

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Сеньченков В. И., Некрасов И. Н.** Ограничения в задачах построения оптимальных алгоритмов определения технического состояния системы 5
- Диковицкий В. В., Шишаев М. Г.** Технология формирования адаптивных пользовательских интерфейсов для мультипредметных информационных систем промышленных предприятий 12

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Фисенко В. Т., Можейко В. И., Фисенко Т. Ю., Вилесов Л. Д., Фёдоров Д. А.** Метод автоматического обнаружения и прослеживания многих малоразмерных объектов в условиях априорной неопределенности 17
- Арсеньев В. Н., Лабецкий П. В.** Метод апостериорного оценивания характеристик систем управления летательного аппарата 23
- Лоскутов А. И., Бянкин А. А., Дуников А. С., Паршуткин А. В.** Метод символьной синхронизации радиотелеметрических систем в частотно-временной области 28
- Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л.** Условие и критерий устойчивости упругих чувствительных элементов герконов 34

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Балонин Н. А., Сергеев М. Б.** Вычисление матриц Мерсенна методом Пэли 38

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Северов Л. А., Пономарев В. К., Панферов А. И., Овчинникова Н. А.** Модель динамики микромеханических гироскопов на основе кольцевого резонатора в упругом подвесе 42
- Ветренко В. И., Романова Т. И., Романов А. С.** Гироскопическая стабилизация двухколесного подвижного устройства 47
- Барбанова Л. П.** Алгоритм для приемников глобального спутникового позиционирования в неоднородной атмосфере 50

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Куш С. А.** Формирование оптимальных булевых функций при аналого-цифровом преобразовании с cognate-реализацией 55

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Сушков А. Л.** Коррекция кривизны поля изображения линзы с радиальной неоднородностью показателя преломления 60

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

- Захаров И. В., Кремез Г. В., Фролков Е. В.** Экспериментальное исследование работоспособности электронных компонентов бортовой аппаратуры на космических аппаратах серии „Можаец“ 66

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- Косаревский С. В., Латыпов В. Н.** Имитационное моделирование сборки винтовых пар деталей машиностроения по данным компьютерной томографии 71
- Егоров И. М., Алексанин С. А., Федосовский М. Е., Птицына А. С.** Влияние погрешностей элементов механизма параллельных кривошипов на кинематическую точность планетарного цевочного редуктора 76

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Златов А. С., Захаров В. В.** Проведение температурных исследований на конфокальном сканирующем микроскопе 81
- Горбунова Е. В., Коротаев В. В., Ластовская Е. А.** Измерительная система для анализа оптических характеристик покрытий 83
- Марусин М. П., Протасеня Т. А.** Разработка первичного преобразователя прибора динамического индентирования для измерения механических свойств материалов 85
- Чесноков Д. В., Кочкарев Д. В., Райхерт В. А., Кузнецов М. В., Чесноков В. В.** О возможности реализации одностадийного лазерного метода микроструктурирования поверхности сапфира 87

ИНФОРМАЦИЯ 90

- SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича) 92**

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Senchenkov V. I., Nekrasov I. N.** The Restrictions in the Problem of Construction of Optimal Algorithm for Evaluation of Technical Condition of a System 5
- Dikovitsky V. V., Shishaev M G.** Technology of Construction of Adaptive User Interface for Multipurpose Information Systems at Industrial Plants..... 12

DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Fissenko V. T., Mojeiko V. I., Fissenko T. Yu., Vilesov L. D., Fedorov D. A.** An Automatic Algorithm of Multiple Small Target Tracking and Detection under Prior Target Uncertainty 17
- Arseniev V. L., Labetsky P. V.** A Method of Posterior Estimation of Characteristics of Flying Vehicle Control System 23
- Loskutov A. I., Bjankin A. A., Dunikov A. S., Parshutkin A. V.** A Method of Symbol Synchronization of Telemetric Systems in Time-Frequency Domain 28
- Labkovskaya R. Ya., Pirozhnikova O. I., Talich V. L.** Condition and Stability Criterion for Elastic Sensing Element of Hermetic Contact 34

COMPUTING TECHNIQUE

- Balonin N. A., Sergeev M. B.** Calculation of Mersenne Matrices by Paley Method..... 38

GYROSCOPIC AND NAVIGATION SYSTEMS

- Severov L. A. Ponomarev V. K., Panferov A. I., Ovchinnikova N. A.** Model of Micro-mechanical Gyroscope Dynamics Based on Ring Resonator in Elastic Suspension..... 42
- Vetrenko V. I., Romanova T. I., Romanov A. S.** Gyroscopic Stabilization of Two-Wheeled Mobile Devices 47
- Barabanova L. P.** An Algorithm for GNSS Receiver in Inhomogeneous Atmosphere..... 50

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Kushch S. A.** Generation of the Optimal Boolean Functions in the Analog-to-Digital Conversion Using Cognate-Realization 55

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Sushkov A. L.** Correction of Image Field Curvature for Lens with Radial Inhomogeneity of the Refractive Index 60

HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Zakharov I. V., Kremez G. V., Frolkov E. V.** Experimental Study of Operability of Electronic Equipment Components on Board of “Mozhaets” Series Spacecraft 66

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

- Kosarevsky S. V., Latypov V. N.** Imitation Modeling of Assembling of Screw Pairs of Machine-Building Components Based on Computer Tomography Data..... 71
- Egorov I. M., Aleksanin S. A., Fedosovsky M. E., Ptitsyna A. S.** The Effect of Manufacturing Errors in the Parallel Crank Mechanism Elements on Kinematic Accuracy of a Cycloidal Reducer 76

BRIEF NOTES

Zlatov A. S., Zakharov V. V. Performing Temperature Studies with Scanning Confocal Microscope.....	81
Gorbunova E. V., Korotaev V. V., Lastovskaya E. A. Measuring System for Analysis of Optical Characteristics of Coating	83
Marusin M. P., Protasenia T. A. Development of Primary Transducer Device Dynamic Indentation for Measurement of Mechanical Properties of Materials.....	85
Chesnokov D. V., Kochkarev D. V., Reichert V. A., Kuznetsov M. V., Chesnokov V. V. About the Possibility of a One-Step Method of Laser Microstructuring of Sapphire Surface	87
INFORMATION	90
SUMMARY	92

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

В. И. СЕНЬЧЕНКОВ, И. Н. НЕКРАСОВ

ОГРАНИЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ

Рассматриваются особенности построения алгоритмов определения технического состояния системы, оптимальных по заранее заданному критерию. Предложены формальные конструкции, описывающие как последовательность выполнения проверок контролируемых признаков, так и ограничения при оптимизации алгоритмов. Представлена оригинальная математическая постановка задачи синтеза алгоритма, оптимального по критерию максимума средней вероятности получения правильного решения о техническом состоянии системы, со всеми видами ограничений.

Ключевые слова: алгебра подмножеств, алгоритм, критерий, ограничения, оптимизация, показатель эффективности, проверка, техническое состояние.

Введение. Важнейшей составной частью диагностического обеспечения системы является алгоритм определения технического состояния. В зависимости от подходов к обработке выходных процессов системы при формировании диагностических моделей принципы построения алгоритмов могут существенно различаться. В работе [1] представлены решающие правила, являющиеся основой алгоритмов, в случае выполнения формализации выходных процессов на основе свойств пространства L_2 (пространство измеримых функций, квадратично интегрируемых по Лебегу [2]). Возникает задача формирования всех возможных вариантов последовательности выполнения проверок π_j ($j = \overline{1, n}$) контролируемых признаков (т.е. всех возможных вариантов реализации алгоритма определения технического состояния) с целью нахождения оптимального по некоторому заранее заданному критерию.

Постановка задачи определения последовательности проверок. Задано:

— множество изображений

$$\mathbf{E} = \{ \mathbf{E}_i \mid i = \overline{0, m} \} \quad (1)$$

всех видов технического состояния системы, сформированных в результате обучения [3], где

$$\mathbf{E}_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{ij}, \dots, e_{in})^m; \quad (2)$$

— распределение вероятностей

$$\mathbf{P} = \{ P(\mathbf{E}_i) \mid i = \overline{0, m} \} \quad (3)$$

на множестве видов технического состояния;

— множество проверок

$$\Pi = \{ \pi_j \mid j = \overline{1, n} \}, \quad (4)$$

при этом изображения \mathbf{E}_i заданных видов технического состояния попарно различимы между собой, т. е. выполняется условие

$$\forall \mathbf{E}_i, \mathbf{E}_f \in \mathbf{E}, i \neq f \exists \pi_j: \pi_j \in \Pi, e_{ij} \neq e_{fj}. \quad (5)$$

Условие (5) означает, что для любой пары рассматриваемых видов технического состояния системы на заданном множестве Π имеется хотя бы одна проверка, которая дает разные исходы в этих состояниях.

Координатами e_{ij} изображения (2) являются модельные (типовые) исходы выполняемых проверок π_j , соответствующие i -му виду технического состояния. Значения индекса i используются в дальнейшем следующим образом. При контроле работоспособности и поиске отказов системы значение $i = 0$ указывает на работоспособное состояние, $i = \overline{1, m}$ — на отказы функциональных элементов. При контроле правильности функционирования системы $i = 0$ обозначает состояние неправильного функционирования, а $i = \overline{1, m}$ — отдельные режимы правильного функционирования.

На основе исходных данных (1)—(5) требуется найти для каждого i -го вида технического состояния системы упорядоченное подмножество проверок $\Pi_i \subset \Pi$ такое, что

$$\Pi_i = \{\pi_j \mid \pi_j \in \Pi, \forall \mathbf{E}_i \in \mathbf{E}, \forall \mathbf{E}_f \in \mathbf{E} \setminus \{\mathbf{E}_i\}, e_{ij} \neq e_{fj}\}. \quad (6)$$

Из соотношения (6) видно, что каждое подмножество содержит такие π_j , на которых все виды технического состояния наблюдаемы, т.е. изображения попарно различимы между собой.

Формальное описание последовательности выполнения проверок. Очевидно, что множество

$$\Pi^* = \bigcup_{i=0}^m \Pi_i$$

содержит необходимые проверки для распознавания всех $m+1$ видов технического состояния. Определение технического состояния производится следующим образом: выполняется первая выбранная проверка $\pi_{j_1} \in \Pi^*$, анализируются ее результаты и на основании этого выбирается вторая проверка $\pi_{j_2} \in \Pi^*$, т.е. процесс накопления информации о состоянии системы является рекуррентным.

Следовательно, диагностирование, связанное с выполнением ряда проверок, исходы которых заранее непредсказуемы, необходимо рассматривать как случайный эксперимент [4, 5]. Универсальной математической моделью случайного эксперимента является вероятностное пространство. Применительно к рассматриваемому эксперименту его модель задается множествами

$$M = (\mathbf{E}, \mathcal{A}_{\mathbf{E}}, P, \Theta), \quad (7)$$

где \mathbf{E} — множество изображений (исходов эксперимента); $\mathcal{A}_{\mathbf{E}} = \{\mathbf{R} \mid \mathbf{R} \subseteq \mathbf{E}\}$ — алгебра* подмножеств множества \mathbf{E} , в которой элементы \mathbf{R} имеют смысл фазовых состояний моделируемого процесса;

$P = \left\{ P(\mathbf{R}) \mid P(\mathbf{R}) = \sum_{\mathbf{E}_i \in \mathbf{R}} P(\mathbf{E}_i), \mathbf{R} \in \mathcal{A}_{\mathbf{E}} \right\}$ — вероятностная мера, заданная на алгебре $\mathcal{A}_{\mathbf{E}}$;

$\Theta = \{\theta_i \mid \theta_i: \mathbf{E} \rightarrow \mathbf{R}_i, i = \overline{0, m}\}$ — множество операторов, описывающих переходы от начального фазового состояния $\mathbf{R} = \mathbf{E}$ к конечным $\mathbf{R}_i = \{\mathbf{E}_i\}$, каждое из которых содержит единственный элемент \mathbf{E}_i , соответствующий идентифицированному виду технического состояния системы.

Таким образом, \mathbf{R}_i может интерпретироваться как принятое решение о техническом состоянии, т.е. как элемент множества \mathbf{R} возможных решений о наблюдаемом техническом состоянии системы. Естественно, что и всякое фазовое состояние $\mathbf{R} \subseteq \mathbf{E}$, с одной стороны,

* Алгеброй называется система множеств, замкнутая относительно конечного числа операций пересечения этих множеств [2].

означает подмножество предполагаемых видов технического состояния, в одном из которых находится система. С другой стороны, фазовые состояния могут рассматриваться и как подмножества множества \mathbf{R} решений о техническом состоянии ($\mathbf{R} \subseteq \mathbf{R}$).

До начала диагностирования неизвестно, какой вид технического состояния системы соответствует реальному, а поэтому начальное фазовое состояние совпадает с множеством \mathbf{E} , т. е. $\mathbf{R} = \mathbf{E}$. При выполнении первой и последующих проверок контролируемых признаков из множества \mathbf{E} исключаются те $\mathbf{E}_i \in \mathbf{E}$, которые несовместимы с исходами выполняемых проверок. Таким образом, после каждой проверки размерность исходного фазового состояния $\mathbf{R} = \mathbf{E}$ сокращается. Процесс продолжается до получения конечного фазового состояния \mathbf{R}_i , содержащего единственный элемент \mathbf{E}_i , фазовые состояния, содержащие два и более элементов, в дальнейшем обозначаются через \mathbf{R}_k .

Отдельная проверка π_j при ее r -м исходе переводит процесс диагностирования из некоторого фазового состояния $\mathbf{R}_k \subseteq \mathbf{E}$ в состояние $\mathbf{R}'_{kj} \subset \mathbf{R}_k$, т.е. реализует отображение

$$\pi_j: \mathbf{R}_k \rightarrow \mathbf{R}'_{kj}, \quad (8)$$

где $\mathbf{R}'_{kj} = \{\mathbf{E}_i | \mathbf{E}_i \in \mathbf{R}_k, \pi_j = \pi'_j, r = \overline{1, \omega_j}\}$; ω_j — число исходов проверки π_j .

Для достижения конечного фазового состояния \mathbf{R}_i в общем случае требуется несколько раз выполнить отображение (8), используя разные проверки $\pi_j \in \Pi$, образующие подмножество $\Pi_i \subset \Pi$ проверок, необходимых для идентификации наблюдаемого состояния системы с одним из заданных видов технического состояния. С учетом этого всякий оператор θ_i из множества Θ , входящего в модель (7), формально может быть описан в виде композиции отображений (8), каждое из которых реализуется одной проверкой:

$$\theta_i = \prod_{\pi_j \in \Pi_i} (\pi_j: \mathbf{R}_k \rightarrow \mathbf{R}'_{kj}). \quad (9)$$

Так как первая проверка $\pi_j \in \Pi$ применяется в начальном фазовом состоянии $\mathbf{R}_k = \mathbf{E}$, а последняя приводит к получению конечного фазового состояния $\mathbf{R}'_{kj} = \mathbf{R}_i$, то правая часть выражения (9) может быть представлена в виде

$$\prod_{\pi_j \in \Pi_i} \pi_j: \mathbf{E} \rightarrow \mathbf{R}_i, \quad i = \overline{0, m}. \quad (10)$$

Известно [6], что отображение (10) может быть реализовано, если

$$\sum_{\pi_j \in \Pi_i} \dim \ker \pi_j = |F| - 1, \quad (11)$$

где $|F|$ — мощность индексного множества видов технического состояния системы ($|F| = m + 1$); $\dim \ker \pi_j$ — размерность ядра отображения (10), которое определяется выражением

$$\ker \pi_j = \{\mathbf{E}_i | \mathbf{E}_i \in \mathbf{R}_k, \pi_j = \pi'_j\}.$$

Равенство (11) является условием достижимости конечного фазового состояния \mathbf{R}_i из начального $\mathbf{R}_k = \mathbf{E}$. Оно задает правило остановки процесса диагностирования.

Целенаправленным выбором проверок с учетом их характеристик можно гибко изменять алгоритм диагностирования, придавая ему требуемые свойства. В связи с этим необходимо выбрать характеристики, от которых зависят доверие к результатам диагностирования, его оперативность и экономичность.

Характеристиками доверия являются вероятности ошибок 1-го (α_j) и 2-го (β_j) рода при выполнении проверок [5, 7]. Ошибка 1-го рода возникает, когда измеренное значение контролируемого признака не соответствует допустимому интервалу его изменения, а в результате

проверки принимается, что значение входит в допустимый интервал. Ошибка 2-го рода появляется, когда измеренное значение контролируемого признака попадает в допустимый интервал, а в результате проверки принимается, что не попадает.

Указанные вероятности образуют множества

$$\mathbf{A} = \{\alpha_j \mid j = \overline{1, n}\}, \mathbf{B} = \{\beta_j \mid j = \overline{1, n}\}, \quad (12)$$

которые включаются в модель диагностирования в качестве ее элементов.

Для выполнения проверок, а следовательно и для определения технического состояния системы, необходимы ресурсы. На этапе эксплуатации системы определяющую роль играют динамические ресурсы, прежде всего временной и трудовой, от наличия которых непосредственно зависит получение информации о техническом состоянии. Поэтому данные ресурсы и учитываются в предлагаемой модели.

Выполнение произвольной проверки требует времени на подготовку и установку контрольно-измерительного средства, подачу тестового воздействия, измерение значения контролируемого признака, обработку и интерпретацию результатов измерения. Кроме этого, требуются и подготовительные работы на системе, от которых также зависит продолжительность проверки. Например, при виброакустическом диагностировании отдельных узлов с вращательным или возвратно-поступательным движением инерционных масс установка датчиков должна производиться в непосредственной близости от этих узлов с целью уменьшения влияния помех. Для этого на системе выполняются определенные монтажные работы.

Выполнение проверок сопровождается также трудозатратами. Если величина трудозатрат указывается только для того, чтобы производить сравнение проверок по данному показателю, то могут использоваться условные единицы, которые отражают соотношения трудозатрат при выполнении различных проверок. Такие единицы и используются в дальнейшем.

Таким образом, в качестве элементов модели рассматриваются множества

$$\mathbf{T} = \{t(\pi_j) \mid j = \overline{1, n}\}, \mathbf{C} = \{c(\pi_j) \mid j = \overline{1, n}\}, \quad (13)$$

где $t(\pi_j)$, $c(\pi_j)$ — затраты времени и труда на выполнение j -й проверки.

Включение в модель (7) множеств (12) и (13), которая принимает вид

$$M = (\mathbf{E}, \mathcal{A}_E, P, \Theta, \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{T}, \mathbf{C}),$$

позволяет придавать необходимые свойства процессу принятия решений о техническом состоянии системы.

Формирование критерия оптимальности алгоритма определения технического состояния системы. Задача оптимизации алгоритма должна быть инвариантной по отношению к конкретному виду показателя эффективности \mathbf{P} , который применяется для ее решения.

