оказывают эмиссионные характеристики испарителей и расположение экранов и подложек относительно испарителей. Поэтому следует в-первых, исследовать стабильность эмиссионных характеристик испарителей, во-вторых, определить возможность описания эмиссионных характеристик испарителей аналитическими функциями, в-третьих, связать характер распределения толщины слоя по поверхности оптических элементов с эмиссионными характеристиками используемых испарителей. Нами были рассмотрены поверхностные испарители, реализующиеся при термическом и электронно-лучевом испарении [24].

Многослойные диэлектрические системы или отдельные диэлектрические и металлические слои, у которых толщина по поверхности детали изменяется по заданному закону, могут быть использованы и в качестве объектов исследования, что позволит исключить влияние технологических факторов, характеризующих условия осаждения, на оптические постоянные слоев. Под технологическими факторами обычно понимают давление и состав остаточных газов, скорость испарения пленкообразующего материала, материал подложки. Исследование многослойных систем, у которых один или несколько слоев имеют толщину, переменную по поверхности подложки, позволит разработать корректные способы определения показателей преломления и поглощения слоев. В этом случае можно пренебречь их зависимостью от длины волны падающего излучения.

Для создания градиентных лазерных зеркал необходимо установить связь между величиной коэффициента отражения на фиксированной длине волны (интервале длин волн) и изменением оптической толщины одного (нескольких или всех) слоя многослойной диэлектрической системы. Решение этой задачи позволит определить не только многослойные системы, позволяющие создать оптические элементы с заданным распределением коэффициента отражения (пропускания) по их поверхности, но и создать простые методы их экспериментального изготовления. Предлагаемые методы заключаются в использовании простейших диафрагм (экранов), помещенных на пути потока пара между испарителем и подложкой, на которую осаждаются слои с необходимым распределением [22]. Также рассмотрены варианты осаждения градиентных слоев через пульсирующие диафрагмы на оптические элементы, совершающие вращательное, в том числе планетарное, движение. Разработано несколько вариантов технологической оснастки, реализующей различные варианты осаждения слоев через простейшие диафрагмы при термическом испарении материалов в вакууме [22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Amotchkina T.* Empirical expression for the minimum residual reflectance of normal- and oblique-incidence antireflection coatings // *Appl. Opt.* 2008. Vol. 47. P. 3109—3113.
2. *Гайнутдинов И. С., Гусев А. Г., Мустаев Р. М., Несмелов Е. А., Никитин А. С.* Двухдиапазонное просветление оптических элементов для тепловизионных приборов // *Оптич. журн.* 2002. Т. 69, № 4. С. 64—66.
3. *Котликов Е. Н., Прокашев В. И., Хонинева В. В., Хонинев А. Н.* Синтез светоделительных покрытий // *Оптич. журн.* 2001. Т. 68, № 8. С. 49—52.
4. *Тихонравов А. В., Трубецков М. К.* Современное состояние и перспективы развития методов проектирования многослойных интерференционных покрытий // *Оптич. журн.* 2007. Т. 74, № 12. С. 66—73.
5. *Архипов С. А., Лысой Б. Е., Потелов В. В., Сенюк Б. Н., Чередниченко О. Б.* Комплексная технология изготовления оптических покрытий со сложным спектральным профилем // *Оптич. журн.* 2007. Т. 72, № 4. С. 66—70.
6. *Гайнутдинов И. С., Иванов В. А., Борисов А. Н., Никитин А. С., Несмелов Е. Л.* Дихроичное покрытие для спектроделительных призмных устройств // *Оптич. журн.* 2002. Т. 69, № 4. С. 60—61.