Идентификация i -го вида технического состояния предполагает выполнение в определенном порядке некоторого подмножества Π_i проверок, обладающих заданными характеристиками. Целенаправленным выбором проверок контролируемых признаков для всех подмножеств Π_i ($i = \overline{0, m}$) в зависимости от их характеристик и сформулированных ограничений можно добиться экстремального значения показателя \mathbf{P} .

Очевидно, что оптимизационная задача в данном случае относится к классу комбинаторных. Каждое упорядоченное подмножество Π_i можно рассматривать как элемент алгебры подмножеств $\mathcal{A}(\Pi)$, заданной на множестве Π . Далее в рассмотрение необходимо включить множество $m[\mathcal{A}(\Pi)]$ перестановок на элементах алгебры $\mathcal{A}(\Pi)$. Это множество содержит все возможные упорядоченные сочетания проверок контролируемых признаков. Следовательно, экстремальное значение показателя \mathbf{P} необходимо искать именно на этом множестве альтернатив.

Оптимизационная задача формулируется следующим образом. Найти последовательность $(\Pi_f)_{f \in F}$ упорядоченных подмножеств проверок контролируемых признаков такую, что

$$\mathbf{P}(\Pi_f)_{f \in F} = \operatorname{extr}_{p \in m[\mathcal{A}(\Pi)]} \mathbf{P}\{((\Pi_f)_{f \in F})_p\}. \quad (14)$$

Ограничения на состав контролируемых признаков включают условие попарной различимости изображений (6) и условие достижимости конечного фазового состояния (11).

В каждом частном случае структура равенства (14) определяется тем, какое конкретное свойство принимается в качестве показателя эффективности процесса диагностирования. Пусть таким свойством является достоверность решения о техническом состоянии, т.е. его соответствие наблюдаемому техническому состоянию системы.

Тогда в качестве показателя эффективности может быть выбрана вероятность D получения правильного решения о техническом состоянии. Оптимизация должна проводиться по критерию максимума данного показателя:

$$D(\Pi_f)_{f \in F} = \max_{p \in m[\mathcal{A}(\Pi)]} D\{((\Pi_f)_{f \in F})_p\}, \quad (15)$$

при этом должны выполняться ограничения (6) и (11) на состав контролируемых признаков, а также на временные и трудовые ресурсы.

Пусть система диагностирования зафиксировала i -й вид технического состояния при условии, что наблюдаемое состояние системы также соответствует i -му виду состояния, т.е. одновременно произошли события \mathbf{E}_i и \mathbf{R}_i . Следует заметить, что события \mathbf{R}_i не могут считаться достоверным результатом из-за наличия погрешностей при выполнении проверок. Очевидно, что условная вероятность $P(\mathbf{R}_i | \mathbf{E}_i)$ представляет собой вероятность D_i получения правильного решения для i -го вида технического состояния: $D_i = P(\mathbf{R}_i | \mathbf{E}_i)$. Так как при идентификации i -го вида технического состояния реализуются проверки из упорядоченного подмножества Π_i , можно записать, что $D_i = D\Pi_i$.

В этом случае вероятность D получения правильного решения в целом для алгоритма определяется как средняя, которая аппроксимирует математическое ожидание величины D_i :

$$D = ED(\Pi_i)_{i=0, m} = \sum_{i=0}^m P(\mathbf{E}_i)P(\mathbf{R}_i | \mathbf{E}_i). \quad (17)$$

Структура ограничений оптимизационной задачи на ресурсы формируется из аналогичных рассуждений. Если $\sum_{\pi_j \in \Pi_i} t(\pi_j)$ и $\sum_{\pi_j \in \Pi_i} c(\pi_j)$ — суммарные затраты временных и трудовых ресурсов на выполнение проверок контролируемых признаков, необходимых для определения i -го вида технического состояния, то оценку математического ожидания затрат получим из выражений:

$$ET = \sum_{i=0}^m P(\mathbf{E}_i) \sum_{\pi_j \in \Pi_i} t(\pi_j); \quad EC = \sum_{i=0}^m P(\mathbf{E}_i) \sum_{\pi_j \in \Pi_i} c(\pi_j). \quad (18)$$

Затраты (18) не должны превышать максимально допустимых величин M_t и M_c соответственно.

Для того чтобы оптимизировать алгоритм определения технического состояния системы, необходимо оперировать выражением (17) в явном виде. Следовательно, должны быть выведены соотношения для вычисления вероятностей $P(\mathbf{R}_i | \mathbf{E}_j)$ как правильных решений о техническом состоянии при $i = j$, так и ошибочных ($i \neq j$).

Для идентификации произвольного вида технического состояния необходимо выполнить ряд проверок контролируемых признаков. При этом вероятности ошибок 1-го и 2-го рода зависят только от метрологических характеристик контрольно-измерительных приборов и

допусков на контролируемые признаки. Поэтому вероятности возникновения этих ошибок для разных проверок статистически независимы, что позволяет использовать формулу умножения вероятностей при вычислении общей ошибки контроля и диагностирования на множестве Π_i , исходя из этого

$$P(\mathbf{R}_i | \mathbf{E}_f) = \prod_{\pi_j \in \Pi_i} \gamma_{if}(\pi_j). \quad (19)$$

Здесь сомножители $\gamma_{if}(\pi_j)$ определяются на основе решающих правил [1] и вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода производимых проверок. При контроле функционирования системы сомножители для различных целевых задач вычисляются из следующих выражений:

$$\gamma_{if}(\pi_j) = \begin{cases} 1 - \alpha_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ij}| = \min_{f=1, m} \{|y_{ij} - e_{ff}|\}, \quad i = \overline{1, m}; \\ 1 - \beta_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ij}| = \min_{f=0, m} \{|y_{ij} - e_{ff}|\}, \quad i = 0; \\ \alpha_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ff}| = \min_{f=1, m} \{|y_{ij} - e_{ff}|\}, \quad f = 0; \\ \beta_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ff}| = \min_{f=1, m} \{|y_{ij} - e_{ff}|\}, \quad i = 0, \end{cases} \quad (20)$$

где y_{ij} — текущее значение j -го контролируемого признака, для которого принадлежность i -му виду технического состояния установлена.

При контроле работоспособности и поиске отказов выражения для определения сомножителей $\gamma_{if}(\pi_j)$ имеют вид:

$$\gamma_{if}(\pi_j) = \begin{cases} 1 - \alpha_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ij}| = \min_{f=0, m} \{|y_{ij} - e_{ff}|\}, \quad i = 0; \\ 1 - \beta_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ij}| = \min_{f=1, m} \{|y_{ij} - e_{ff}|\}, \quad i = \overline{1, m}; \\ \alpha_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ff}| = \min_{f=1, m} \{|y_{ij} - e_{ff}|\}, \quad i = 0; \\ \beta_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ff}| = \min_{f=1, m} \{|y_{ij} - e_{ff}|\}, \quad f = 0. \end{cases} \quad (21)$$

Таким образом, с учетом соотношений (19)—(21), а также ограничений (6), (11) и (18) задача оптимизации по критерию максимума средней вероятности получения правильного решения о техническом состоянии системы математически формулируется следующим образом. Найти упорядоченные подмножества $\Pi_i \subseteq \Pi$ ($i = \overline{0, m}$) такие, что:

$$ED = \max_{p \in m[\mathcal{A}(\Pi)]} \left\{ \sum_{i=0}^m P(\mathbf{E}_i) \left(\prod_{\pi_j \in \Pi_i} \gamma_{ii}(\pi_j) \right)^p \right\};$$

$$\Pi_i = \{\pi_j | \pi_j \in \Pi, \forall \mathbf{E}_i \in \mathbf{E}, \forall \mathbf{E}_f \in \mathbf{E} \setminus \{\mathbf{E}_i\}, e_{ij} \neq e_{ff}\}; \quad (22)$$

$$\sum_{\pi_j \in \Pi_i} \dim \ker \pi_j = |F| - 1;$$

$$\sum_{i=0}^m P(\mathbf{E}_i) \sum_{\pi_j \in \Pi_i} t(\pi_j) \leq M_t; \quad \sum_{i=0}^m P(\mathbf{E}_i) \sum_{\pi_j \in \Pi_i} c(\pi_j) \leq M_c.$$

Заключение. Решение задачи (22) обеспечивает максимальную достоверность определения технического состояния системы. Наиболее рациональным для решения этой задачи является метод динамического программирования [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сеньченков В. И. Решающие правила в алгоритмах определения технического состояния системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 3. С. 5—11.
2. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Физматлит, 2009. 572 с.
3. Сеньченков В. И. Модели, методы и алгоритмы анализа технического состояния. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 377 с.
4. Дмитриев А. К., Юсупов Р. М. Идентификация и техническая диагностика. М.: МО, 1987. 521 с.
5. Контроль и диагностика сложных технических систем / Под ред. В. Г. Беликова. М.: Энергоатомиздат, 1986. 104 с.
6. Ван дер Варден Б. Л. Алгебра. М.: Наука, 1979. 623 с.
7. Резчиков А. Ф., Кушников В. А., Твердохлебов В. А., Марков А. И. Информационно-измерительный комплекс для диагностирования дефектов геометрических параметров фюзеляжей вертолетов // Авиакосмическое приборостроение. 2012. № 4. С. 35—40.
8. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления / Под ред. Б. С. Разумихина. М.: Наука, 1969. 118 с.

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
- Игорь Николаевич Некрасов** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра специальных технических систем космических комплексов, Санкт-Петербург; E-mail: ponomarev igor 1985@mail.ru

Рекомендована кафедрой
специальных технических систем
космических комплексов

Поступила в редакцию
29.03.14 г.

В. В. ДИКОВИЦКИЙ, М. Г. ШИШАЕВ

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ ДЛЯ МУЛЬТИПРЕДМЕТНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Предложена технология формирования пользовательских интерфейсов, обеспечивающая повышение эффективности функционирования мультимедийных информационных систем промышленных предприятий за счет адаптации интерфейса к контексту решаемой задачи на основе модели знаний категорий пользователей.

Ключевые слова: семантика, пользовательский интерфейс, мультимедийные информационные системы.

Современные бизнес-процессы требуют аккумуляции и обновления знаний в различных предметных областях. Для принятия стратегических решений необходим эффективный доступ к нормативно-справочной информации (НСИ) промышленного предприятия, обеспечивающий также участников бизнес-процессов информацией реального времени, влияющей на принятие оперативных решений. Однако количество разнородных объектов и процессов, содержащихся в нормативно-справочной информации, требует временных и затрат пользователя на поиск и изучение множества соответствующих документов. Кроме того, затруднения вызывает семантическая разнородность, заключающаяся в том, что одни и те же процессы и объекты в различных документах описываются с разных сторон. Нормативно-справочные документы: классификаторы материалов, оборудования, регламенты — это стратегический актив компании, который промышленные предприятия используют в процессе постоянного информационного обмена. Различие в версиях документов приводит к их многочисленному дублированию на предприятии. Необходимость синхронизации фрагментированных баз данных НСИ необоснованно повышает стоимость владения программным обеспечением и снижает эффективность внедрения и использования информационных технологий, возлагая возросшую нагрузку на пользователя.

Задача повышения эффективности информационных систем промышленных предприятий за счет оперирования формализованными знаниями решается довольно давно. По данной тематике опубликовано множество статей и монографий [1—6], разработан целый ряд моделей и методов формирования и спроектированных на их основе информационных систем, которые находят широкое применение в различных областях, в том числе промышленности.

Вместе с тем создание информационных систем промышленных предприятий обеспечивает повышение эффективности (в плане сокращения времени) поиска нормативно-справочной информации. Актуальна задача создания мультимедийных информационных систем [7], способных оперативно предоставлять релевантную ожиданиям разнородных пользователей информацию. С этой целью необходимо разрабатывать технологии автоматического формирования верифицируемой базы знаний НСИ промышленного предприятия, а также технологии адаптации визуального представления базы с целью повышения эффективности поиска релевантной информации пользователями НСИ.

Модель ресурса и категории пользователей. Под информационным ресурсом промышленного предприятия понимается коллекция документов, содержимое которых (контент) оперирует некоторым множеством понятий, образующим логическую систему, или онтологию [6].

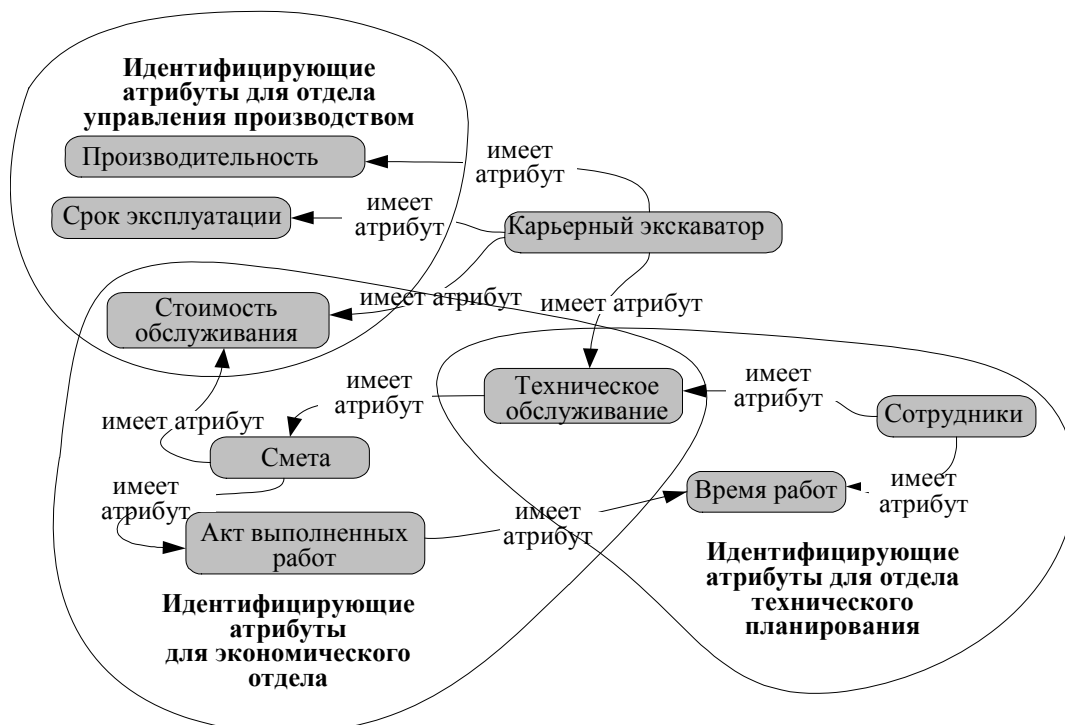
Онтология формируется заданием на данном множестве понятий C различных семантических связей L , определяющих допустимые с точки зрения составителя документа способы взаимной интерпретации понятий:

$$KB = \{C, L\}.$$

Назовем систему, описывающую контент информационного ресурса, *онтологией промышленного предприятия*. Обратим внимание, что отношения на множестве понятий онтологии могут быть как симметричными, так и асимметричными. При этом один из концептов, участвующих в двустороннем асимметричном отношении, может рассматриваться как *атрибут* другого.

Ментальная модель человека, использующего информационный ресурс, также может быть представлена в виде *онтологии пользователя*, характеризующей взаимосвязь понятий с точки зрения пользователя. Отметим, что представления различных людей об одной предметной области в целом мало различаются, что выражается в схожести структур различных пользовательских онтологий. Однако для практического использования в рамках современных информационных систем данные зависимости должны быть формализованы.

Общность представлений о некоторых объектах или задачах в профессиональном сообществе выражается в схожести ранжирования атрибутов понятий по значимости. При этом наиболее важные для пользователя атрибуты играют роль свойств, идентифицирующих объект. Например, в ментальной модели человека категории „управленец“ понятие „карьерный экскаватор“ будет идентифицироваться значениями атрибутов, характеризующих производительность и стоимость владения. В то же время для пользователя отдела технического планирования то же понятие идентифицируется атрибутами, описывающими аспекты технического обслуживания — объем и время работ, требования к квалификации персонала и т.п. (см. рисунок).



В этой связи можно определить на множестве атрибутов понятий отношение порядка, характеризующее значимость атрибута для данного пользователя. Тогда некоторое количество наиболее значимых атрибутов (в представлении конкретного человека) будет идентифицировать объект окружающего мира как принадлежащий к тому или иному классу.

Пусть C — некоторое множество понятий, U — множество пользователей. Множество атрибутов концепта c обозначим следующим образом:

$$A(c) = \{a(c)_i\}, \quad a(c)_i \in C, \quad i = \overline{1, N_c}.$$

Упорядочив множество атрибутов по убыванию степени их значимости для пользователя u , получим последовательность, характеризующую его представление об этом концепте:

$$A^u(c) = \{a^u(c)_i\}, \quad i = \overline{1, N_c} : a^u(c)_i \varphi^u a^u(c)_j, \quad \forall i \leq j,$$

где φ^u — отношение, задающее значимость атрибутов для пользователя u ; $a \varphi^u b$ означает, что для пользователя u a не менее значим, чем b .

Также можно определить группу пользователей, имеющих схожие представления о понятиях из некоторого множества C . Назовем подобную группу пользовательской *категорией* k -го порядка на множестве концептов C и определим ее следующим образом:

$$U_C^k = \{u \mid \{a^u(c)_i\} = \{a^{u'}(c)_i\}, \quad i = \overline{1, k}, \forall c \in C, \forall u' \in U_C^k\}.$$

Модель навигационного интерфейса. Пользовательский интерфейс ресурса имеет две основных составляющих — оформление (дизайн) и навигационная структура. Если качество первого является исключительно субъективной категорией и вряд ли может быть оценено формально, то для оценки навигационной структуры ресурса можно использовать степень ее соответствия ментальной модели пользователя. При этом должна рассматриваться семантика навигационной структуры (семантическая структура интерфейса). Чем более схожи семантическая структура интерфейса и ментальная модель пользователя, тем более удобным и понятным для конечного пользователя будет интерфейс. Последний в этом случае будет способен „предугадывать“ образ мыслей и визуализировать фрагмент понятийной системы ожидаемым для пользователя способом. Будем далее именовать меру соответствия семантической структуры интерфейса ментальной модели пользователя *когнитивностью* интерфейса. Далее рассматривается формализованное описание навигационной структуры и основанная на нем, требующая оптимизации, количественная оценка когнитивности пользовательского интерфейса.

Итак, пользовательский интерфейс представляет собой пару: $UI = \langle I, s \rangle$, где I — множество информационных элементов; s — навигационная структура.

Навигационная структура определяет иерархию групп информационных элементов (ИЭ) или доступных для пользователя действий. При этом на каждом уровне иерархии исходное множество информационных элементов (будем полагать, что доступное пользователю действие является частным случаем ИЭ) делится на подмножества в соответствии с одним или несколькими классификационными признаками. В качестве классификационных признаков используются атрибуты понятий предметной области. Очевидно, что при использовании на одном уровне навигационной структуры нескольких признаков полученные множества ИЭ могут пересекаться. Введем следующие обозначения:

— $\Gamma^l = \{G_i^l\}$ — множество разделов l -го уровня навигационной структуры;

— G_i^l — i -я группа информационных элементов l -го уровня навигационной структуры;

— $P^l = \{p_i^l\}$ — множество классификационных признаков, используемых для формирования групп ИЭ на l -м уровне навигационной структуры.

Использование информационной системы представляет собой поиск некоторых информационных элементов по некоторому сформировавшемуся образу. При этом образ чаще всего неточный. Вследствие этого пользователь может лишь предполагать, в какой из групп ИЭ на некотором уровне навигационной структуры находится искомый элемент. Эта уверенность тем выше, чем более точно представляет пользователь потенциальное содержимое группы.

Введем следующую функцию, задающую числовую оценку степени уверенности пользователя u (чем выше значение, тем выше степень):

$$p^u : \Gamma^l \rightarrow [0, 1].$$

Время, требуемое для доступа к искомому информационному элементу в рамках навигационной структуры на l -м уровне, оценим как

$$O \left(\frac{\max_i |G_i^l|}{p^u(G_i^l)} \right).$$

Таким образом, степень уверенности пользователя в принадлежности информационного элемента к той или иной группе определяет качество интерфейса, скорость доступа к требуемой информации.

Сделаем следующее предположение: если для формирования навигационной структуры на некотором уровне иерархии используются идентифицирующие атрибуты, то пользователь с высокой долей уверенности сможет определить, в какой группе находится искомый информационный элемент. Обозначим через $w^u(a) \in [0, 1]$ нормированный вес атрибута a в ментальной модели пользователя u , тогда

$$p^u(G_i^l) = \max_{a \in P^l} w^u(a),$$

т.е. предполагается, что если на l -м уровне используется несколько классификационных признаков для группирования информационных элементов, то пользователь оперирует той частью навигационной структуры, которая определяется наиболее значимым, с его точки зрения, атрибутом понятия верхнего уровня.

Пусть навигационная структура интерфейса имеет глубину \hat{l} уровней. Тогда для количественной оценки когнитивности интерфейса пользователем u можно применять сумму:

$$\sum_{l=1}^{\hat{l}} p^u(G_i^l).$$

Такая мера может использоваться для оценки уже существующих интерфейсов, когда известно значение \hat{l} . Для решения прямой задачи, т.е. структуризации исходного множества информационных элементов в рамках навигационной структуры, требуется учитывать дополнительные ограничения. Эти ограничения обусловлены особенностями эффективного восприятия человеком множества объектов одновременно. Вследствие этого необходимо ограничивать размер группы информационных элементов, а также глубину навигационной структуры.

С учетом сказанного оптимальная для пользователя u структура интерфейса есть решение следующей задачи с ограничениями:

$$\max_s \sum_{l=1}^{\hat{l}(s)} p^u(G_i^l), g(s) \leq K, \hat{l}(s) \leq K'.$$

Здесь $\hat{l}(s)$ — количество уровней в навигационной структуре s ; $g(s)$ — максимальный размер группы информационных элементов $\hat{l}(s)$ -го уровня в навигационной структуре s ; K — когнитивная константа, определяющая максимальное число одновременно предъявляемых пользователю информационных элементов для их эффективного восприятия; K' — когнитивная константа, определяющая максимальное число уровней навигационной структуры, в рамках которых поиск информации для пользователя остается комфортным.

Заключение. Рост объемов информации, обрабатываемой современными системами, обуславливает необходимость развития технологий оперативного доступа в ней. Одним из

путей решения этой задачи является построение адаптивных интерфейсов, способных предоставить пользователю необходимый функционал для оперирования большими массивами данных, в соответствии с его информационными потребностями. В настоящей работе рассмотрена технология построения адаптивных интерфейсов мультимедийных информационных систем на основе оценки качества интерфейса как меры соответствия навигационной структуры ментальной модели пользователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Acker L., Porter B.* Extracting viewpoints from knowledge bases // The 12th National Conf. on Artificial Intelligence. 1994. P. 547—552.
2. *Гаврилова Т. А., Гулякина Н. В.* Визуальные методы работы со знаниями: попытка обзора // ИИ и принятие решений. 2008. № 1. С. 19—33.
3. *Гаврилова Т. А., Гулякина Н. В., Голенков В. В.* Технология проектирования интеллектуальных систем // Информационные системы и технологии (IST'2009): Матер. V Междунар. конф.-форума Ч. 2. Минск: А. Н. Вараксин, 2009. С. 93—96.
4. *Когаловский М. Р.* Перспективные технологии информационных систем. М.: Компания АйТи, 2003. 288 с.
5. *Тузовский А. Ф.* Разработка систем управления знаниями на основе единой онтологической базы знаний // Изв. ТПУ. 2007. № 2.
6. *Смирнов А. В., Пашкин М. П., Шилов Н. Г., Левашова Т. В.* Онтологии в системах искусственного интеллекта: способы построения и организации // Новости искусственного интеллекта. 2002. № 1. С. 3—13.
7. *Диковицкий В. В., Ломов П. А., Сепеда-Эррера Р. Р., Шишаев М. Г.* Современные методы создания мультимедийных веб-ресурсов на базе визуализации и обработки формализованной семантики // Вестн. Кольского научного центра РАН. 2011. № 3. С. 63—73.

Сведения об авторах

Владимир Витальевич Диковицкий

— Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра Российской академии наук; младший научный сотрудник;
E-mail: dikovitsky@iimm.kolasc.net.ru

Максим Геннадьевич Шишаев

— д-р техн. наук, доцент; Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра Российской академии наук;
E-mail: shishaev@iimm.kolasc.net.ru

Рекомендована
Институтом информатики и
математического моделирования
технологических процессов

Поступила в редакцию
06.12.13 г.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.397

В. Т. ФИСЕНКО, В. И. МОЖЕЙКО, Т. Ю. ФИСЕНКО,
Л. Д. ВИЛЕСОВ, Д. А. ФЁДОРОВ

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРОСЛЕЖИВАНИЯ МНОГИХ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рассмотрена задача многоцелевого сопровождения объектов в условиях априорной неопределенности временных и пространственных характеристик при минимальном времени обнаружения объекта. Разработан стробовый метод обнаружения целеподобных отметок, позволяющий формировать треки многих объектов. Объекты могут быть расположены на малом расстоянии друг от друга при большом диапазоне возможных межкадровых смещений объектов и высоком уровне помех. Принято допущение, что на последовательности 3—5 видеокadres трек можно аппроксимировать линейной функцией. Эффективность метода подтверждена экспериментально по синтезированным последовательностям.

Ключевые слова: обнаружение объектов, автоматическое слежение, многоцелевое сопровождение объектов.

Введение. Одной из важнейших задач систем наблюдения и управления является обнаружение малоразмерных и точечных динамических объектов и оценка их траектории (прослеживание) во времени. В работе [1] рассмотрены вопросы обнаружения малоразмерных объектов по выявленным трекам при низком отношении сигнал/шум на основании стробового метода. Этот метод можно отнести к так называемым методам „сопровождения до обнаружения“ (Track Before Detect, TBD). В отличие от классического сопровождения, при котором решение о наличии объекта принимается по каждому кадру на основе внутрикадровой обработки, при использовании метода TBD анализируется ограниченная последовательность кадров, и решение принимается на основании накопленной информации по последнему кадру последовательности. Обработка производится по скользящей последовательности кадров, результат обработки формируется по каждому кадру (с первоначальной задержкой, определяемой длиной последовательности).

На рис. 1 приведен пример формирования трека по последовательности из N кадров (a — последовательность кадров, b — накопленный трек; крестиком отмечены объекты, точками — помехи).

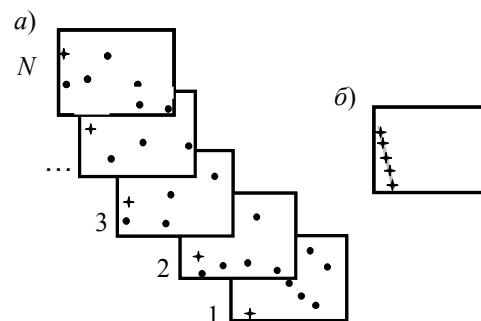


Рис. 1

Первичная внутрикадровая обработка предназначена для выявления точечных объектов на основе автоматического выделения областей целеподобных объектов, адаптивного порогового ограничения и оценки центра тяжести. В результате первичной обработки формируется бинарное изображение, в котором координатам малоразмерных объектов или помех соответствует значение 1, а фону — 0. Это изображение наряду с объектами содержит существенное число помех. Далее выполняется выявление новых траекторий движения, подтверждение существующих или завершение/удаление траекторий на основании данных, накопленных по ограниченной последовательности кадров. На основании анализа принимается решение о наличии объектов интереса.

При использовании видеосистем кругового обзора динамический диапазон межкадровых смещений малоразмерных объектов существенно увеличивается по сравнению с системами секторного наблюдения [2]. Расширение диапазона возможных скоростей наблюдаемых объектов определяет увеличение размера строба. В этом случае в противоречие входят требования увеличения размера строба и обеспечения необходимой вероятности правильного обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги. Действительно, при увеличении строба возрастает число отметок, формирующих ложные треки, т.е. повышается вероятность ложной тревоги. Для обеспечения заданного уровня ложных тревог необходимо уменьшить число отметок в кадре, что достигается исключением отметок при первичной обработке с меньшим отношением сигнал/шум, это приводит к пропуску объектов с малой интенсивностью сигнала. Для возможности работы в большом динамическом диапазоне скоростей объектов авторами разработан метод, являющийся развитием стробового метода [1].

Постановка задачи. Входными данными является последовательность бинарных изображений, точечные отсчеты которых могут принадлежать либо объекту, либо помехе. Координаты единичных отсчетов определяют множество измерений:

$$\mathbf{Z}(k) = \left\{ z_j^k \right\}_{j=1}^{M_k}, \quad \forall k = [1, N],$$

где k — текущий номер кадра, N — число кадров в скользящей последовательности, M_k — число единичных отметок в k -м кадре. Задача состоит в том, чтобы из множества $\left\{ z_j^k \right\}$ выбрать те отсчеты, которые формируют трек.

Решение об обнаружении объекта принимается при отсутствии априорных данных о времени появления и исчезновения, количестве, положении и параметрах движения (направление, скорость) объекта при заданной максимальной скорости движения. Решение с оценкой координат объекта должно вырабатываться по каждому кадру последовательности и обеспечивать минимально возможную временную задержку t до принятия решения

$$t = Nt_f, \quad (1)$$

где t_f — длительность кадра.

Вектор состояния объекта \mathbf{x}_k определяет координаты объекта и оценку вектора скорости по кадру k в момент времени t_k . Предполагается, что скорость и направление движения объекта не изменяются мгновенно во времени, производится кусочно-линейная аппроксимация траектории движения объекта на скользящем временном интервале t . На рис. 2 представлен фрагмент изображения с накопленной во времени траекторией движения объекта. Точками обозначены оценки координат (y, x) в последовательности кадров $[1, \dots, N]$ длительностью t (на рис. 2 $N=4$). При кусочно-линейной аппроксимации движение объекта от кадра к кадру происходит с постоянной скоростью и описывается линейным уравнением

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k, \quad (2)$$

где $\mathbf{x}_k = [r_k \ c_k \ v_{rk} \ v_{ck}]^T$; r_k — номер строки, c_k — номер столбца; v_{rk} , v_{ck} — скорость движения объекта по строке и столбцу соответственно; „ T “ — знак транспонирования; \mathbf{F}_k — функция, описывающая траекторию (матрица перехода):

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_f & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t_f \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Под траекторией понимается множество отсчетов, полученных в N последовательных кадрах и удовлетворяющих уравнению состояния системы (2):

$$\mathbf{T}_i^k = \{z_{i_1}^{k-N+1}, z_{i_2}^{k-N+2}, \dots, z_{i_{n-1}}^{k-1}, z_{i_n}^k\}, \tag{3}$$

где i — номер траектории, $[i_1, \dots, i_n]$ — номер измерения, $i_n \leq N$.

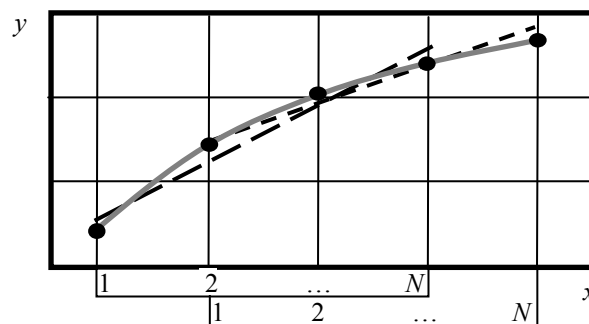


Рис. 2

Задача определения принадлежности объекта траектории решается по каждому кадру в реальном времени на основе анализа последовательности длиной N кадров. Подтверждение траектории на N кадре позволяет принять решение о том, что отсчет относится к объекту, а не помехе. Принадлежность траектории оценивается при допустимом отклонении оценки вектора состояния в кадре k от ожидаемого трека, обусловленном „нежестким“ растром в случае кругового обзора.

Строчный метод обнаружения малоразмерных объектов построен на анализе изображения в двух стробах (обобщенная структурная схема представлена на рис. 3).

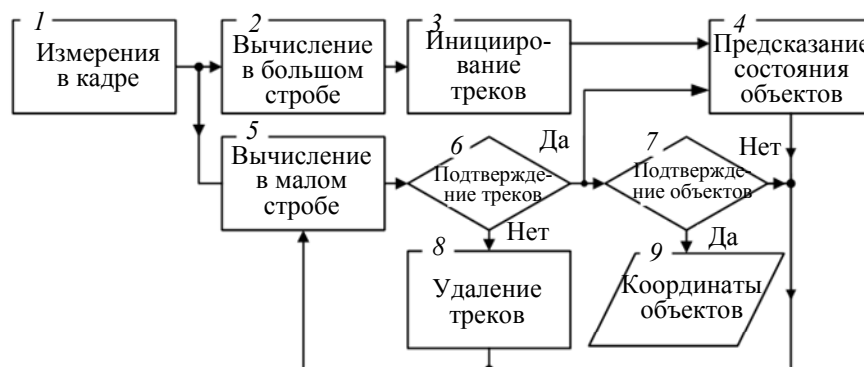


Рис. 3

Размер первого (большого) строга определяется диапазоном возможных скоростей объектов, алгоритм выполняется так же, как в работе [1]. Этот строб предназначен для инициализации трека малоразмерных (точечных) объектов. В настоящей работе под инициализацией трека понимается определение по двум смежным кадрам координат возможных объектов интереса, удовлетворяющих динамическому диапазону скоростей. В качестве меры расстояния

между объектами используется евклидова мера. Необходимо подтвердить наличие трека на последовательности еще $N-2$ кадров. Размер большого строба определяется тем, что положение движущегося объекта в текущем кадре с точностью до скорости его движения не выходит за пределы строба, центр которого совмещен с координатами объекта в предыдущем кадре. Все отсчеты, принадлежащие стробу, инициируют новый трек. Поскольку время появления объекта в кадре априори не известно, каждая отметка может оказаться объектом, поэтому положение центра большого строба определяется координатами всех отметок в предыдущем кадре (блоки 2, 3).

Координаты центра второго (малого) строба оцениваются по предсказанию положения объекта в k -м кадре на основании информации, полученной в $(k-1)$ -м кадре (см. (2)) для всех активных (иницированных и подтвержденных) треков (блок 4). Размер малого строба определяется возможной нестабильностью растра, ошибками оценки координат и допустимым ускорением объекта. Во втором стробе (блок 5) выполняется анализ с целью подтверждения треков, инициализированных в предыдущем кадре и прослеживаемых, завершения/удаления неподтвержденных треков. Подтверждается тот трек, для которого в текущем кадре в малом стробе находится отметка (блок 6). Для минимизации вероятности пропуска цели неопределенность, возникающая при наличии нескольких отметок в малом стробе, разрешается разветвлением трека и наследованием предыстории трека. Обработка в малом стробе позволяет существенно уменьшить число иницированных треков. Дополнительное снижение вероятности ложных тревог достигается проверкой линейности трека, необходимость этой проверки обусловлена размером малого строба. Для этого по методу наименьших квадратов по N отсчетам определяются параметры прямой линии и оценивается отклонение отсчетов от линии для каждой из N координат. Оценки состояния треков обновляются для каждого кадра.

Такой подход позволяет анализировать подвижные объекты (при большом диапазоне скоростей) без возрастания вероятности ложной тревоги, неизбежно возникающего вследствие существенного увеличения размера строба при работе по методу [1]. Число иницированных треков должно расти при увеличении числа ложных отметок, однако введение малого строба позволяет ослабить эту зависимость. В табл. 1 приведена зависимость суммарного числа ложных тревог за все время наблюдения от размера большого строба для последовательности из 50 кадров (1024×512 элементов), при наличии 1 объекта интереса и 100 помех в каждом кадре.

Таблица 1

Зависимость числа ложных целей от размера большого строба

Размер большого строба, элементы	41×41	61×61	81×81	101×101	121×121	161×161
Число ложных тревог	1	3	3	3	3	3

Традиционно для подтверждения трека проверяется наличие объекта в M кадрах из N наблюдаемых. Необходимость минимизации времени обнаружения объекта при заданной вероятности ложной тревоги влечет за собой требование наличия объекта, принадлежащего треку, в каждом из N кадров (блок 7), т.е. при $i_n = N$ (см. выражение (3)), координаты объекта передаются на выход (блок 9).

Решение о завершении/удалении трека обычно принимается при отсутствии объекта, принадлежащего треку, на протяжении L кадров подряд, часто $L=[3,4]$. В рассматриваемом случае $L=1$. Удаление трека производится в блоке 8. Понятно, что увеличение значения N приводит к уменьшению вероятности ложной тревоги при заданной плотности помех, малые значения N даже при некоррелированной помехе порождают ложные треки. Эта зависимость проиллюстрирована в табл. 2. Данные приведены для кадра размером 1080×1920 элементов. Размер большого строба 161×161 , малого — 23×23 элемента. Генерация точечных отметок помехи выполнена для случая равномерного распределения помехи по кадру. Общая длина

последовательности $(1000+N-1)$ кадров. Объекты в кадрах отсутствуют. Из таблицы видно, например, что для 300 помех в каждом кадре (вероятность ложной тревоги $1,44 \cdot 10^{-4}$) при $N=3$ были обнаружены ≈ 32 ложные отметки на кадр, при $N=4$ — 0,987, а при $N=5$ возникает по одной ложной отметке в 27 кадрах из тысячи.