7. Гайнутдинов И. С., Иванов В. А., Борисов А. Н., Никитин А. С., Несмелов Е. А. Воспроизводимость спектральных характеристик отрезающих фильтров // Оптич. журн. 2002. Т. 69, № 4. С. 62—63.
8. Голдина Н. Д. Нанесение покрытий для лазерной оптики с помощью ионно-плазменного метода // Оптич. журн. 2003. Т. 70, № 3. С. 76—81.
9. Schulz U., Lau K., Kaiser N. Antireflection coating with UV-protective properties for polycarbonate // Appl. Opt. 2008. Vol. 47. P. 83—87.
10. Карасев В. Б., Путилин Э. С., Майа Халед. Неоднородные оптические покрытия для лазерной техники // Сб. тр. Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2000“. 2000. Т. 1. С. 25.
11. Якобсон Р. Неоднородные и совместно напыленные однородные пленки для оптических применений // Физика тонких пленок. 1978. Т. 8. С. 61—105.
12. Галькевич Е. П., Кочерба Г. И., Недоступ В. И., Ранцев А. А. Пленкообразующие материалы для новых задач современной оптики // Оптич. журн. 2006. Т. 73, № 12. С. 82—83.
13. Васильева М. Ф., Герасюк А. К., Гоев А. И., Кириленко В. В., Ноздрачев А. В., Потелов В. В., Сенник Б. Н., Сухачев А. Б. Применение новых пленкообразующих материалов — цирконата гадолиния и цирконата лютеция для получения высококачественных оптических покрытий // Оптич. журн. 2007. Т. 74, № 10. С. 79—84.
14. Гайнутдинов И. С., Несмелов Е. А., Хайбулин И. Б. Интерференционные покрытия для оптического приборостроения. Казань: Изд-во ФЭН, 2002. 592 с.
15. Гайнутдинов И. С., Несмелов Е. А. и др. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. Казань: Изд-во ФЭН, 2003. 424 с.
16. Гайнутдинов И. С., Иванов В. П., Несмелов Е. А. Назначение и свойства оптических интерференционных покрытий. Казань: Изд-во ФЭН, 2002. 112 с.
17. Гайнутдинов И. С., Мустаев Р. М., Михайлов А. В., Гусев А. Г. Влияние ионного ассистирования на эксплуатационные характеристики оптических покрытий // Оптич. журн. 2001. Т. 68, № 5. С. 29—32.
18. Суйковская Н. В. Химические методы получения тонких прозрачных пленок. Л.: Химия, 1971.
19. Kursawe M., Hofmann T. Antireflective coating on float glass for solar applications // Glass Processing Days. 2003. P. 382—384.
20. Thomas I. M. Method for the preparation of porous silica antireflection coatings varying in refractive index from 1,22 to 1,44 // Appl. Opt. 1992. Vol. 31, N 28. P. 6145—6149.
21. Путилин Э. С., Губанова Л. А., Студеникин Л. М. Синтез условий осаждения градиентных лазерных зеркал // Оптич. журн. 2003. Т. 70, № 8. С. 50—53.
22. Губанова Л. А., Карасев В. Б., Путилин Э. С. Использование подвижных диафрагм при формировании слоев переменной толщины // Оптич. журн. 2003. Т. 70, № 11. С. 45—48.
23. Губанова Л. А., Путилин Э. С. Формирование градиентных слоев на сферических подложках // Оптич. журн. 2008. Т. 75, № 4. С. 87—91.
24. Чжон Сун Ким. Эмиссионные характеристики электронно-лучевых испарителей // Оптич. журн. 2000. Т. 67, № 4. С. 100—103.

Сведения об авторах**Эдуард Степанович Путилин**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптических технологий; заведующий кафедрой; E-mail: eputilin@yandex.ru

Людмила Александровна Губанова

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптических технологий; E-mail: la7777@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптических технологийПоступила в редакцию
14.04.10 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.78

А. А. ГОРБАЧЕВ, В. В. ЗЮЗИН, М. Г. СЕРИКОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКООРДИНАТНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА ОТНОСИТЕЛЬНО РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК

Рассматриваются способы построения и алгоритмы обработки информации в многокоординатных оптико-электронных измерительных системах пространственного положения движущегося объекта относительно реперных точек, реализованных по принципу дальномера геометрического типа.

Ключевые слова: оптико-электронная система, стереоскопическая система, реперные точки, алгоритмы определения положения.

Среди многокоординатных оптико-электронных измерительных систем пространственного положения движущегося объекта относительно реперных точек оптимальной по точности и условиям работы является система, реализованная на основе дальномера геометрического типа. Такая система может содержать один или два матричных приемника оптического излучения (МПОИ). В первом случае два изображения движущегося объекта формируются на едином матричном поле анализа посредством двух независимых оптических каналов, содержащих пентапризмы, разнесенных на величину базы [1]. Для реализации схемы с двумя МПОИ необходимо в каждом из каналов разместить фотоприемный модуль, содержащий объектив и МПОИ [2].

Установлено, что для анализа погрешностей измерительной системы и связи параметров, определяющих точность и диапазоны измерений, наиболее подходит метод, основанный на решении системы нелинейных уравнений, полученных в результате прямого перспективного преобразования, однако оптимальным с точки зрения гибкости, универсальности и потенциальной точности измерения является метод, основанный на сингулярном разложении матрицы коэффициентов системы линейных уравнений.

Для повышения обнаружительной способности системы возможно использовать алгоритм распознавания бидиодной активной метки [3], который является робастным к сложным фоновым ситуациям и позволяет преодолеть трудности, возникающие при распознавании меток на основе полупроводниковых излучающих диодов в стереоскопических системах машинного зрения. Исследования, проведенные в стрессовых условиях, показали, что более чем в 84 % случаев алгоритм распознает бидиодную метку корректно. Такой показатель правильного детектирования вполне приемлем для успешного использования алгоритма в реальных условиях.