Таблица 2

Зависимость числа ложных целей от длины последовательности N при заданной интенсивности помехи

Число помех	Число ложных тревог на кадр		
	$N=3$	$N=4$	$N=5$
100	1,297	0,010	0
120	2,086	0,024	0
140	3,274	0,044	0
160	5,031	0,090	0
180	7,138	0,146	0,003
200	9,809	0,193	0,004
220	12,768	0,305	0,008
240	16,435	0,411	0,018
260	20,699	0,610	0,016
280	25,660	0,788	0,024
300	31,550	0,987	0,027

Повышение плотности помех при сохранении размеров большого и малого стробов приводит к повышению вероятности ложной тревоги, что показано в табл. 2.

Исследование эффективности метода. Были синтезированы видеопоследовательности треков при задаваемом числе отметок помех для сценариев с одним, двумя или многими объектами, для случая пересечения траекторий движения объектов и расщепления траектории. Траектория задавалась линейной функцией при распределенной по нормальному закону ошибке координат. Координаты помеховых отметок распределялись в кадре по равномерному закону. При синтезе последовательности формировался тестовый список координат объектов для каждого кадра. Размер последовательности составлял 25—100 кадров. Оценка эффективности производилась путем сопоставления тестового списка и списка обнаруженных по разработанному методу объектов. Кроме этого, формировалось накопленное в течение последовательности изображение полученных треков. На рис. 4 представлено накопленное изображение координат обнаруженных объектов для семи целеподобных отметок, две из которых (1 и 7) неподвижны, лишь подвержены случайному смещению в допусках ошибок оценок координат объекта, нестабильности раstra и пр.

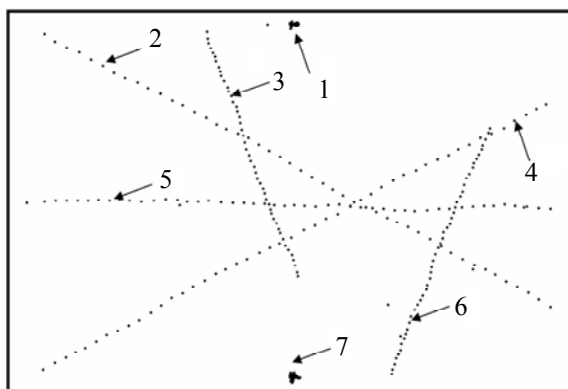


Рис. 4

Размер тестового изображения 768×512 , синтезировано 75 помеховых отметок в каждом кадре последовательности. Длина последовательности 50 кадров, длина последовательности для принятия решения — 4 кадра. В эксперименте треки всех объектов отслежены.

Выводы. Разработан метод обнаружения объектов, основанный на выявлении трека с использованием стробового метода. В методе использовано допущение, что на небольшой последовательности видеокадров трек можно аппроксимировать линейной функцией. Обнаружение объекта производится после анализа N кадров последовательности. Время возникновения и исчезновения объекта неизвестно, число обнаруживаемых объектов не ограничено и неизвестно. Метод эффективен при большом динамическом диапазоне возможных скоростей объектов интереса. Сокращение длительности последовательности снижает требования к линейному характеру траектории, поскольку линейность должна выполняться лишь в скользящем окне короткой последовательности кадров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фисенко В. Т., Вилесов Л. Д., Можейко В. И., Фисенко Т. Ю. Обнаружение малоразмерных объектов на основании многоцелевого сопровождения по последовательности видеокадров // Сб. тр. Междунар. конф. „Прикладная оптика—2012“. СПб, 2012. Т. 1. С. 118—122.
2. Фисенко В. Т., Вилесов Л. Д., Можейко В. И., Фисенко Т. Ю. Об оценке координат межкадровых смещений в видеосистеме кругового обзора // Сб. докл. XV Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. СПб, 2012. Т. 1. С. 149—152.
3. Фисенко В. Т., Можейко В. И., Фисенко Т. Ю. Автоматическое сопровождение объектов в компьютерных системах обработки изображений // Оптический журнал. 2007. Т. 74, № 11. С. 39—46.

Сведения об авторах

- Валерий Трофимович Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; филиал ОАО „Корпорация «Комета» — «Научно-проектный Центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», Санкт-Петербург; директор; E-mail: valery@eoss.ru
- Владимир Иванович Можейко** — канд. техн. наук, доцент; филиал ОАО „Корпорация «Комета» — «Научно-проектный Центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», Санкт-Петербург; начальник сектора; E-mail: Lab2@eoss.ru
- Татьяна Юрьевна Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; филиал ОАО „Корпорация «Комета» — «Научно-проектный Центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», Санкт-Петербург; ведущий научный сотрудник; E-mail: tatiana@eoss.ru
- Леонид Дмитриевич Вилесов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра радиоэлектроники и телевидения, Санкт-Петербург; E-mail: vilesov@aanet.ru
- Дмитрий Александрович Фёдоров** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики, Санкт-Петербург; E-mail: End-ik@ya.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной фотоники и
видеоинформатики

Поступила в редакцию
03.03.14 г.

В. Н. АРСЕНЬЕВ, П. В. ЛАБЕЦКИЙ

МЕТОД АПОСТЕРИОРНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Рассмотрена задача оценивания характеристик системы управления летательного аппарата по ограниченному числу натуральных испытаний. Предложен новый метод оценивания — метод приоритета опытной информации, согласно которому вес ограниченных опытных данных больше веса практически неограниченных априорных. Получены аналитические выражения для апостериорных оценок характеристик системы управления.

Ключевые слова: летательный аппарат, система управления, характеристики, ограниченные натурные испытания.

Введение. Система управления (СУ) летательного аппарата (ЛА) должна обеспечивать решение целевых задач, поэтому к ней предъявляется ряд требований по точности, надежности и т.д. Для проверки соответствия требованиям технического задания проводятся исследования характеристик СУ на всех этапах создания системы. Получаемая при этом информация может быть условно разделена на априорную (накопленную до проведения натуральных испытаний ЛА) и опытную (полученную по результатам натуральных испытаний).

Объем априорной информации может быть сколь угодно большим, в то время как число натуральных испытаний ЛА, как правило, ограничено. С другой стороны, достоверные данные о характеристиках СУ могут быть получены только по результатам натуральных испытаний ЛА. Для повышения точности оценок характеристик СУ возникает необходимость объединения априорной и опытной информации.

Существуют различные способы апостериорного оценивания характеристик СУ [1—8]. Группа методов [2, 4, 7, 8], основанная на формуле Байеса, предполагает знание закона распределения априорных оценок характеристик СУ, причем апостериорные оценки зависят от вида этого распределения. В настоящее время нет универсальных рекомендаций по выбору априорного распределения.

Вторую группу составляют методы, основанные на использовании коэффициента значимости априорной информации, определяющего вес исходных данных в апостериорной оценке [1, 3, 5, 6]. Проблема выбора этого коэффициента в общем случае не решена.

В основе предлагаемого метода апостериорного оценивания характеристик СУ — метода приоритета опытной информации (ПОИ) — лежат два положения:

- 1) априорная информация не должна противоречить результатам натуральных испытаний ЛА;
- 2) вес априорной информации в апостериорной оценке не может больше веса опытных данных [9].

Постановка задачи. Рассматривается некоторая, в общем случае векторная, физическая величина \hat{X} , характеризующая качество функционирования СУ. Она является случайной, поскольку зависит от большого числа случайных факторов.

Полагается, что известен вид плотности распределения величины $\hat{X} \sim \varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}; \boldsymbol{\mu})$, где $\boldsymbol{\mu}$ — вектор характеристик СУ, или вектор, связанный с характеристиками СУ однозначной зависимостью (например, если исследуется точность СУ, то в качестве \hat{X} может выступать вектор отклонений фазовых координат СУ от расчетных значений, а в качестве $\boldsymbol{\mu}$ — математическое

ожидание и ковариационная матрица этого вектора; если исследуется надежность системы, то время безотказной работы может рассматриваться как \hat{X} , а среднее время безотказной работы или интенсивность отказов как μ и т.д.).

До проведения натуральных испытаний ЛА получена априорная (расчетная) оценка μ_p вектора μ . По результатам N_0 натуральных испытаний, которые представлены выборкой X_i ($i = \overline{1, N_0}$), методом максимального правдоподобия получено опытное значение μ_0 , N_0 не меньше размерности вектора μ .

Необходимо получить апостериорную оценку μ_a вектора характеристик СУ, учитывающую результаты априорных исследований и натуральных испытаний ЛА.

Формирование апостериорных оценок характеристик СУ. Объединение априорной информации и опытных данных позволяет повысить точность оценивания характеристик СУ в том случае, когда результаты исследований, проведенных до натуральных испытаний ЛА, не противоречат данным, полученным в процессе испытаний. В противном случае привлечение априорной информации может не только не повысить качество оценивания, а наоборот, исказить опытные данные.

Полагается, что априорная и опытная информация о характеристиках СУ является однородной. Это означает, что μ_p может рассматриваться как оценка, полученная по некоторой не реальной, а гипотетической выборке из совокупности с плотностью распределения $\varphi_{\hat{X}}(X; \mu)$. Формально эту выборку можно представить в виде X_{Γ_i} ($i = \overline{1, N_p}$), где N_p — неизвестное число гипотетических испытаний, а в качестве весовых коэффициентов, определяющих доли априорной и опытной информации в апостериорной оценке, использовать N_p и N_0 соответственно. Чем ближе априорная информация к результатам испытаний, тем больше ее вес, при этом всегда $N_p \leq N_0$.

Множества результатов реальных и гипотетических испытаний X_i ($i = \overline{1, N_0}$), X_{Γ_i} ($i = \overline{1, N_p}$) рассматриваются как выборки из одной генеральной совокупности с плотностью распределения $\varphi_{\hat{X}}(X; \mu)$.

Для получения апостериорных оценок характеристик СУ предлагается использовать два подхода, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.

При первом подходе вводится обобщенная функция правдоподобия

$$L = \prod_{i=1}^{N_0} \varphi_{\hat{X}}(X_i; \mu) \prod_{i=1}^{N_p} \varphi_{\hat{X}_{\Gamma}}(X_{\Gamma_i}; \mu). \quad (1)$$

Во многих практических случаях произведения, входящие в правую часть (1), могут быть представлены в виде [9]:

$$\prod_{i=1}^{N_0} \varphi_{\hat{X}}(X_i; \mu) = L(\mu_0; \mu) \text{ и } \prod_{i=1}^{N_p} \varphi_{\hat{X}_{\Gamma}}(X_{\Gamma_i}; \mu) = L(\mu_p; \mu), \quad (2)$$

где μ_0 и μ_p полагаются оценками максимального правдоподобия вектора μ , полученными по выборкам X_i ($i = \overline{1, N_0}$) и X_{Γ_i} ($i = \overline{1, N_p}$) соответственно.

Тогда обобщенная функция правдоподобия

$$L = L(\mu_0; \mu)L(\mu_p; \mu). \quad (3)$$

В качестве апостериорной оценки, учитывающей априорную и опытную информацию, берется

$$\mu_a = \arg \max_{\mu} L = \arg \max_{\mu} \ln L = \arg \max_{\mu} \ln [L(\mu_o; \mu)L(\mu_p; \mu)] = \arg \max_{\mu} \left\{ \ln [L(\mu_o; \mu)] + \ln [L(\mu_p; \mu)] \right\}.$$

Если функция плотности распределения $\varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}; \mu)$ является регулярной в смысле первой и второй производных по μ [10], то апостериорная оценка μ_a может быть определена из необходимого условия максимума L :

$$\left. \frac{\partial \ln [L(\mu_o; \mu)]}{\partial \mu} \right|_{\mu=\mu_a} + \left. \frac{\partial \ln [L(\mu_p; \mu)]}{\partial \mu} \right|_{\mu=\mu_a} = 0. \quad (4)$$

Найденная таким образом апостериорная оценка характеристик СУ фактически является оценкой максимального правдоподобия, полученной по объединенной выборке $\mathbf{X}_i (i = \overline{1, N_o})$, $\mathbf{X}_{ri} (i = \overline{1, N_p})$, и обладает всеми положительными свойствами этих оценок. Следует, однако, заметить, что не всегда удается найти решение уравнения (4) в аналитическом виде.

Второй подход является более универсальным. Он основан на том, что практически всегда элементы вектора μ могут быть выражены через начальные или центральные (если, конечно, они существуют) моменты составляющих вектора \hat{X} . Поэтому минимальный объем априорных и опытных данных определяется числом параметров в функции $\varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}; \mu)$, т.е. размерностью вектора μ . Если распределение $\varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}; \mu)$ однопараметрическое, то достаточно

найти апостериорную оценку одного вероятностного момента величины \hat{X} и по ней значение μ_a . При двухпараметрическом распределении вектор параметров μ является двумерным и для получения μ_a необходимо найти апостериорные оценки двух моментов и т.д. По апостериорной оценке μ_a вектора параметров μ и распределению $\varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}; \mu_a)$ может быть найдена апо-

стериорная оценка вероятностного момента величины \hat{X} любого порядка. Следует, однако, заметить, что в некоторых случаях возникают сложности с исследованием качества полученных апостериорных оценок характеристик СУ.

Выигрыш в точности оценивания, получаемый за счет учета результатов априорных исследований, тем больше, чем больше число гипотетических испытаний N_p , т.е. чем ближе априорная информация к опытным данным.

Определение числа гипотетических испытаний N_p . Априорная оценка μ_p вектора характеристик СУ μ не противоречит опытным данным, если справедлива многомерная статистическая гипотеза $H: \mu = \mu_p$.

Для проверки гипотезы H удобно использовать критерий отношения правдоподобия, поскольку он является равномерно наиболее мощным [10]. В качестве меры, характеризующей близость априорной оценки μ_p к опытным данным, берется величина отношения правдоподобия

$$v^* = \prod_{i=1}^{N_0} \varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}_i; \boldsymbol{\mu}) \Big|_{\boldsymbol{\mu}=\boldsymbol{\mu}_p} / \prod_{i=1}^{N_0} \varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}_i; \boldsymbol{\mu}) \Big|_{\boldsymbol{\mu}=\boldsymbol{\mu}_0} = \prod_{i=1}^{N_0} \frac{\varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}_i; \boldsymbol{\mu}_p)}{\varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}_i; \boldsymbol{\mu}_0)}, \quad (5)$$

Если величина $z^* = -2 \ln v^*$ меньше критического значения z_γ (γ — заданный уровень значимости), то принимается решение о возможности совместной обработки априорных и опытных данных. Приближенный метод проверки гипотезы H при ограниченном числе натуральных испытаний подробно рассмотрен в работе [11].

Чем ближе априорная информация к результатам испытаний, тем больше величина отношения правдоподобия (5), максимальное значение $v^* = 1$, при большом отличии априорных данных от опытных $v^* \approx 0$. В связи с этим число гипотетических испытаний N_p , определяющее вес априорной информации в апостериорной оценке, предлагается вычислять по формуле

$$N_p = v^* N_0.$$

Отсюда видно, что всегда $N_p \leq N_0$.

Пример. Исследуется надежность СУ ЛА. Время безотказной работы СУ \hat{X} имеет экспоненциальный закон распределения $\varphi_{\hat{X}}(X; \mu) = \exp(-X/\mu)/\mu$, где μ — среднее время безотказной работы. По результатам априорных исследований надежности получена оценка $\mu_p = 1000$ ч. Проведены испытания семи опытных образцов ЛА на надежность, по которым получены следующие значения времени безотказной работы: $X_1 = 1114$, $X_2 = 805$, $X_3 = 727$, $X_4 = 1009$, $X_5 = 814$, $X_6 = 732$, $X_7 = 916$ ч. Необходимо найти апостериорную оценку среднего времени безотказной работы СУ ЛА μ_a .

Оценка максимального правдоподобия, рассчитанная по данным натуральных испытаний, $\mu_0 = \sum_{i=1}^7 X_i / 7 = 874$ ч, отношение правдоподобия для проверки гипотезы $H: \mu = \mu_p$ $v^* = (\mu_0 / \mu_p)^{N_0} \exp[-N_0(\mu_0 / \mu_p - 1)] = 0,9409$, а $z^* = 0,1217$. Для уровня значимости $\gamma = 0,05$ граничное значение, полученное по методике [11], $z_\gamma = 3,9305$. Поскольку $z^* < z_\gamma$, то априорная и опытная информация о надежности СУ считается однородной. Число гипотетических испытаний $N_p = 0,9409 \cdot 7 = 6,5853$.

В соответствии с первым подходом к формированию апостериорных оценок характеристик СУ определяются функции (2) и (3):

$$\begin{aligned} L(\mu_0, \mu) &= \exp(-N_0 \mu_0 / \mu) / \mu^{N_0}; \\ L(\mu_p, \mu) &= \exp(-N_p \mu_p / \mu) / \mu^{N_p}; \\ L &= \exp[-(N_0 \mu_0 + N_p \mu_p) / \mu] / \mu^{N_0 + N_p}. \end{aligned}$$

Уравнение (4) принимает вид

$$N_p \mu_p / \mu_a^2 - N_p / \mu_a + N_0 \mu_0 / \mu_a^2 - N_0 / \mu_a = 0,$$

отсюда $\mu_a = (N_0 \mu_0 + N_p \mu_p) / (N_0 + N_p) = 935$ ч.

По функции плотности распределения $\varphi_{\hat{X}}(X; \mu_a) = \exp(-X / \mu_a) / \mu_a$ может быть найдена апостериорная оценка момента величины \hat{X} любого порядка, который носит вероятностный характер.

Заключение. Предложенный метод приоритета опытной информации позволяет найти апостериорные оценки характеристик СУ по точечным оценкам, полученным до и после проведения натуральных испытаний ЛА, и закону распределения $\varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}; \boldsymbol{\mu})$, вид которого в большинстве случаев известен.

При ограниченном числе натуральных испытаний N_0 и некоторых распределениях $\varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}; \boldsymbol{\mu})$ возникают трудности, связанные с определением граничного значения z_γ , необходимого для проверки однородности априорной и опытной информации. Решение конкретных задач апостериорного оценивания параметров различных распределений методом ПОИ показало, что процедура проверки принадлежности всей имеющейся информации к одной генеральной совокупности может быть опущена, а следовательно, границы применения метода существенно расширены. В пользу такого утверждения свидетельствует то, что при наличии больших расхождений в данных, полученных до и после проведения испытаний, величина отношения правдоподобия v^* , фактически определяющая вес априорной информации в апостериорной оценке, близка к нулю. Малое значение отношения правдоподобия и, как следствие числа гипотетических испытаний N_p , практически исключает влияние априорной информации на результат.