Работа осуществлялась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010 годы)“ и федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алеев А. М., Араканцев К. Г., Тимофеев А. Н., Еришова К. Б., Петуховский В. В., Петуховский С. В., Холин А. Е. Оптико-электронная система контроля по-ложения железнодорожного пути относительно реперных меток // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 18—22.
2. Пантюшин А. В., Серикова М. Г., Тимофеев А. Н. Оптико-электронная система для контроля смещений на основе реперных меток излучающих диодов // Оптик. журн. 2009. Т. 76, № 8. С. 74—78.
3. Жуков Д. В., Коняхин И. А., Усик А. А. Итерационный алгоритм определения координат изображений точечных излучателей // Оптик. журн. 2009. Т. 76, № 1. С. 43—45.

Сведения об авторах

- Алексей Александрович Горбачёв** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: gorbachyov@grv.ifmo.ru
- Вадим Васильевич Зюзин** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: vadruz@yandex.ru
- Мария Геннадьевна Серикова** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: serikovamg@gmail.com

Рекомендована кафедрой
электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
28.10.10 г.

УДК 004.925.83

К. Н. Войнов, А. Ж. Есбулатова

ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ЗАПОЛНЕНИЯ МЕЖСТЕННОГО ПРОСТРАНСТВА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

Рассматривается способ обнаружения нелегальных грузов, в межстенном пространстве пассажирских вагонов международного класса с помощью модернизированного прибора ночного видения, позволяющего оперативно определять объем спрятанных грузов.

Ключевые слова: сканирование, системы диагностики и измерений, прибор ночного видения, визуальная оценка, модернизация.

Настоящая работа посвящена исследованию методов диагностики пассажирских поездов при погранично-таможенном контроле с использованием различных приборов и датчиков с целью определения процентной плотности заполнения объема между корпусом кузова и внутренней обшивкой вагона для обнаружения нелегальных товаров/объектов.

Пассажирские поезда международного сообщения оказались весьма удобным объектом транспортировки запрещенных грузов (наркотики, взрывчатые вещества и многие другие товары) и людей (нелегалов) в разные страны. Такому положению дел „способствует“ конструктивное исполнение пассажирских вагонов — наличие пустот между внутренней обшивкой и корпусом кузова позволяет заполнять их товарами или объектами, меняя характеристики объемной плотности пространства.

Технические средства таможенного контроля на практике оказываются малоэффективными. Во-первых, у пограничников и таможенников нет возможности заглянуть за каждую панель обшивки вагона, так как их все следует демонтировать, а затем вновь закрепить на

прежних местах, что в десятки раз увеличит и без того большие простои подвижного состава на пропускных пунктах. Во-вторых, традиционные датчики и применяемые методы не обеспечивают быстрой и качественной проверки межстенного пространства. Они часто требуют создания специальных устройств для диагностики, хранения и передачи информации, что в опытных руках злоумышленников-профессионалов позволяет им стирать или блокировать реальные данные досмотра. Поэтому экономические потери оказываются и для государства, и для пассажиров огромными.

Измерение физической величины (в данном случае — объема межстенного пространства) есть совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины. Метод сравнения реализуется в виде дифференциального способа, нулевого, метода совпадений, измерения замещением, противопоставления или измерения дополнением. При отсутствии механического контакта следует учитывать особенности „бесконтактного съема измерительной информации“ — оптические искажения в воздухе, ослабление сигнала на расстоянии и т.д.

Датчики объема — целая группа современных устройств, различных по принципу действия, конструкции и зоне охвата. Датчик представляет собой часть измерительной системы, имеющую самостоятельное конструктивное оформление, но вместе с тем обеспечивающую достижение полезного эффекта только при наличии всех других средств, входящих в систему. Датчики объема контролируют зону действия на движение. Если в зоне действия объемного датчика происходит движение, то датчик срабатывает. Действие датчиков можно разделить на две группы: пассивные и активные. Наибольшее распространение получили пассивные датчики. К активным датчикам движения относятся микроволновые движения. Их принцип действия заключается в излучении и приеме высокочастотных электромагнитных волн.

Как показал обширный анализ всевозможных вариантов известных датчиков и систем контроля, они не могут быть эффективно применены для измерения и визуализации плотности заполнения грузами межстенного пространства пассажирских вагонов международного класса. Поэтому был разработан и успешно апробирован новый способ диагностического контроля и измерения с помощью модернизированного прибора ночного видения. Этот прибор позволяет просматривать межстенное пространство без демонтажа панелей обшивки, выполненных из пластмассы, пропускающей инфракрасный спектр. При дневном или искусственном освещении невозможно наблюдать межстенное пространство, где проходят различные коммуникации (трубы, провода, кабель). Наконец, чтобы обеспечить осмотр межстенного пространства в светлое время, прибор ночного видения дооборудован телескопическим рукавом, прижатие которого к обшивке позволяет быстро и точно оценивать и измерять возможный объем заполнения пространства нелегальным товаром. При такой процедуре время простоя вагона сокращается в 5 раз.

Сведения об авторах

Кирилл Николаевич Войнов

— академик, д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения, кафедра теории механизмов и робототехнических систем; E-mail: forstar@mail.ru

Алтын Жоламановна Есбулатова

— аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения, кафедра теории механизмов и робототехнических систем; E-mail: ktmrs@pgups.edu

Рекомендована кафедрой
теории механизмов и
робототехнических систем

Поступила в редакцию
13.01.11 г.