Метод приоритета опытной информации может использоваться при решении широкого круга задач, связанных с объединением информации, полученной на различных этапах исследования сложной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пугачев В. Н. Комбинированные методы определения вероятностных характеристик. М.: Сов. радио, 1973. 256 с.
2. Шараханэ А. С., Железнов И. Г. Испытания сложных систем. М.: Высш. школа, 1974. 184 с.
3. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / Под ред. Р. М. Юсупова. Л.: Энергия, 1978. 192 с.
4. Кринецкий Е. И. и др. Летные испытания ракет и космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 464 с.
5. Щербаков П. С. Использование априорной информации для уточнения оценок параметров // Изв. АН СССР. Автом. и телемех. 1988. № 5. С. 80—89.
6. Арсеньев В. Н. Метод апостериорного оценивания показателей качества системы при ограниченном объеме информации // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1991. № 11. С. 16—22.
7. Моррис У. Наука об управлении. Байесовский подход. М.: Мир, 1971. 304 с.
8. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их применения. М.: Наука, 1968. 548 с.
9. Арсеньев В. Н. Оценивание характеристик систем управления по ограниченному числу натуральных испытаний. М.: Рестарт, 2013. 126 с.
10. Уилкс С. Математическая статистика. М.: Наука, 1967. 632 с.
11. Арсеньев В. Н., Фадеев А. С. Методика проверки соответствия характеристик системы управления заданным требованиям по ограниченному числу испытаний // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 10. С. 43—48.

Сведения об авторах

- Владимир Николаевич Арсеньев** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов, Санкт-Петербург; E-mail: vladar56@mail.ru
- Павел Владимирович Лабетский** — аспирант; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург; E-mail: p.v.labetskiy@gmail.com

Рекомендована кафедрой
бортовых информационных
и измерительных комплексов

Поступила в редакцию
30.12.13 г.

УДК 004.942

А. И. ЛОСКУТОВ, А. А. БЯНКИН, А. С. ДУНИКОВ, А. В. ПАРШУТКИН

**МЕТОД
СИМВОЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ
В ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ**

Представлен метод символьной синхронизации радиотелеметрических систем в частотно-временной области, основанный на корреляционной классификации спектральных образов двоичных символов группового телеметрического сигнала и их границ. Приведены результаты оценки помехоустойчивости этого метода.

Ключевые слова: корреляция, помехоустойчивость, радиотелеметрическая система, символьная синхронизация, спектральная плотность мощности.

Введение. К радиотелеметрическим средствам предъявляются высокие требования по достоверности и полноте получения данных. В связи с этим возникает необходимость разработки новых методов приема и передачи телеметрической информации, обладающих высокой помехоустойчивостью. Важную роль в повышении эффективности передачи и приема информации играет совершенствование процесса синхронизации бортовых и наземных телеметрических систем. Уровень развития современной микроэлектроники позволяет использовать принципиально новые алгоритмы синхронизации, а также разработанные ранее, которые не могли быть реализованы на компонентной электронной базе прошлых поколений. В настоящей статье предложен перспективный метод символьной синхронизации радиотелеметрических систем, по сравнению с существующими подходами, обладающий большей помехоустойчивостью к процессу символьной синхронизации.

Метод символьной синхронизации в частотно-временной области. Системы символьной синхронизации радиотелеметрических средств обеспечивают демодуляцию и определение границ двоичных символов в групповом телеметрическом сигнале. Решение этих задач сопровождается значительными трудностями, так как принимаемый групповой телеметрический сигнал искажен помехами различного происхождения и уровня. Существующие наземные приемно-регистрирующие станции обеспечивают требуемую вероятность ошибки приема символов (10^{-4}) при отношении сигнал/шум (ОСШ) существенно больше единицы, в то время как искажение и потеря телеметрической информации, вызванные сбоем работы системы синхронизации, происходят при ОСШ незначительно выше единицы. Следовательно, необходим метод символьной синхронизации, который обеспечит требуемое значение вероятности ошибки приема символов при малом значении ОСШ.

Анализ работ [1—3] показал, что наиболее распространенным подходом при построении систем синхронизации является шаговый поиск, основанный на анализе точек неопределенности. В работе [4] показано, что шаговый поиск и синхронизация с использованием быстрых спектральных преобразований являются универсальными методами и поэтому могут быть использованы в любой системе. Перенос процесса синхронизации из временной области в частотно-временную позволяет объединить эти два метода.

Перенос процесса символьной синхронизации из временной в частотно-временную область возможно осуществить на основе вычисления мгновенного спектра. Простейшее определение мгновенного спектра можно дать в следующем виде [5]:

$$U_{\tau}(\omega, \tau) = \int_{t_0}^t u(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (1)$$

где $u(\tau)$ — фрагмент анализируемого сигнала в интервале времени от t_0 до t , с; ω — угловая частота, рад/с; τ — длительность анализируемого фрагмента сигнала, с.

В соответствии с выражением (1) мгновенный спектр определен как спектр отрезка сигнала длительностью τ .

В настоящее время при передаче телеметрической информации наиболее широко используются радиолинии модуляциями КИМ₂-ЧМ и КИМ₂-ФМ с π -манипуляцией. При этом информация передается двоичными символами „0“ и „1“, различающимися по частоте и фазе соответственно.

Для обеспечения устойчивости систему символьной синхронизации построим как систему распознавания образов с использованием данных спектрального анализа группового телеметрического сигнала. Для реализации этого подхода необходимо:

— выбрать алгоритм цифровой обработки принимаемого группового телеметрического сигнала, обеспечивающий разделение на классы спектральных образов двоичных символов и их границ;

— формализовать решающее правило определения принадлежности фрагментов анализируемого искаженного сигнала к одному из классов.

В качестве метода, позволяющего классифицировать двоичные символы группового телеметрического сигнала и отделить их от шумов, используем селекцию сигнала на основе теории цифровой обработки. Для решения задачи селекции целесообразно осуществлять спектральный и частотно-временной анализ сигнала [6—8].

Формирование спектральных образов двоичных символов группового телеметрического сигнала и их границ выполним по методу, основанному на расчете спектральной плотности мощности анализируемого фрагмента сигнала [6]:

$$P_l = U_{\tau l}(\omega, \tau) U_{\tau l}^*(\omega, \tau), \quad (2)$$

где $U_{\tau l}(\omega, \tau)$ — мгновенный спектр l -й реализации анализируемого сигнала, полученный по формуле (1); $U_{\tau l}^*(\omega, \tau)$ — комплексно-сопряженная копия мгновенного спектра l -й реализации анализируемого сигнала.

Для отнесения получаемых спектральных образов к одному из классов используют различные решающие правила или классификаторы. Наиболее простым в реализации является корреляционный классификатор [9]. При этом численную оценку связи спектральных образов дает парный коэффициент корреляции, рассчитываемый по формуле

$$r_{u_{\tau} \lambda_{\tau q}} = \frac{u_{\tau} \lambda_{\tau q}}{\sqrt{u_{\tau}^2 \lambda_{\tau q}^2}}, \quad (3)$$

где u_{τ} — неискаженный спектральный образ границы символов; $\lambda_{\tau q}$ — анализируемый спектральный образ фрагмента сигнала, $q=1, 2, \dots, l$.

Анализ результатов моделирования. Моделирование проводилось в среде MatLab R2009a, при этом частоты модуляции двоичных символов были уменьшены пропорционально частотам реального сигнала, длительность символа составляла 0,01 с, двоичного символа — 100 дискретных отсчетов. В качестве помехи использован аддитивный белый гауссов шум.

На рис. 1 и 2 представлены спектральная плотность мощности двоичных символов (a — 0, b — 1) и их границы ($в$) сигналов модуляции КИМ₂-ЧМ и КИМ₂-ФМ соответственно, спектральный образ границы символов содержит по 50 дискретных отсчетов символов „0“ и „1“.

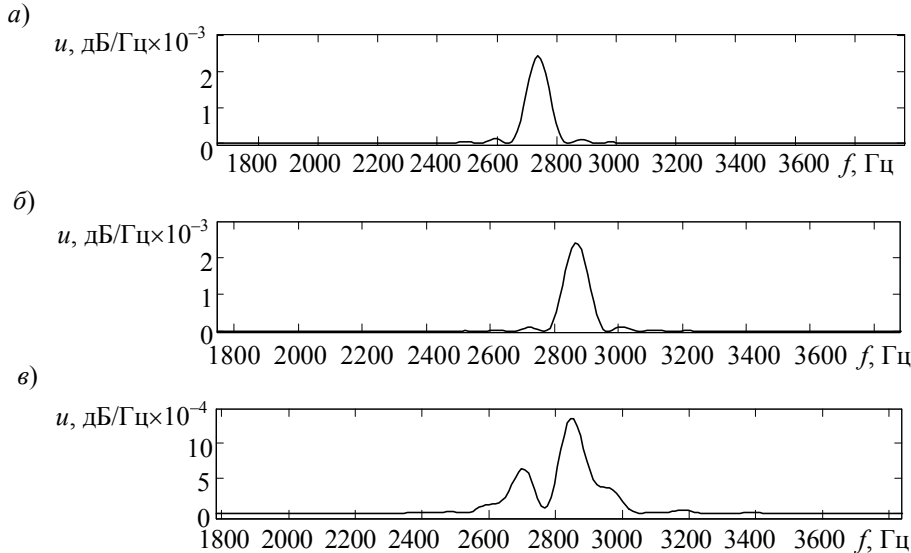


Рис. 1

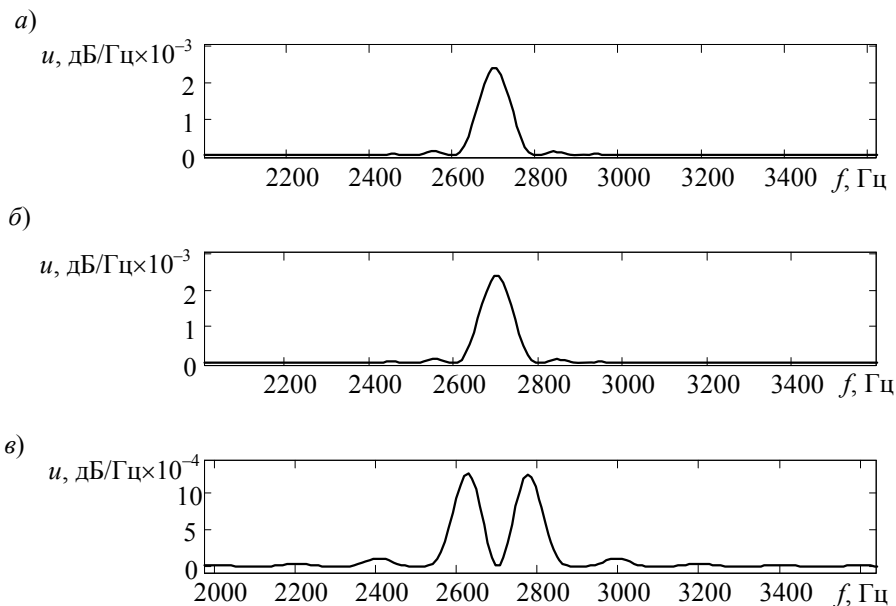


Рис. 2

Из рис. 2 видно, что спектральный образ символа „0“ совпадает со спектральным образом символа „1“. Такая неопределенность перед демодуляцией символов может быть устранена с помощью двухканальной схемы вычитания из принимаемого сигнала опорного сигнала с той же частотой, что и принимаемый сигнал. В первом канале фаза опорного сигнала равна нулю, а во втором — π , в случае совпадения принимаемого сигнала с опорным по фазе значения амплитуд спектральных составляющих после вычисления спектральной плотности мощности, при отсутствии шума, равны нулю.

Отнесение анализируемых спектральных образов фрагментов сигнала к одному из классов осуществляется на основе максимального значения парного коэффициента корреляции (3).

Оценка эффективности метода символьной синхронизации в частотно-временной области. Качество работы системы символьной синхронизации характеризует вероятность ошибочного приема символов в тех случаях, когда погрешность оценки временной задержки принимаемых символов изменяется случайным образом [10]:

$$P = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} P(\varepsilon)W(\varepsilon)d\varepsilon, \quad (4)$$

где ε — погрешность определения границ двоичных символов; $W(\varepsilon)$ — плотность вероятности распределения случайной величины ε ; $P(\varepsilon)$ — вероятность ошибки приема символа.

Критерием эффективности применения предложенного метода при разработке перспективных систем символьной синхронизации является минимизация вероятности ошибочного приема символов. В работе [11] указано, что для обеспечения вероятности порядка 10^{-4} значение погрешности определения границ символов не должно превышать 0,1. Это значение может быть легко достигнуто, если на входе системы ОСШ < 7 дБ.

В среде моделирования MatLab R2009a проведены расчеты значений погрешности определения границ символов при различной размерности быстрого преобразования Фурье, БПФ (рис. 3, а — для сигнала модуляции КИМ₂-ЧМ: кривая 1 — 128, 2 — 1024, 3 — 2048; б — для сигнала модуляции КИМ₂-ФМ: кривые 1, 2 — то же, что для рис. 3, а; 3 — БПФ 16384).

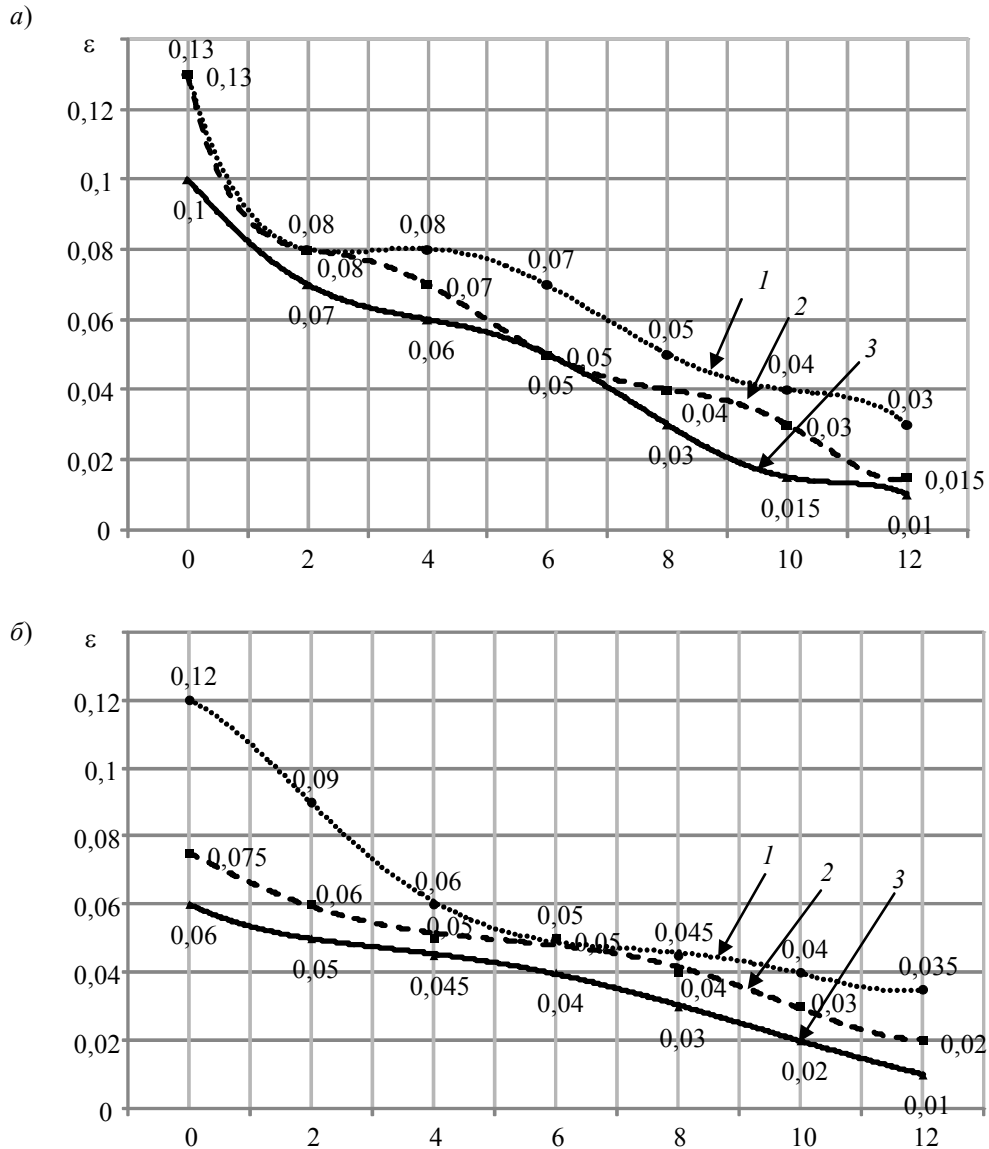


Рис. 3

Из рисунка видно, что предложенный метод символьной синхронизации обеспечивает погрешность определения границ двоичных символов $\varepsilon=0,1$ при ОСШ ≈ 1 .

На рис. 4 представлены результаты расчетов значений вероятности ошибочного приема символов сигнала модуляциями КИМ₂-ЧМ (а, 1 — обычный способ, 2 — БПФ 128, 3 — БПФ 1024, 4 — БПФ 2048) и КИМ₂-ФМ (б, 1—3 — то же, что для рис. 4; а, 4 — БПФ 16384) в тех случаях, когда погрешность определения границ принимаемых символов равна нулю (4).

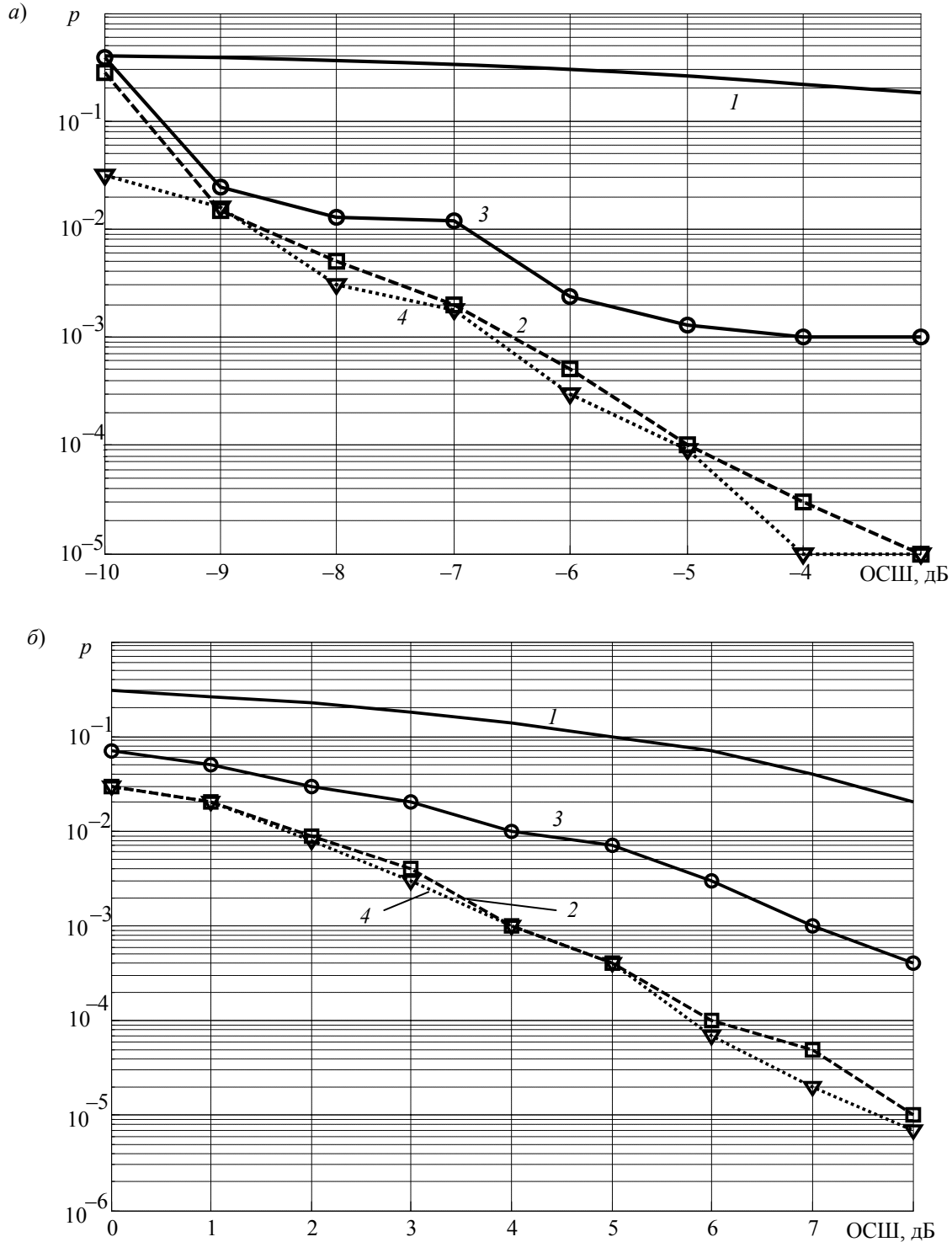


Рис. 4

Из рисунка видно, что применение метода символьной синхронизации в частотно-временной области при малом отношении сигнал/шум обеспечивает меньшее значение

вероятности ошибочного приема символов по сравнению с методом, используемым в наземных приемно-регистрирующих станциях.