А. В. СЕМЁНОВ, А. В. БУХАНОВСКИЙ

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ

Рассматриваются особенности экспериментального определения количественных и статистических характеристик виртуальных социальных сообществ в сети Интернет.

Ключевые слова: социальная сеть, виртуальные сообщества, погрешность измерений, статистические измерения.

Современный Интернет в свете парадигмы Web 2.0 характеризуется интенсивным развитием социальных сетей. Социальная сеть представляет собой структурированный web-сайт, включающий в себя профили пользователей (информация, представленная ими самостоятельно), связанные между собою различными способами („друзья“, „поклонники“ и пр.). В настоящее время крупнейшей социальной сетью в мире является сеть Facebook (около 500 млн пользователей). Русскоязычная социальная сеть vkontakte.ru содержит около 100 млн пользователей и является одним из самых популярных web-сайтов России. Помимо этого существует значительное число тематических социальных сетей меньшего размера, включая профессиональные виртуальные сообщества [1].

Социальные сети являются принципиально новым объектом социологических измерений, поскольку представляют собой виртуальные „слепки“ общественных отношений в сети Интернет, воспроизводящие с определенной долей достоверности структуру контактов между людьми в реальном обществе. С этим связано появление новых методов экспериментальных исследований, в частности, метода виртуальных этнографий [2]. Однако их продвижение требует развития соответствующего метрологического обеспечения, гарантирующего проведение различных измерений с заданной точностью и достоверностью в рамках единой системы. Это позволяет на общей основе сопоставлять результаты измерений, выполненных в разное время на примере различных сетей, с использованием разных методов и средств измерений.

Одним из наиболее востребованных приложений анализа социальных сетей является выявление скрытых сообществ: групп пользователей, объединяемых общей *неформальной* идеей и состоящих в непосредственном общении между собой. Объектом измерений в данном случае выступает графовая структура с нетривиальными топологическими свойствами — комплексная сеть [3], ассоциированная виртуальному сообществу. Методы измерений строятся на основе алгоритмов поиска топологических структур на данном графе, а средствами измерений являются реализующие их поисковые роботы (web-crawler), выполняющие процедуру прямых измерений характеристик сообществ: их числа, количества членов, структуры связей. На их основе выполняются косвенные измерения различных топологических характеристик. В частности, внутренняя структура сообщества характеризуется такими величинами, как диаметр, средняя длина пути, коэффициенты связности и централизации, распределение степеней вершин. Напротив, для описания свойств сообщества по отношению ко всей сети используются такие характеристики, как количество связей, направленных наружу, количество внешних участников, имеющих более одной связи с членами сообщества, а также метрики, описывающие „перемычки“, или „мосты“ между отдельными слабосвязанными сообществами.

В связи с высокой вычислительной сложностью алгоритмов определения данных характеристик на всей социальной сети процедура их измерения основывается на методе двухэтапного сканирования структуры сообщества. На первом этапе средствами поисковых роботов самой социальной сети выявляются стартовые профили, формально соответствующие заданной

топологии, на втором выполняется последовательный обход смежных узлов сети с проверкой принадлежности к сообществу. Как следствие, погрешность измерений зависит от двух факторов: количества стартовых профилей на первом этапе процедуры и их релевантности формальному описанию члена сообщества. Степень релевантности определяется характеристиками алгоритма поисковой машины самой социальной сети и порождает неустранимую инструментальную погрешность измерений. Количество стартовых профилей определяет погрешность статистических измерений; ее величина обратно пропорциональна средней степени вершин в социальной сети.

Дополнительным источником погрешности измерений характеристик сообществ являются нестационарность и структурная изменчивость, связанная с процессами самоодерации и самоорганизации в социальной сети. Величина погрешности во многом определяется конъюнктурой тематики, определяющей вхождение новых членов в сообщество (например, при обсуждении каких-либо „громких“ событий) и не может быть определена априори. Для ее учета может быть использован метод последовательных серий, позволяющий итерационно уточнять значения измеренных характеристик, одновременно оценивая тенденцию изменения погрешности.

Существенная зависимость характеристик составляющих погрешности от топологии сети и внешних факторов, обуславливающих ее динамику, приводит к необходимости выполнения метрологического анализа с использованием численных алгоритмов моделирования комплексных сетей, идентифицированных по интегральным данным измерений [4]. Это дает возможность, применяя метод Монте-Карло, строить интервальные оценки выборочных оценок характеристик сообщества и обосновывать выбор числа стартовых профилей и вложенности обходов в измерительной процедуре.