Вывод. Использование предложенного метода символьной синхронизации в перспективных наземных приемно-регистрирующих станциях телеметрической информации позволит повысить помехоустойчивость приема телеметрической информации. При этом использование больших размерностей быстрого преобразования Фурье неэффективно, так как при незначительном уменьшении вероятности ошибки приема символов значительно возрастают вычислительные затраты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
2. Журавлев В. И. Поиск и синхронизация в широкополосных системах. М.: Радио и связь, 1986. 240 с.
3. Стиффлер Дж. Дж. Теория синхронной связи / Пер. с англ.; под ред. Э. М. Габидулина. М.: Связь, 1975. 487 с.
4. Лосев В. В., Бродская Е. Б., Коржик И. В. Поиск и декодирование сложных дискретных сигналов / Под ред. В. И. Коржика. М.: Радио и связь, 1988. 225 с.
5. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1962. 236 с.
6. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб: БХВ-Петербург, 2011. 768 с.
7. Марпл-мл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 547 с.
8. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 671 с.
9. Местецкий Л. М. Математические методы распознавания образов. М.: МГУ, 2004. 85 с.
10. Назаров А. В., Козырев Г. И., Шитов И. В. Современная телеметрия в теории и на практике: учебный курс. СПб: Наука и техника, 2007. 667 с.
11. Белицкий В. И. Телеметрия. СПб: МО СССР, 1984. 465 с.

Сведения об авторах

- Андрей Иванович Лоскутов** — д-р техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра телеметрических систем и комплексной обработки информации, Санкт-Петербург; начальник кафедры; E-mail: rujenz@mail.ru
- Александр Александрович Бянкин** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра телеметрических систем и комплексной обработки информации, Санкт-Петербург; E-mail: aab51@mail.ru
- Артём Сергеевич Дуников** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра телеметрических систем и комплексной обработки информации, Санкт-Петербург; E-mail: artem.sever1@yandex.ru
- Андрей Викторович Париуткин** — д-р техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра телеметрических систем и комплексной обработки информации, Санкт-Петербург; E-mail: andydc2010@mail.ru

Рекомендована кафедрой
телеметрических систем
и комплексной обработки информации

Поступила в редакцию
15.04.14 г.

Р. Я. ЛАБКОВСКАЯ, О. И. ПИРОЖНИКОВА, В. Л. ТКАЛИЧ

УСЛОВИЕ И КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕРКОНОВ

Рассмотрены вопросы линеаризации уравнений динамики упругих чувствительных элементов герконов. Выработаны условие и критерий их устойчивости, на основе которых разработана новая конструкция геркона.

Ключевые слова: чувствительный элемент, геркон, динамические параметры, устойчивость, надежность.

Введение. Современные требования к показателям надежности первичных преобразователей и коммутационных элементов, в частности магнитоуправляемых герметизированных контактов (герконов), делают крайне актуальной задачу улучшения динамики упругой элементной базы. Такие важные характеристики микросенсоров и магнитоуправляемых контактов, как быстродействие, механическая устойчивость и вибропрочность обеспечиваются именно качеством упругих подвижных звеньев. Повышение требований к метрологическим характеристикам и показателям надежности первичных преобразователей делает актуальным решение задачи повышения качества чувствительных элементов (ЧЭ). Вопросами расчета устойчивости систем управления занимался целый ряд выдающихся отечественных ученых [1], таких как: Н. Г. Четаев, М. Л. Краснов, Н. А. Алфутов, В. В. Болотин, А. С. Вольмир и др. Однако для создания современных надежных магнитоуправляемых коммутационных устройств необходимо продолжать исследование устойчивости упругих чувствительных элементов герконов, этому и посвящена настоящая работа.

Линеаризация дифференциального уравнения движения чувствительных элементов. При изучении чувствительных элементов систем управления используются аналитические зависимости функций, выражающих исследуемые свойства и их производные. Дифференциальные уравнения составляются на основании исследований физических, химических и других процессов, происходящих в элементах, и применения законов сохранения энергии и веществ, конкретизированных для механики, электротехники, теплотехники и т.д.

В общем виде дифференциальное уравнение [2], например

$$\varphi(\ddot{y}, \dot{y}, y, \dot{x}, x) = 0, \quad (1)$$

может быть и нелинейным. Здесь x, \dot{x} — входная величина и ее производная; y, \dot{y}, \ddot{y} — выходная величина, ее первая и вторая производные.

При инженерных исследованиях удобно использовать линейные дифференциальные уравнения, так как методы их решения детально разработаны, а результаты решения имеют четкую (ясную) инженерную интерпретацию. Поэтому рассмотрим суть метода линеаризации нелинейных дифференциальных уравнений.

Поскольку в инженерной практике используются только устойчивые системы, а для них $\varphi(0, 0, Y_0, 0, X_0) = 0$, то линеаризованное уравнение запишется в виде

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \ddot{y}}\right)_0 \Delta \ddot{y} + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \dot{y}}\right)_0 \Delta \dot{y} + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)_0 \Delta y + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \dot{x}}\right)_0 \Delta \dot{x} + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_0 \Delta x = 0.$$

При $X_0 = Y_0 = 0$ линеаризованное уравнение

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial\ddot{y}}\right)_0 \ddot{y} + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\dot{y}}\right)_0 \dot{y} + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)_0 y + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\dot{x}}\right)_0 \dot{x} + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_0 x = 0,$$

таким образом, нами получено линеаризованное (линейное) дифференциальное уравнение.

Для аналитических исследований дифференциальные уравнения записываются в операторной форме, коэффициент при y выбирают равным единице, а другие коэффициенты подвергают соответствующим элементарным преобразованиям

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + 1) y = \frac{B_m}{A_n} (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + 1) x,$$

где $p = d/dt; \dots; p^l = d^l/dt^l$ — операторы дифференцирования, $l = 1, 2, \dots, n$ или $l = 1, 2, \dots, m$.

В сжатой форме это уравнение можно записать и так:

$$Ry = kQx,$$

где $R = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + 1$; $Q = b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + 1$ — нормированные (с коэффициентами при y и x , равными единице) линейные дифференциальные операторы; $k = B_m/A_n$ — передаточный коэффициент.

Линейное дифференциальное уравнение обладает свойством суперпозиции, т.е. для каждой входной переменной величины (функции времени) выходная переменная величина (неизвестная функция времени, которую требуется найти) содержит составляющую, не зависящую от наличия и характера изменения других входных величин и от момента их приложения. Но при таких начальных условиях переходный процесс в выходном сигнале (величине) будет характеризоваться соответствующей составляющей и набором ее производных. Вследствие этого решение линейного дифференциального уравнения $y(t)$ будет представлять сумму частного решения соответствующего неоднородного $\bar{y}(t)$ и общего однородного уравнений $Y(t)$:

$$y(t) = \bar{y}(t) + Y(t). \quad (2)$$

Отметим, что, проанализировав решения дифференциального уравнения, можно проверить устойчивость работы чувствительного элемента, сформулировать критерий устойчивости и наглядно интерпретировать его.

Условие и критерий устойчивости плоских чувствительных элементов. После того как дифференциальное уравнение линеаризовано и найдены все его решения, можно оценить все условия и критерий устойчивости работы ЧЭ.

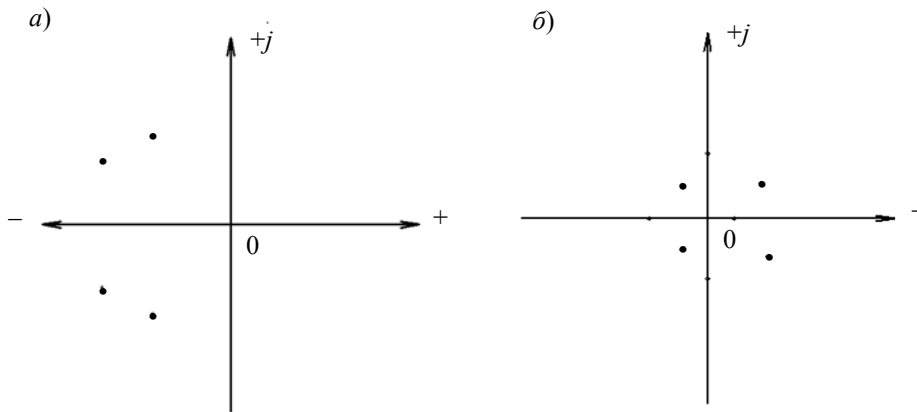
Так как в реальных условиях корни характеристического уравнения находятся с конечной точностью, то кратных корней не встречается и решение дифференциального уравнения (2) будет состоять из слагаемых вида $C_i e^{r_i t}$ (C_i — постоянное слагаемое, $y = e^{rt}$ — показательная функция), $C_j e^{a_j t} \sin(b_j t + \psi_j)$, которые соответствуют вещественному корню r_i и паре комплексных корней $a_j \pm ib_j$ (ψ — сумма членов, содержащих обычные и смешанные частные производные более высоких порядков и более высокие степени отклонений аргументов функции φ).

Если в уравнении (2) хотя бы одно из слагаемых со временем неограниченно возрастает по абсолютной величине, то неограниченно возрастает и вся сумма решений. Поэтому наличия одного положительного корня r_i достаточно для того, чтобы соответствующее ему слагаемое в решении $y(t)$ неограниченно возросло. Если хотя бы в одной паре комплексных

сопряженных корней действительная часть $a_j > 0$, то в решении $y(t)$ появляется гармоническая составляющая, у которой амплитуда неограниченно возрастает.

Таким образом, устойчивость ЧЭ, описываемого линейным дифференциальным уравнением, достигается, если корни его характеристического уравнения имеют отрицательные действительные части. При наличии хотя бы одного корня с положительной вещественной частью ЧЭ неустойчив. Если в характеристическом уравнении имеются корни вида $r_i = 0$ или $\pm ib$, то решение уравнения (2) содержит постоянное слагаемое C_i или гармонику с постоянной амплитудой $C_j \sin(b_j t + \psi_j)$. В таком случае ЧЭ будет нейтральным.

Здесь следует отметить, что для случая, когда корни характеристического уравнения нулевые или чисто мнимые, оценить устойчивость ЧЭ можно только путем исследования исходного (нелинейного) уравнения (1). Корни любого алгебраического уравнения наглядно можно представить в виде точек на комплексной плоскости: согласно рисунку, ЧЭ является устойчивым, если все корни его характеристического уравнения лежат слева от мнимой оси (a), если хотя бы один корень (вещественный или мнимый) находится справа (b), то ЧЭ неустойчив. Мнимая ось является, таким образом, границей устойчивости.



Основные результаты. Имея модель ЧЭ в виде дифференциального уравнения, трудно найти соответствующие модели в виде передаточных функций и в виде АЧХ и ФЧХ.

Авторами статьи разработан пакет прикладных программ для визуализации полученных решений. Полученные выражения для АЧХ плоских ЧЭ герконов позволяют определить влияние конструктивных параметров этих устройств на их динамические характеристики [2, 3]. Главным преимуществом перехода к линеаризованной системе является возможность эффективного использования всего опыта, накопленного при решении линейных динамических задач в сочетании с удобство малгоритмизации и простотой физической интерпретации основных процедур расчета. При анализе динамической устойчивости ЧЭ необходимо принимать во внимание результат совместного действия двух сил: дестабилизирующего — сил внутреннего вязкого трения в области вынужденных частот, превышающих собственную частоту ЧЭ, и стабилизирующего — сил внешнего трения [4].

Описанные выше условие и критерий устойчивости плоских чувствительных элементов были применены при разработке ряда конструкций герконов [5—7]. В этих конструкциях имеются пластинчатые мембранные упругие чувствительные элементы с различными видами технологических разработок, профилей, способов заделки, а также типами материалов и рабочих поверхностей. Устойчивость данных элементов была исследована по приведенной выше методике, полученные результаты показали улучшение показателей надежности в среднем на 5—7 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алфутов Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1978. 312 с.
2. Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И., Евлахова А. В., Гатчин Ю. А. Математическое моделирование статических и динамических характеристик герконовых реле для систем защиты и сигнализации // Матер. междунар. конгр. по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS&IT'12. СПб: Физматлит, 2012. Т. 2. С. 107—111.
3. Лабковская Р. Я., Ткалич В. Л., Пирожникова О. И. Разработка библиотеки конечных элементов для САПР упругих конструкций герконов // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 3. С. 21—24.
4. Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л. Анализ присоединенных масс упругих чувствительных элементов ртутных герконов // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 7. С. 32—35
5. Патент 136920 РФ МПК⁷ H01 N1/66. Магнитоуправляемый контакт / Р. Я. Лабковская, В. Л. Ткалич, О. И. Пирожникова, А. Г. Коробейников. 20.01.14. Бюл. № 2.
6. Патент 144305 РФ МПК⁷ H01 N1/66. Магнитоуправляемый контакт / Р. Я. Лабковская, В. Л. Ткалич, О. И. Пирожникова, А. Г. Коробейников. 20.08.14.
7. Патент 144304 РФ МПК⁷ H01 N1/66. Мембранный геркон / Р. Я. Лабковская, В. Л. Ткалич, О. И. Пирожникова. 20.08.14.

Сведения об авторах

- Римма Яновна Лабковская** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербург;
E-mail: studsovet_itmo@mail.ru
- Ольга Игоревна Пирожникова** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербург;
E-mail: studsovet_itmo@mail.ru
- Вера Леонидовна Ткалич** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербург;
E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru

Рекомендована кафедрой
проектирования и безопасности
компьютерных систем

Поступила в редакцию
29.05.14 г.

Н. А. БАЛОНИН, М. Б. СЕРГЕЕВ

ВЫЧИСЛЕНИЕ МАТРИЦ МЕРСЕННА МЕТОДОМ ПЭЛИ

Приводится модифицированный метод Пэли вычисления матриц Мерсенна при значениях порядка, равных простым числам. Рассматривается пример вычисления матрицы Мерсенна. Приводится сравнение матриц, находимых модифицированными методами Сильвестра и Пэли. Отмечается эффективность развиваемого метода относительно универсальной процедуры поиска M -матриц, определяющая сферу приложения метода.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, обработка информации, ортогональные матрицы, квазиортогональные матрицы, матрицы Адамара, матрицы Мерсенна, метод Сильвестра, метод Скарпи, метод Пэли.

В работе [1] предложено применять квазиортогональные матрицы Адамара—Мерсенна в качестве базиса ортогональных преобразований при маскировании видеоизображений. Матричные преобразования составляют основу так называемого стрип-метода работы с изображениями, рассмотренного в монографии [2].

Ортогональные матрицы, включающие матрицы Фурье и дополняющие их при нормировании столбцов квазиортогональные матрицы Адамара, а также их наиболее близкие интерпретации для четных порядков — матрицы Белевича (конференц-матрицы) и взвешенные матрицы — используются в помехоустойчивом кодировании, спектральном разложении и обработке изображений [3], кодовом разделении каналов связи и защитном маскировании [4] и т.п. Особое значение свойства таких матриц приобретают при аппаратной или микропрограммной реализации указанных преобразований в специализированных процессорах. Поскольку вид матриц, их порядки, значения коэффициентов существенно влияют на выбор соответствующих фильтров, аппаратные затраты и скорость преобразования, то на этапе проектирования процессоров остро стоит задача правильного выбора ортогональных (квазиортогональных) матриц.

В работе [5] определен класс квазиортогональных матриц Адамара—Мерсенна нечетных порядков, равных числам Мерсенна $n=2^k-1$. В работе [6] этот класс расширен квазиортогональными матрицами Мерсенна, была высказана гипотеза их существования для всех значений нечетных порядков $n=4k-1$, исследованная в работе [7]. Настоящая работа развивает положения работы [1] — предложены эффективные (более быстродействующие) алгоритмы генерации квазиортогональных матриц, — раскрывая прикладную сторону употребления асимметричных символов Лежандра.

Уточним определение квазиортогональной матрицы.

Определение 1. Квазиортогональная матрица A — квадратная матрица порядка n , максимальное значение модуля элементов каждого столбца которой равно 1, удовлетворяющая условию связи столбцов вида

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \omega \mathbf{I}, \quad (1)$$

где \mathbf{I} — единичная диагональная матрица, ω — вес матрицы.

Вес $\omega = 1$ характерен для ортогональных матриц, к которым квазиортогональные матрицы, в том числе и матрицы Адамара, не относятся ввиду ограничения на значения их элементов. Вместе с тем эти матрицы весьма близки к ортогональным, получаемым из \mathbf{A} элементарным нормированием их строк и столбцов, в результате чего их максимальный элемент (m -норма) уменьшается до $m < 1$, для порядков $n > 1$.

Определение 2. M -матрицами (минимаксными квазиортогональными) назовем матрицы (1), обладающие минимумом m -нормы (глобальным или локальным) на классе квазиортогональных матриц порядка n . Несложно заметить, что $|\det(\mathbf{A})| = \omega^{n/2}$, причем $\omega = 1/m^2$.

Матрицы Адамара, обладающие глобальным максимумом детерминанта, имеют минимальное значение m -нормы, т.е. являются частным случаем M -матриц с весом $\omega = n$.

Согласно исследованиям, между матрицами Мерсенна [7] и Адамара [8] нечетных и четных порядков соответственно существует взаимно-однозначное соответствие, предполагающее общность алгоритмов их вычисления. Оставаясь двухуровневыми, они различаются лишь величинами элементов: для матриц Адамара — $\{1, -1\}$, для матриц Мерсенна — $\{1, -b\}$, где

$$b = 1/2 \text{ при } n=3, \text{ а в остальных случаях } b = \frac{q - \sqrt{4q}}{q - 4} \text{ при } q=n+1 \text{ (порядок сопутствующих матриц Адамара).}$$

риц Адамара).

В работах [1, 5] приведен модифицированный алгоритм Сильвестра [8] построения матриц Мерсенна, используемых как базис ортогональных преобразований в маскировании изображений. Для повышения порядка матриц Мерсенна служит алгоритм Скарпи [9]. В отличие от алгоритма Сильвестра, он имеет значительно более простую формулировку в приложении к матрицам нечетных порядков, чем к матрицам Адамара четных порядков. Его основу составляет процедура подстановки матрицы Мерсенна с каймой, определяемой значениями вытесняемых элементов (некоторое обобщение операции кронекерова произведения).

В теории матриц Адамара не менее хорошо известны алгоритмы, полученные по методу Пэли [10], модификация которого для поиска матриц Мерсенна, учитывающая особенность их порядка, приведена ниже.

Переопределим значения символов Лежандра $\chi(m/n) = \{1, -b\}$ таким образом, что единичное значение принимается, если m — квадратичный вычет по модулю n (или 0); $-b$, если m — квадратичный невычет по модулю n , где b — абсолютное значение отрицательных элементов матрицы Мерсенна [5, 6].

Пусть n — простое число, задающее порядок $n=4k-1$ матрицы Мерсенна. Тогда, как и в случае нахождения матриц Адамара, это необходимое и достаточное условие существования квазиортогональной циклической матрицы Мерсенна порядка n (\mathbf{M}_n) с элементами, равными символам Лежандра $\chi(j-i/n)$, вычисленным для разностей пар индексов i, j их строк и столбцов.

Пример. Рассмотрим процедуру построения матрицы Мерсенна \mathbf{M}_7 , связанного с нахождением символов Лежандра для набора чисел $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, равных разностям индексов элементов первой строки. Их квадраты по модулю 7 равны $\{0, 1, 4, 2, 2, 4, 1\}$, соответственно числа $\{1, 2, 4\}$, которые присутствуют в обоих наборах, представляют собой квадратичные вычеты, а остальные — невычеты.

Циклическая матрица Мерсенна \mathbf{M}_7 и гистограмма модулей ее элементов приведены на рис. 1 (белый квадрат соответствует элементу с единичным значением, черный — элементу — b , где $b = 2 - \sqrt{2} \cong 0,5857$).

Отметим, что в случае нечетных порядков $n=4k+1$ нахождение подобных двухуровневых матриц методом Пэли невозможно, в этом состоит специфика объекта расчета. Аппроксимировать матрицы Белевича [11] иррациональными матрицами на единицу меньшего

порядка возможно только в рамках трехуровневой структуры, как у матриц Ферма [12], причем, в отличие от матриц Мерсенна и Ферма, результат такой аппроксимации соответствует некоторой седловой точке (которая не всегда существует), а не локальному максимуму детерминанта матрицы.

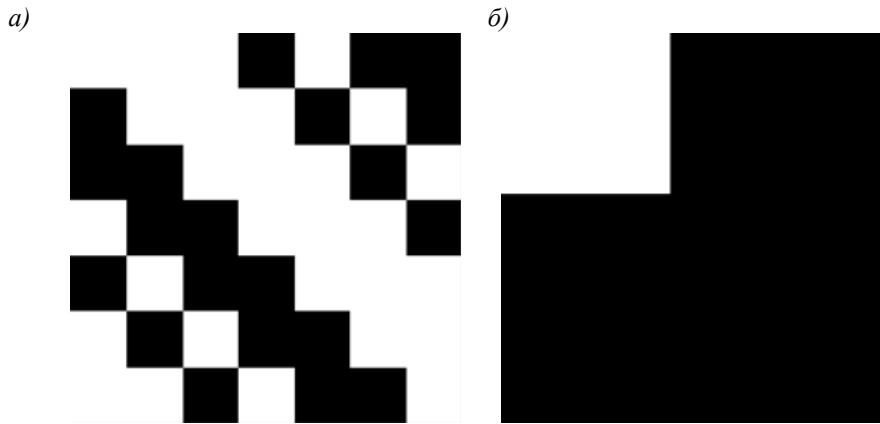


Рис. 1

Модифицированный метод Пэли значительно расширяет возможности вычисления матриц Мерсенна и Эйлера [13] в сравнении с ранее изложенными подходами [1, 5, 14]. В частности, он позволяет вычислить матрицы Мерсенна 11-го и 19-го порядков (порядки — простые числа), найденные в работе [6] методом поиска локального максимума детерминанта [15], соответствующего локальным минимумам m -норм этих M -матриц [5, 6], при помощи специализированного математического обеспечения [15, 16].

На рис. 2 для сравнения приведены матрицы Мерсенна порядка 31, найденные модифицированными методами Сильвестра и Пэли.

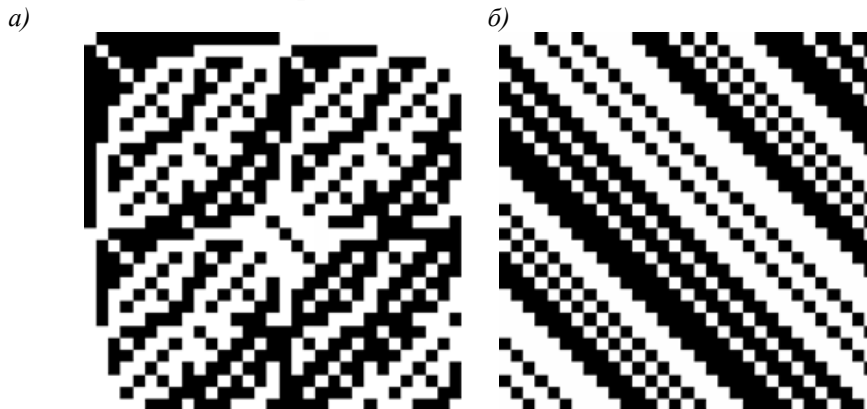


Рис. 2

Стоит обратить внимание на то, что квазиортогональные матрицы глобального и локального максимумов детерминанта не являются, в общем, целочисленными матрицами. На них не распространяются жесткие критерии существования, целиком вытекающие из целочисленности [6, 7].

Неортогональные и не сводимые к ортогональным матрицы абсолютного максимума детерминанта существуют на всех значениях порядков. Квазиортогональные матрицы, особенно матрицы локального максимума детерминанта, обладают сходным свойством. Универсальный метод поиска M -матриц [15] вытекает из общего обоснования существования матриц Мерсенна [7] порядков $n=4k-1$ и используется для нахождения редких артефактных M -матриц [17—19]. Метод Пэли рассматривается как эффективное средство нахождения матриц Мерсенна при выполнении соответствующего условия — значение порядка матрицы является простым числом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Востриков А. А., Балонин Ю. Н. Матрицы Адамара-Мерсенна как базис ортогональных преобразований в маскировании видеоизображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 1. С. 15—19.
2. Мироновский Л. А., Слаев В. А. Стрип-метод преобразования изображений и сигналов. СПб: Политехника, 2006. 163 с.
3. Балонин Ю. Н., Востриков А. А., Сергеев М. Б. О прикладных аспектах применения М-матриц // Информационно-управляющие системы. 2012. № 1. С. 92—93.
4. Ерош И. Л., Сергеев А. М., Филатов Г. П. О защите цифровых изображений при передаче по каналам связи // Информационно-управляющие системы. 2007. № 5. С. 20—22.
5. Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Мироновский Л. А. Вычисление матриц Адамара-Мерсенна // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5. С. 92—94.
6. Балонин Н. А. О существовании матриц Мерсенна 11-го и 19-го порядков // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2 (63). С. 89—90.
7. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. К вопросу существования матриц Мерсенна и Адамара // Информационно-управляющие системы. 2013. № 5 (66). С. 2—8.
8. Hadamard J. Résolution d'une question relative aux determinants // Bulletin des Sciences Mathématiques. 1893. N 17. P. 240—246.
9. Scarpis U. Sui determinanti di valore Massimo // Rendiconti della R. Istituto Lombardo di Scienze e Lettere 31. 1898. P. 1441—1446.
10. Paley R. E. A. C. On orthogonal matrices // J. of Mathematics and Physics. 1933. Vol. 12. P. 311—320.
11. Belevitch V. Theorem of 2n-terminal networks with application to conference telephony // Electr. Commun. 1950. Vol. 26. P. 231—244.
12. Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Мироновский Л. А. Вычисление матриц Адамара-Ферма // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6 (61). С. 90—93.
13. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. О двух способах построения матриц Адамара-Эйлера // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1 (62). С. 7—10.
14. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. М-матрицы // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 14—21.
15. Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б. Алгоритм и программа поиска и исследования М-матриц // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3. С. 82—86.
16. Балонин Ю. Н. Программный комплекс MMatrix-2 и найденные им М-матрицы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 10 (112). С. 58—64.
17. Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б. М-матрица 22-го порядка // Информационно-управляющие системы. 2011. № 5. С. 87—90.
18. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Взвешенная конференц-матрица, обобщающая матрицу Белевича на 22-м порядке // Информационные управляющие системы. 2013. № 5 (66). С. 97—98.
19. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрица золотого сечения G_{10} // Информационные управляющие системы. 2013. № 6 (67). С. 2—5.

Сведения об авторах**Николай Алексеевич Балонин**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра вычислительных систем и сетей; E-mail: korbendfs@mail.ru

Михаил Борисович Сергеев

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра вычислительных систем и сетей; заведующий кафедрой; E-mail: mbse@mail.ru

Рекомендована кафедрой
вычислительных систем и сетейПоступила в редакцию
24.02.14 г.

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.383

Л. А. СЕВЕРОВ, В. К. ПОНОМАРЕВ, А. И. ПАНФЕРОВ, Н. А. ОВЧИННИКОВА

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ НА ОСНОВЕ КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА В УПРУГОМ ПОДВЕСЕ

Представлена новая модель динамики микромеханических гироскопов, учитывающая влияние на кольцевой резонатор массовых, упругих, диссипативных и кориолисовых сил системы его подвеса.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, кольцевой резонатор, упругий подвес, радиальные и тангенциальные нагрузки.

Конструкции современных микромеханических гироскопов на основе кольцевого резонатора (ММГ R-типа) отличаются разнообразием схем упругого подвеса. В конструкциях компаний British Aerospace, Silicon Sensing System [1, 2] внешняя схема упругого подвеса резонатора содержит восемь стержневых элементов; в разработках компании Delco Electronics и университета Michigan [3] используется внутренняя схема подвеса резонатора, образованная изогнутыми балками. В поперечном сечении высота упругих элементов равна высоте резонатора, а их ширина составляет десятки микрометров. Как правило, упругие элементы равномерно окружают резонатор и технологически жестко связаны с ним в восьми точках. В процессе работы ММГ точки крепления упругих элементов к резонатору совершают малые радиальные w и тангенциальные v перемещения на частоте собственных колебаний резонатора в подвесе. Эти колебания при выполнении гипотезы нерастяжимости средней линии резонатора [4] связаны условием

$$\frac{\partial v(t, \varphi)}{\partial \varphi} = w(t, \varphi), \quad (1)$$

где t и φ — независимые переменные.

Таким образом, в процессе работы ММГ кольцевой резонатор испытывает внешние радиальные и тангенциальные нагрузки, обусловленные присоединенными упругими, инерционными, диссипативными и кориолисовыми силами элементов подвеса.

Присоединенные к резонатору радиальные и тангенциальные силы от двух диаметрально расположенных упругих элементов в этом случае определяются зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} Q_2(t, \varphi) &= \psi_1(\varphi) \left[m_R \ddot{w}(t, \varphi) + d_R \dot{w}(t, \varphi) + c_R w(t, \varphi) + 2m_T \dot{v}(t, \varphi) \Omega \right], \\ P_2(t, \varphi) &= \psi_1(\varphi) \left[m_T \ddot{v}(t, \varphi) + d_T \dot{v}(t, \varphi) + c_T v(t, \varphi) - 2m_R \dot{w}(t, \varphi) \Omega \right], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где m_R, m_T — присоединенные массы (R — радиальные, T — тангенциальные); d_R, d_T — коэффициенты присоединенных диссипативных сил подвеса; c_R, c_T — коэффициенты жесткости упругого подвеса; Ω — измеряемая угловая скорость; $\psi_1(\varphi)$ — функция, зависящая от местоположения упругих элементов.

На рис. 1 приведен один из пары упругих элементов возможной стержневой конструкции, состоящий из радиального (РС) и тангенциального (ТС) стержней. Жесткое крепление элемента подвеса к резонатору в зоне малого угла $2\beta_0$ расположено под углом ψ_0 к оси OX в системе координат корпуса прибора OXY . На рисунке показаны положительные направления смещений точки крепления упругого элемента w и v , которым соответствуют радиальные и тангенциальные присоединенные силы Q и P [4].

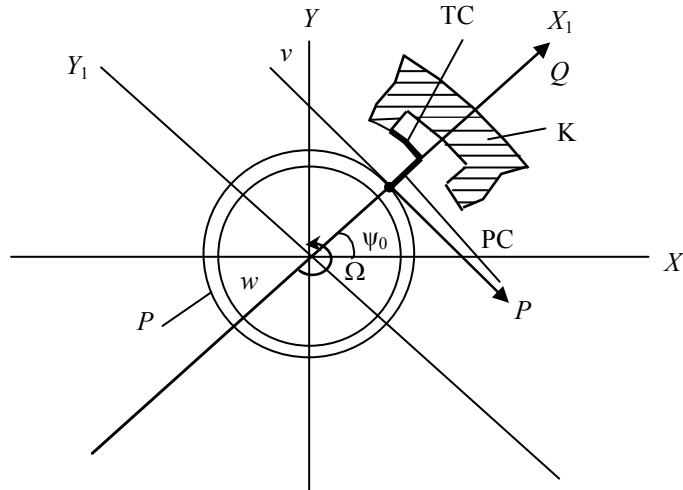


Рис. 1

Распределение этих сил по телу резонатора определяется функцией $\psi_1(\varphi)$, график которой для пары диаметрально расположенных элементов приведен на рис. 2.

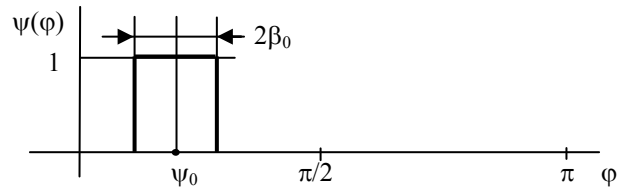


Рис. 2

В этом случае:

$$\psi_1(\varphi) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < \varphi < \psi_0 - \beta_0, \quad \psi_0 + \beta_0 < \varphi < \pi, \\ 1 & \text{при } \psi_0 - \beta_0 \leq \varphi \leq \psi_0 + \beta_0. \end{cases} \quad (3)$$

Ограничиваясь первыми тремя членами разложения периодической функции $\psi(\varphi)$ в ряд Фурье на интервале $[0, -\pi]$, запишем:

$$\psi_1(\varphi) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos 2\varphi + b_1 \sin 2\varphi, \quad (4)$$

где $a_0 = \frac{4\beta_0}{\pi}$, $a_1 = \frac{2}{\pi} \cos 2\psi_0 \sin 2\beta_0$, $b_1 = \frac{2}{\pi} \sin 2\psi_0 \sin 2\beta_0$,

таким образом

$$\left. \begin{aligned} \psi_1(\varphi) &= \frac{2}{\pi} [\beta_0 + \sin 2\beta_0 (\cos 2\psi_0 \cos 2\varphi + \sin 2\psi_0 \sin 2\varphi)], \\ \psi_1'(\varphi) &= \frac{4}{\pi} \sin 2\beta_0 (-\cos 2\psi_0 \sin 2\varphi + \sin 2\psi_0 \cos 2\varphi), \\ \psi_1''(\varphi) &= -\frac{8}{\pi} \sin 2\beta_0 (\cos 2\psi_0 \cos 2\varphi + \sin 2\psi_0 \sin 2\varphi), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

штрихами обозначено дифференцирование по φ .

Отметим, что функции (5) справедливы для группы из четырех элементов подвеса, расположенных по осям системы координат OX_1Y_1 . Аналогично для системы координат OX_2Y_2 , развернутой относительно OX_1Y_1 на угол $\pi/4$, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \psi_2(\varphi) &= \frac{2}{\pi} [\beta_0 + \sin 2\beta_0 (-\cos 2\psi_0 \sin 2\varphi + \sin 2\psi_0 \cos 2\varphi)], \\ \psi_2'(\varphi) &= -\frac{4}{\pi} \sin 2\beta_0 (\cos 2\psi_0 \cos 2\varphi + \sin 2\psi_0 \sin 2\varphi), \\ \psi_2''(\varphi) &= \frac{8}{\pi} \sin 2\beta_0 (\cos 2\psi_0 \sin 2\varphi - \sin 2\psi_0 \cos 2\varphi). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Плотности распределения приведенных радиальных и тангенциальных сил (2) — сил, приходящихся на единицу длины резонатора [4, 5], — составят:

$$\left. \begin{aligned} q_2(t, \varphi) &= \frac{1}{2\pi r \rho S} Q_2(t, \varphi) = \frac{1}{m_p} Q_2(t, \varphi), \\ p_2(t, \varphi) &= \frac{1}{2\pi r \rho S} P_2(t, \varphi) = \frac{1}{m_p} P_2(t, \varphi), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где r , ρ , S , m_p — радиус средней линии, плотность материала, площадь поперечного сечения и масса резонатора. Поэтому в соответствии с работами [4—6] и рис. 2 в правую часть уравнения динамики ММГ R-типа, приведенного к переменной $w(t, \varphi)$, должно с учетом направления действия сил q , p и формулой (7) войти воздействие:

$$f_2(t, \varphi) = \pm (q_2'' - p_2'), \quad (8)$$

где знак „+“ соответствует силам, ориентированным по положительным направлениям перемещений v и w . Составляющая воздействия (8), определяемая производной q_2'' , зависит от радиального перемещения $w(t, \varphi)$.