Работа выполнена при частичной поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2007—2013 гг., проекта „Интеллектуальные технологии распределенных вычислений для моделирования сложных систем“, а также проектов в рамках реализации постановлений Правительства РФ № 218 „О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства“ и № 220 „О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования“.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hu D., Kaza S., Chen H.* Identifying Significant Facilitators of DarkNetwork Evolution // *J. American Society for Inf. Sci. and Techn.* 2009. Vol. 60, N 4. P. 655—665.
2. *Ameripour A., Newman M., Nicholson B. A.* Convivial Tool? // *The Case of the Internet in Iran. J. of Inf. Techn.* 2010. Vol. 25. P. 244—257.
3. *Vaccara N.* Modeling Complex Systems. NY: Springer, 2004. 397 p.
4. *Иванов С. В., Колыхматов И. И., Бухановский А. В.* Параллельные алгоритмы моделирования комплексных сетей // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2008. Т. 51, № 10. С. 5—12.

Сведения об авторах

- Александр Валерьевич Бухановский** — д-р техн. наук, профессор; НИИ Наукоемких компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики; директор;
E-mail: avb_mail@mail.ru
- Александр Владимирович Семёнов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информационных систем; E-mail: avsemyonov@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ

СООБЩЕНИЕ О КОНКУРСЕ ВЫПУСКНЫХ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ СПЕЦИАЛИСТОВ, БАКАЛАВРОВ, МАГИСТРОВ „ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. ОПТОТЕХНИКА. ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА“ 2010 г.

15-й Всероссийский конкурс выпускных квалификационных работ (ВКР) специалистов, бакалавров, магистров „Приборостроение. Опотехника. Фотоника и Оптоинформатика“ в 2010 г. проведен Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО) — базовым вузом по образованию в области приборостроения и опотехники. Конкурсы проводятся с 1996 г. в соответствии с решением Совета учебно-методического объединения по образованию в области приборостроения и опотехники (далее — Совет УМО). Для координации организации и проведения студенческих олимпиад и конкурсов в составе УМО создан Совет по студенческим олимпиадам и конкурсам. Совет собирается один-два раза в год и обсуждает методические, организационные и другие текущие вопросы организации и проведения студенческих олимпиад и конкурсов, проводимых вузами России, реализующими учебные программы высшего профессионального образования в области приборостроения, опотехники, фотоники и оптоинформатики. Советом разработана и утверждена методика оценки ВКР, поступивших на конкурс.

Конкурс выпускных квалификационных работ специалистов, бакалавров, магистров „Приборостроение. Опотехника. Фотоника и Оптоинформатика“ 2010 г. проводился в соответствии с Приказом Министерства образования и науки РФ № 199 от 12.03.2010 г. „Об организации и проведении Всероссийской студенческой олимпиады 2010 г.“, в котором утверждены сроки и регламент проведения мероприятий олимпиады. Состав оргкомитета, жюри и рабочей группы конкурса утвержден приказом ректора СПбГУ ИТМО №304-од от 06.07.2010 г. Этим же приказом утверждено Положение о конкурсе.

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

В 2010 г. в рабочую группу конкурса выпускных квалификационных работ по опотехнике, фотонике и оптоинформатике поступило 44 работы из 7 вузов РФ. Участниками Всероссийского конкурса ВКР 2010 г. стали: Казанский государственный технический университет (КГТУ) им. А. Н. Туполева (филиал „Восток“), Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО), Томский государственный университет (ТГУ), Тульский государственный университет (ТулГУ), Сибирская государственная геодезическая академия, Новосибирск (СГГА), Северо-Западный государственный заочный технический университет (СЗТУ), Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ).

Среди поступивших ВКР материалы 21 работы апробированы на конференциях различного уровня с публикацией материалов докладов. Авторами работ, представленных к награждению

дипломами конкурса, выполнено 30 докладов по тематике представленных работ на различных конференциях.

Авторы 20 работ использовали при их написании материалы научных статей и конференций.

Материалы сети Интернет использованы авторами при написании 22 работ.

Документы о практическом использовании результатов работ присутствуют в материалах 5 работ.

По результатам конкурса определены следующие победители:

- Жуков Дмитрий Валерьевич (СПбГУ ИТМО) — I место;
- Серикова Мария Геннадьевна (СПбГУ ИТМО) — I место;
- Михайлова Валентина Александровна (СГГА) — II место;
- Кухтевич Игорь Владимирович (СПбГУ ИТМО) — III место;
- Орлов Алексей Анатольевич (СПбГУ ИТМО) — IV место;
- Волынский Максим Александрович (СПбГУ ИТМО) — IV место;
- Капойко Юрий Александрович (СПбГУ ИТМО) — IV место;
- Смирнов Александр Александрович (ТГУ) — IV место;
- Торопов Никита Александрович (ТГУ) — IV место;
- Орлов Андрей Николаевич (СЗТУ) — IV место;
- Саенко Алексей Петрович (СПбГУ ИТМО) — V место;
- Толкович Дмитрий Владиславович (СПбГУ ИТМО) — V место;
- Иванов Юрий Александрович (СПбГУ ИТМО) — V место;
- Семьина Светлана Алексеевна (СПбГУ ИТМО) — V место;
- Овчинников Дмитрий Алексеевич и Кузеванов Андрей Сергеевич (СГГА) — V место;
- Орлов Алексей Анатольевич (СПбГУ ИТМО) — I место среди работ бакалавров;
- Капойко Юрий Александрович (СПбГУ ИТМО) — II место среди работ бакалавров;
- Щедрин Павел Викторович (СПбГУ ИТМО) — III место среди работ бакалавров;
- Жуков Дмитрий Валерьевич (СПбГУ ИТМО) — I место среди работ магистров;
- Серикова Мария Геннадьевна (СПбГУ ИТМО) — II место среди работ магистров;
- Михайлова Валентина Александровна (СГГА) — III место среди работ магистров;
- Кухтевич Игорь Владимирович (СПбГУ ИТМО) — III место среди работ магистров;
- Орлов Андрей Николаевич (СЗТУ) — I место среди работ специалистов;
- Толкович Дмитрий Владиславович (СПбГУ ИТМО) — II место среди работ специалистов;
- Овчинников Дмитрий Алексеевич и Кузеванов Андрей Сергеевич (СГГА) — III место среди работ специалистов;
- Данилов Сергей Вячеславович (КГТУ „Восток“) — III место среди работ специалистов;
- Гладилкин Александр Михайлович (СЗТУ) — III место среди работ специалистов;
- Данилов Максим Борисович (ТулГУ) — диплом за комплексность подхода к решению задачи;
- Иванов Дмитрий Александрович (УГАТУ) — диплом за комплексность подхода к решению задачи.

Награды вручены вместе с подарками, предоставленными спонсором конкурса: ЗАО НПФ „Уран“.

Председатель оргкомитета,
проректор по развитию СПбГУ ИТМО *В. О. НИКИФОРОВ*

Председатель рабочей группы конкурса,
рук. СПИБ *С. С. ГВОЗДЕВ*

Секретарь рабочей группы конкурса,
ст. лаборант СПИБ *Е. В. ПОПОВА*

SUMMARY

P. 5—10.

SELECTION OF THE MINIMAL SET OF CONTROLLED FACTORS TO DETERMINE SYSTEM TECHNICAL STATE

The problem of selection of the minimal set of controlled factors providing definability of specified types of system technical state, and subsequently a desired reliability of decisions made on the system validity is formulated. The proposed solution to the problem is based on the use of characteristics inherent to orthogonal vector systems.

Keywords: technical state, control attribute, dot product, orthogonal system.

Data on authors

- Valentin I. Senchenkov* — Dr. Techn. Sci., Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Special Technological Systems of Space Complexes, St. Petersburg;
E-mail: svi9@rambler.ru
- Damir R. Absalyamov* — Cand. Techn. Sci.; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Special Technological Systems of Space Complexes, St. Petersburg;
E-mail: damir73@yandex.ru

P. 11—17.

APPROXIMATE CORRECTING OPERATOR METHOD IN THE PROBLEMS OF VARIATION ESTIMATION OF SPACE VEHICLE MOVEMENT PARAMETERS

Application of variation approach to space vehicles navigation is considered. The boundary problem of optimal estimation of movement parameters is solved with the use of constructive method of approximate correcting operator. A numerical example is presented.

Keywords: navigating estimation, a boundary problem, approximate correcting operator method.

Data on authors

- Vyacheslav I. Mironov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS; Leading Scientist; E-mail: mironuv@yandex.ru
- Yury V. Mironov* — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS; Senior Scientist; E-mail: mironuv@yandex.ru
- Rafael M. Yusupov* — Dr. Techn. Sci., Professor, Corresponding Member of RAS; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS; Director; E-mail: spiran@iiias.spb.su

P. 17—25.

RECURRENT SYSTEMATIC NOISE-IMMUNE CONVERSION OF CODES: HARDWARE POTENTIALS OF LINEAR BINARY DYNAMIC SYSTEMS

The problem of matrix components formation in vector-matrix description of binary dynamic systems for noise-immune code conversion is considered. Representation basis of the matrix components is shown to depend on both checking and formative matrix of noise-immune code, as well as on the generating modular polynomial of the code.

Keywords: binary dynamic system, systematic noise-immune code, checking and formative matrix, generating modular polynomial, noise-immune code conversion.

Data on authors

- Anatoly V. Ushakov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State 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 State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics;
E-mail: yaitskayaes@mail.ru

P. 26—32.

ALGEBRAIC METHOD FOR DETERMINATION OF FULL SET OF SIMPLE CUTS IN BIPOLAR NETWORKS

The problem of determination of simple cuts in a bipolar structurally complicated network is considered. The proposed approach to the problem uses an algebraic model of the network based on cubic complexes algebra. The method makes it possible to develop a labor-effective procedure for determination of full set of simple cuts.

Keywords: bipolar network, simple cut, structural function, algebra of cubic complexes.

Data on author

- Vyacheslav T. Tozik* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Engineering and Computer Graphics; Head of the Department;
E-mail: tozik@mail.ifmo.ru

P. 32—36.

IMAGE QUALITY MEASUREMENT USING FUZZY LOGIC METHODS

An approach to image quality measurement and image improvement and image quality is described. The proposed approach uses fuzzy logic techniques, especially the method of object edge detection.

Keywords: fuzzy logic, image processing.

Data on authors

- Galina A. Polte* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: galinkan@rambler.ru
- Alexey P. Saenko* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: alexey.saenko@gmail.com

P. 37—43.

BIOLOGICAL OBJECTS AND TISSUE FUNCTIONAL ACTIVITY DIAGNOSTIC TECHNIQUE AND ITS IMPLEMENTATION

A non-invasive method of near-field high frequency sensing is proposed for investigation of functional activity of biological tissues and organs. Physical and biological principles of the method are described, measuring equipment necessary for the method implementation in a clinic is discussed. The method capabilities are demonstrated by the example of bone growth plate activity measurements in children and teenagers.

Key words: near-field high frequency sensing, bone growth plate, functional activity of cells and tissues.

Data on authors

- Yury A. Baloshin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Physics
- Anatoly A. Sorokin* — Cand. Techn. Sci.; Baltic State Technical University “Voenmech”, Department of Radioelectronic Control Systems, St. Petersburg; E-mail: an_sor@mail.ru
- Alexey V. Arsen'ev* — Cand. Med. Sci.; Children's Rehabilitation Orthopedic and Traumatological Center “Ogonyok”, St. Petersburg; Head of IV Clinical Department; E-mail: stivamat@rambler.ru
- Michael G. Dudin* — Dr. Med. Sci., Professor; Children's Rehabilitation Orthopedic and Traumatological Center “Ogonyok”, St. Petersburg; Head Doctor; E-mail: dudin@admiral.ru
- Alexander N. Volchenko* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Physics; E-mail: wolf2684@mail.ru

P. 43—46.

A MULTICHANNEL DEVICE FOR ELECTRICAL INFLUENCE ON ORGANS AND TISSUES OF GROUP OF PATIENTS

A novel device to be used in specialized hospital aimed at treatment of mass injury of people as a result of extraordinary situation is developed. The biomedical device is designed for pain syndrome relief, shock prevention, quick regeneration of bone and muscular tissue, blood microvessels, etc.

Key words: apparatus, electrical stimulation, organs and tissues, output cascade.

Data on authors

- Viktor V. Sevastianov* — Dr. Med. Sci., Professor; Mari State Technical University, Department of Radioengineering and Medical Biology Systems, Yoshkar-Ola; E-mail: cpr@mari-el.ru
- Eduard K. Kazimirov* — Mari State Technical University, Department of Radioengineering and Medical Biology Systems, Yoshkar-Ola; Engineer; E-mail: cpr@mari-el.ru

P. 46—50.

DISCRETE DIFFERENTIATION ALGORITHMS WITH INTERMEDIATE SMOOTHING OF INPUT SIGNAL COUNTS

Variance of quantization noise at the output of digital differentiating filter is shown to increase drastically with the filter order. Intermediate summation of input signal counts is proposed to reduce the quantization noise effect on derivative calculation errors.

Keywords: signal quantization, intermediate summation, discrete filtering, signal to noise ratio.

Data on author

- Sergey I. Ziatdinov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg University of Aerospace Instrumentation, Department of Information and Network Technologies; E-mail: kaf53@GUAP.ru

P. 51—54.

VOLTAGE-DIGITAL CONVERTER FOR DIGITAL VOLTMETER

Schematic of voltage-digital converter with summation of equal currents at ladder-type attenuator is proposed. The converter may be used in feedback circuit of precision digital voltmeter. Experiments carried out with a four-decade converter give ratio error of less than 0,01 %.

Keywords: digital voltmeter, voltage-digital converter.

Data on author

Valentin G. Galalu — Cand. Techn. Sci.; Taganrog Institute of Technology, Southern Federal University, Department of Automated Systems in Scientific Investigations and Experiments;
E-mail: asni@fep.tsure.ru

P. 55—60.

ANALYSIS OF DESIGN INVARIANTS FOR ANAMORPHIC ELEMENTS OF OPTOELECTRONIC SYSTEMS FOR TORSIONAL STRAIN MEASUREMENT

Invariants are considered which allow for simplification of parameters calculation of optical-electronic system with anamorphic check element. Dependence of sensitivity of torsion angle measuring system on anamorphosing parameters is studied.

Keywords: design invariants, anamorphic check elements, optoelectronic system, torsional strain.

Data on authors

Igor A. Konyakhin — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optic-Electronic Devices and Systems;
E-mail: igor@grv.ifmo.ru

Alexey D. Merson — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optic-Electronic Devices and Systems;
E-mail: mad777@grv.ifmo.ru

Alexander N. Timofeev — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optic-Electronic Devices and Systems;
E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru

P. 61—64.

AN ADVANCED DEVICE FOR FAST MEASUREMENT OF ANGLE DEPENDENCE OF LASER BEAM REFLECTION

Two optical-mechanical installations realizing the fast variation of angle of laser beam incidence upon a steady sample surface with subsequent registration of reflected beam intensity are described. Application of spherical lenses or mirrors instead of the elliptic ones lowers the device cost significantly.

Keywords: incidence angle, laser interferometry, thin films.

Data on authors

Alexey S. Ivanov — Cand. Techn. Sci.; North-West State Technical University, Department of Physics, St. Petersburg; E-mail: physics@nwpi.ru

Vasily V. Manukhov — Post-Graduate Student; North-West State Technical University, Department of Physics, St. Petersburg; E-mail: karven@list.ru

Alexander B. Fedortsov — Dr. Techn. Sci., Professor; North-West State Technical University, Department of Physics; St. Petersburg; Head of the Department; E-mail: physics@nwpi.ru

Yury V. Churkin — Cand. Techn. Sci.; North-West State Technical University, Department of Physics, St. Petersburg; E-mail: yuch58@yandex.ru

P. 65—68.

CONVECTIVE HEAT EXCHANGE IN AIR-DROPLET FLOW IN INSTRUMENT COOLING SYSTEM

Effectiveness of cooling of heat-exchange surfaces by air-droplet flow is analyzed. Approaches to realization of the method in autonomous refrigerator systems are discussed.

Keywords: transpiration cooling, heat emission factor, air-droplet flow.

Data on author

Anatoly L. Emelianov — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Refrigeration & Food Engineering, Department of Air Conditioning; E-mail: info@petroclima.ru

P. 69—75.

ANALYSIS OF POLYMERIC MICROELEMENT FORMATION ON OPTICAL FIBER END UNDER SIGNIFICANT INHIBITING INFLUENCE OF OXYGEN ON PHOTOPOLYMERIZATION PROCESS

Technology of polymeric self-organized microelements formation on optical fiber end in limited reaction volume is described. The losses in the optical coupling channel and their sources are investigated.

Keywords: optical waveguide, optical fiber, microlens, coupling, self-focusing, photopolymer.

Data on authors

Maria I. Fokina — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum-sized Systems; Assistant Lecturer; E-mail: mari2506@rambler.ru

Nina O. Sobeschuk — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum-sized Systems; Engineer; E-mail: daedraazura@gmail.com

Igor Yu. Denisyuk — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum-sized Systems; Head of the Department; E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru

P. 75—81.

PROSPECTS OF PROGRESS IN OPTICS OF THIN FILMS

The basic problems of multilayered coating design and manufacturing are discussed. The coatings in question are deposited to achieve desired energetic characteristics of optical elements and waveforms of transmitted and reflected radiation.

Keywords: optical coating, antireflection coating, splitting layer, mirror layer, polarizing layer, gradient layer.

Data on authors

Edward S. Putilin — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Technologies; Head of the Department; E-mail: eputilin@yandex.ru

Liudmila A. Gubanova — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Technologies; E-mail: la7777@mail.ru

P. 82—83.**OPTOELECTRONIC MULTICOORDINATE SYSTEMS FOR MOVING OBJECT POSITION MEASUREMENT RELATIVE TO BENCH MARKS**

Various ways of stereoscopic system construction and algorithms of position evaluation in such systems are discussed.

Keywords: optical-electronic system, stereoscopic system, bench marks, position evaluation algorithm.

Data on authors

- Aleksey A. Gorbachyov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: gorbachyov@grv.ifmo.ru
- Vadim V. Zuzin* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: vadruz@yandex.ru
- Maria G. Serikova* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: serikovamg@gmail.com

P. 83—84.**DENSITY ESTIMATION OF UNAUTHORIZED PACKING OF VOIDS IN COACH INTERWALL ROOM**

A methods is proposed for detection of illegal load in interwall room of international-class coaches with the use of a modified night vision device. The method makes it possible to estimate quickly the illegal load volume.

Keywords: scanning, diagnostic and measuring system, night vision device, visual estimation, modernization.

Data on authors

- Kirill N. Voinov* — Academician, Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State Railway University, Department of Theory of Mechanisms and Robotic Systems; E-mail: forstar@mail.ru
- Altyn Zh. Esbulatova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State Railway University, Department of Theory of Mechanisms and Robotic Systems; E-mail: ktms@pgups.edu

P. 85—86.**METROLOGICAL ANALYSIS IN SOCIAL NETWORKS**

Peculiarities of experimental study of quantitative and statistical characteristics of virtual social communities in the Internet are discussed.

Keywords: social network, virtual communities, measurement error, statistical measurements.

Data on authors

- Alexander V. Boukhanovsky* — Dr. Techn. Sci., Professor; Research Institute of Science Intensive Computer Technologies, St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Director; E-mail: avb_mail@mail.ru
- Alexander V. Semyonov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Information Systems; E-mail: avsemyonov@gmail.com