Для основной (второй) формы колебаний резонатора [4—6] получим систему

$$\left. \begin{aligned} w(t, \varphi) &= (a \cos 2\varphi + b \sin 2\varphi) \cos \lambda t + (m \cos 2\varphi + n \sin 2\varphi) \sin \lambda t, \\ w'(t, \varphi) &= 2 [(-a \sin 2\varphi + b \cos 2\varphi) \cos \lambda t + (-m \sin 2\varphi + n \cos 2\varphi) \sin \lambda t], \\ w''(t, \varphi) &= -4 [(a \cos 2\varphi + b \sin 2\varphi) \cos \lambda t + (m \cos 2\varphi + n \sin 2\varphi) \sin \lambda t], \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где a , b , m , n — амплитуды огибающих четырех форм колебаний резонатора в подвесе на частоте λ .

Составляющие воздействия (8), определяемые производной p_2' , зависят от тангенциального перемещения $v(t, \varphi)$. Задав $v(t, \varphi)$ в форме

$$v(t, \varphi) = C_1 \cos 2\varphi \cos \lambda t + C_2 \sin 2\varphi \cos \lambda t + C_3 \cos 2\varphi \sin \lambda t + C_4 \sin 2\varphi \sin \lambda t$$

($C_1—C_4$ — неопределенные коэффициенты) и учитывая (1), найдем:

$$\left. \begin{aligned} v(t, \varphi) &= \left(-\frac{b}{2} \cos 2\varphi + \frac{a}{2} \sin 2\varphi \right) \cos \lambda t + \left(-\frac{n}{2} \cos 2\varphi + \frac{m}{2} \sin 2\varphi \right) \sin \lambda t, \\ v'(t, \varphi) &= w(t, \varphi), \\ v''(t, \varphi) &= w'(t, \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Вычисляя входящие в (8) производные q_2'' и p_2' , в упрощенной форме запишем:

$$\left. \begin{aligned} q_2'' &= \frac{1}{m_p} [m_R (\psi_1'' \ddot{w} + 2\psi_1' \dot{w}' + \psi_1 \ddot{w}'') + d_R (\psi_1'' \dot{w} + 2\psi_1' \dot{w}' + \psi_1 \dot{w}'') + \\ &+ c_R (\psi_1'' w + 2\psi_1' w' + \psi_1 w'') + 2m_T \Omega (\psi_1'' \dot{v} + 2\psi_1' \dot{v}' + \psi_1 \dot{v}'')], \\ p_2' &= \frac{1}{m_p} [m_T (\psi_1' \ddot{v} + \psi_1 \dot{v}') + d_T (\psi_1' \dot{v} + \psi_1 \dot{v}') + c_T (\psi_1' v + \psi_1 v') - 2m_R \Omega (\psi_1' \dot{w} + \psi_1 \dot{w}')]. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Путем подстановки в (1) уравнений (5), (9), (10) определим составляющие воздействий q_2'' и p_2' , находящиеся в „резонансе“ с основной формой колебаний резонатора, т.е. составляющие, содержащие функции $\cos 2\varphi \cos \lambda t$, $\sin 2\varphi \cos \lambda t$, $\cos 2\varphi \sin \lambda t$, $\sin 2\varphi \sin \lambda t$. Эти составляющие определяются зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} \bar{q}_2'' &= \frac{2\beta_0}{\pi m_p} (m_R \ddot{w}'' + d_R \dot{w}'' + c_R w'' + 2m_T \Omega \dot{v}'') = \frac{2\beta_0}{\pi m_p} (m_R \dot{w}'' + d_R \dot{w}'' + c_R w'' + 2m_T \Omega \dot{w}''), \\ \bar{p}_2' &= \frac{2\beta_0}{\pi m_p} (m_T \dot{v}' + d_T \dot{v}' + c_T v' - 2m_R \Omega \dot{w}') = \frac{2\beta_0}{\pi m_p} (m_T \dot{w}' + d_T \dot{w}' + c_T w' - 2m_R \Omega \dot{w}'). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Усилия (12) образуются от пары элементов подвеса, расположенных по оси OX_1 (см. рис. 1).

Четыре элемента подвеса, расположенные по осям системы координат $OX_1 Y_1$, приводят к образованию усилий

$$\left. \begin{aligned} \bar{q}_4'' &= \frac{4\beta_0}{\pi m_p} (m_R \dot{w}'' + d_R \dot{w}'' + c_R w'' + 2m_T \Omega \dot{w}'), \\ \bar{p}_4' &= \frac{4\beta_0}{\pi m_p} (m_T \dot{w}' + d_T \dot{w}' + c_T w' - 2m_R \Omega \dot{w}'). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Аналогичным образом доказывается, что описываемые функцией $\psi_2(\varphi)$ четыре элемента подвеса, расположенные по осям системы координат $OX_2 Y_2$, развернутой по отношению к системе $OX_1 Y_1$ на угол $\pi/4$, и создают усилия, равные усилиям (13). Таким образом, в правую часть уравнения ММГ R-типа, приведенного к переменной $w(t, \varphi)$, должно войти воздействие $f_{\Pi}(t, \varphi)$:

$$f_{\Pi}(t, \varphi) = -\frac{8\beta_0}{\pi m_p} (m_R \dot{w}'' - m_T \dot{w}'' + d_R \dot{w}'' - d_T \dot{w}'' + c_R w'' - c_T w'' + 2(m_T + m_R) \Omega \dot{w}'). \quad (14)$$

При этом уравнение динамики гироскопа ММГ R-типа принимает вид:

$$\begin{aligned} \ddot{w}'' - \ddot{w}'' + 4\Omega \dot{w}' + \xi_1 (\dot{w}^{VI} + 2\dot{w}^{IV} + \dot{w}'') + \chi^2 (w^{VI} + 2w^{IV} + w'') + \bar{m}_R \ddot{w}'' - \bar{m}_T \ddot{w}'' + \\ + \bar{d}_R \dot{w}'' - \bar{d}_T \dot{w}'' + \bar{c}_R w'' - \bar{c}_T w'' + \bar{g} \Omega \dot{w}' = f_B(t, \varphi) + f_K(t, \varphi), \end{aligned} \quad (15)$$

где $\chi^2 = \frac{Eh^2}{12\rho r^4}$, $\xi_1 = \frac{\xi h^2}{12\rho r^4}$, ξ — коэффициент сил вязкого трения в теле кольца, $f_B(t, \varphi)$ —

приведенное радиальное усилие возбуждения, $f_K(t, \varphi)$ — приведенное радиальное усилие, создаваемое системой компенсации для ММГ R-типа, работающего в режиме датчика угловой скорости [7]; \bar{c}_R , \bar{c}_T , \bar{d}_R , \bar{d}_T , \bar{m}_R , \bar{m}_T , \bar{g} — коэффициенты, определяющие приведенные упругие, демпфирующие, инерционные и кориолисовы силы, воздействующие на резонатор со стороны подвеса.

Из (14) следует:

$$\begin{aligned} \bar{m}_R &= \frac{8\beta_0 m_R}{\pi m_p}, \quad \bar{m}_T = \frac{8\beta_0 m_T}{\pi m_p}, \quad \bar{d}_R = \frac{8\beta_0 d_R}{\pi m_p}, \\ \bar{d}_T &= \frac{8\beta_0 d_T}{\pi m_p}, \quad \bar{c}_R = \frac{8\beta_0 c_R}{\pi m_p}, \quad \bar{c}_T = \frac{8\beta_0 c_T}{\pi m_p}, \quad \bar{g} = \frac{16\beta_0 (m_T + m_R)}{\pi m_p}. \end{aligned} \quad (16)$$

Первые пять слагаемых левой части уравнения (15) соответствуют известной модели динамики кольцевого резонатора [4—6], остальные элементы определяют приведенные воздействия на резонатор со стороны упругого подвеса. В полном виде модель (15) позволяет проектировать ММГ R-типа как единую конструкцию резонатор—упругий подвес. Для простейшей схемы упругого элемента, приведенной на рис. 1, расчет коэффициентов (16) не представляет сложности. Для более сложных схем упругого элемента расчет коэффициентов (16) может быть реализован с использованием методов конечных элементов и соответствующих программных средств.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №13-08-01016.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hopkin I.* Performance and Design of Silicon Micromachined Gyro // Symposium Gyro Technology. Germany, 1997. P. 1.0—1.10.
2. *Fell C. P., Hopkin I., Townsend K., Sturland I.* A Second Generation Silicon Ring Gyroscope // Symposium Gyro Technology. Germany, 1999.
3. *Zarabadi S.* A Resonating Comb/Ring Angular Rate Sensor // Delphi Delco Electronics Systems, Sensors and Actuators. 1999. SP-1443.
4. *Журавлев В. Ф., Климов Д. М.* Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985. 126 с.
5. *Северов Л. А.* Механика гироскопических систем. М.: МАИ, 1996. 212 с.
6. *Матвеев В. Л., Липатников В. И., Алехин А. В.* Проектирование волнового твердотельного гироскопа. М.: МГТУ, 1998. 168 с.
7. *Северов Л. А., Золотарев С. К., Овчинникова Н. А., Панферов А. И., Пономарев В. К.* Информационные характеристики микромеханических гироскопов на основе кремниевой технологии микроэлектромеханических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. № 8. С. 12—23.

Сведения об авторах

- Леонид Анатольевич Северов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра эксплуатации и управления аэрокосмическими системами;
E-mail: severov@aanet.ru
- Валерий Константинович Пономарев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра эксплуатации и управления аэрокосмическими системами;
E-mail: severov@aanet.ru
- Александр Иванович Панферов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра эксплуатации и управления аэрокосмическими системами;
E-mail: panferov@aanet.ru
- Наталья Анатольевна Овчинникова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра эксплуатации и управления аэрокосмическими системами;
E-mail: reale@mail.ru

Рекомендована кафедрой
эксплуатации и управления
аэрокосмическими системами

Поступила в редакцию
25.11.13 г.

В. И. ВЕТРЕНКО, Т. И. РОМАНОВА, А. С. РОМАНОВ

ГИРОСКОПИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ДВУХКОЛЕСНОГО ПОДВИЖНОГО УСТРОЙСТВА

Описан принцип стабилизации двухколесного подвижного объекта с использованием одноступенного гироскопа на базе мотоцикла с передним самоустанавливающимся колесом. Определены условия стабилизированного движения конструкции. Предложена кинематическая схема двухколесного мотоцикла и создан его действующий макет.

Ключевые слова: гироскоп, стабилизация, гироскопический момент, двухколесный подвижный объект, самоустанавливающееся колесо.

Как известно, гироскопический эффект, обусловленный свойством быстровращающихся масс сохранять положение неизменным в пространстве, находит широкое применение в современной технике. Многообразие возможностей использования гироскопа привлекает к нему внимание специалистов из различных сфер деятельности. Особый интерес представляет использование гироскопа на транспортных средствах для стабилизации их положения при движении без непосредственного участия человека. Разработанная конструкция должна обладать минимальными кинематическими связями.

Теоретическое обоснование стабилизации объектов при движении дано в работах [1, 2], где приведены условия устойчивого передвижения двухколесного велосипеда и мотоцикла по плоской поверхности без проскальзывания при непосредственном управлении седока. Задачи стабилизации подвижного объекта с помощью гироскопа описаны, в частности, в работе [3]. В результате был сконструирован двухколесный мотоцикл [4] на основе двухступенного гироскопа с шарнирной связью наружной рамки маховика с подвижной передней вилкой. Недостатком этой модели являлось то, что при движении задним ходом модель опрокидывалась под воздействием внешних моментов и сил, т.е. становилась неустойчивой при движении по плоской поверхности, а также могла двигаться только по дуге окружности. В работе [5] этот недостаток конструкции устранен.

В работе [6] описывается модель двухколесного автомобиля П. П. Шиловского с двухступенным гироскопом, снабженным стабилизирующим моментным двигателем, но уже без шарнирных связей с вилкой колеса. Компанией „Lit Motors“ опубликованы [7] изображения двухколесного мотоцикла, стабилизация которого осуществляется двумя двухступенными гироскопами, их главные оси расположены под углом в 45° к друг другу.

С целью уменьшения числа кинематических связей и упрощения конструкции была разработана иная схема стабилизации двухколесного подвижного устройства (рис. 1). В настоящей статье приводятся описание и принцип работы двухколесного мотоцикла, снабженного одноступенным инерционным пружинным гироскопом [8], но без механических связей с передней вилкой мотоцикла (рис. 1). Гироскоп 1 установлен в корпусе мотоцикла 2 таким образом, что его главная ось находится в горизонтальной плоскости AOB , перпендикулярна направлению движения мотоцикла, а вектор кинетического момента \mathbf{H} гироскопа направлен влево вдоль оси A относительно направления движения мотоцикла вперед. При этом мотоцикл имеет самоустанавливающееся переднее колесо 3 и заднее опорное колесо 4, движение которого обеспечивает привод 5.

Стабилизация в вертикальной плоскости независимо от направления движения производится гироскопическим моментом, возникающим вследствие отклонения корпуса мотоцикла от вертикали. На рис. 2 приведена принципиальная устойчивая схема стабилизации мотоцикла

(обозначения 1—3 — то же, что и на рис. 1). Так как центр масс мотоцикла находится выше точки опоры, то при его отклонении в плоскости AOC под действием веса P , например, влево возникает внешний опрокидывающий момент $M_B = P_1L$, где L — расстояние от центра масс до точки опоры колеса, вектор которого будет направлен в противоположную сторону движения по оси B . Этот момент вызовет прецессию гироскопа относительно оси C с угловой скоростью прецессии $W_{п.}$. В результате вектор H будет стремиться по кратчайшему расстоянию совместиться с вектором внешнего момента M_B таким образом, что если смотреть с конца вектора угловой скорости прецессии $W_{п.}$, этот поворот будет происходить против часовой стрелки, т.е. мотоцикл будет поворачивать влево (самоустанавливающееся колесо повернется влево, и мотоцикл начнет двигаться влево).

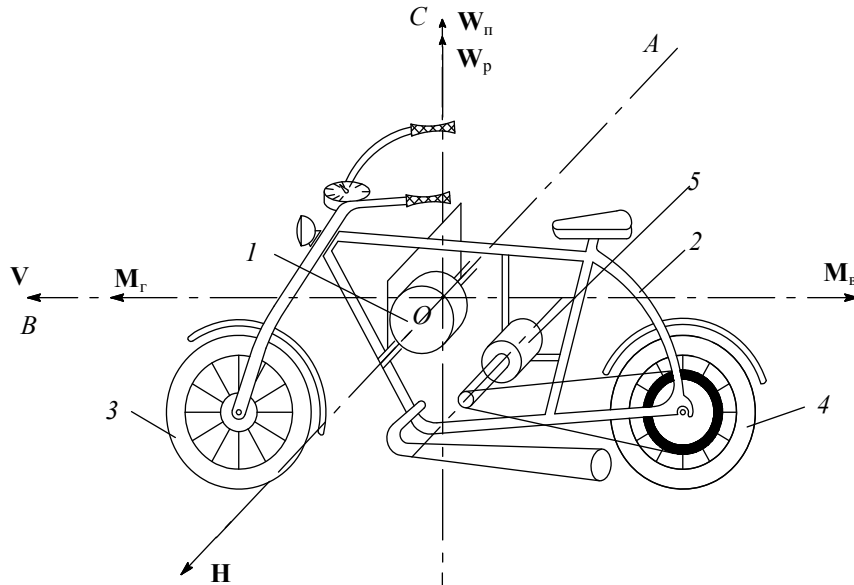


Рис. 1

В свою очередь, угловая скорость $W_{п.}$, направленная по оси C , вызовет появление действующего относительно оси B гироскопического момента $M_g = HW_{п.}$, стремящегося совместить направленный в противоположную сторону от внешнего момента M_B вектор кинетического момента H с вектором скорости $W_{п.}$. С этого мгновения прекратится отклонение мотоцикла от вертикали в плоскости AOC . Как выше сказано, мотоцикл приводится в движение с помощью привода заднего колеса, поэтому он продолжает двигаться по дуге окружности с дополнительной угловой скоростью разворота W_p , направленной в ту же сторону, что и $W_{п.}$ по оси C . Поэтому гироскопический момент $M_g = H(W_{п.} + W_p)$ будет увеличиваться и начнет превышать внешний опрокидывающий момент. Угол отклонения Q будет уменьшаться, самоустанавливающееся колесо расположится в плоскости BOC , и мотоцикл вернется в вертикальное положение. В этом случае критерий устойчивости мотоцикла запишется в виде

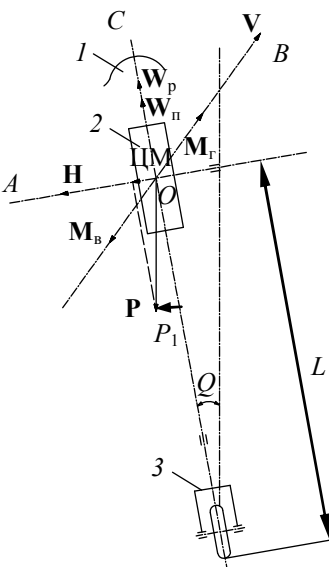


Рис. 2

$$W_p = P_1L/H - W_{п.} \tag{1}$$

Но в силу инерции конструкции вращение относительно оси B будет продолжаться. Мотоцикл отклонится вправо от вертикали в плоскости AOC . Повторится процесс, описанный выше: самоустанавливающееся колесо уже повернется вправо, и начнется движение по дуге окружности в этом направлении. В свою очередь, возникнет стабилизирующий гироскопический момент, и мотоцикл вернется в вер-

тикальное положение. Таким образом, мотоцикл будет двигаться практически по прямолинейной траектории. Для разворота влево или вправо к корпусу мотоцикла необходимо приложить дополнительный внешний опрокидывающий момент.

Рассмотрим вариант компоновки мотоцикла для случая, когда вектор кинетического момента \mathbf{H} гироскопа направлен вправо относительно направления движения мотоцикла вперед. На рис. 3 приведена принципиальная неустойчивая схема мотоцикла. Так, при отклонении мотоцикла от вертикали под действием веса P вправо возникнет внешний опрокидывающий момент \mathbf{M}_B . Этот момент вызовет прецессию гироскопа с угловой скоростью \mathbf{W}_n , под действием которой мотоцикл будет стремиться повернуться влево. Возникнет гироскопический момент $\mathbf{M}_r = \mathbf{H}\mathbf{W}_n$, который стабилизирует отклонение мотоцикла от вертикали. Но кинематика мотоцикла такова, что самоустанавливающееся колесо повернется вправо, и он начнет двигаться по дуге окружности вправо с угловой скоростью разворота \mathbf{W}_p , направленной в противоположную сторону скорости прецессии \mathbf{W}_n по оси C . Вследствие этого гироскопический момент $\mathbf{M}_r = \mathbf{H}(\mathbf{W}_n - \mathbf{W}_p)$ будет уменьшаться, что позволит внешнему моменту \mathbf{M}_B опрокинуть конструкцию на правую сторону. При отклонении мотоцикла влево повторится такой же процесс с опрокидыванием влево.

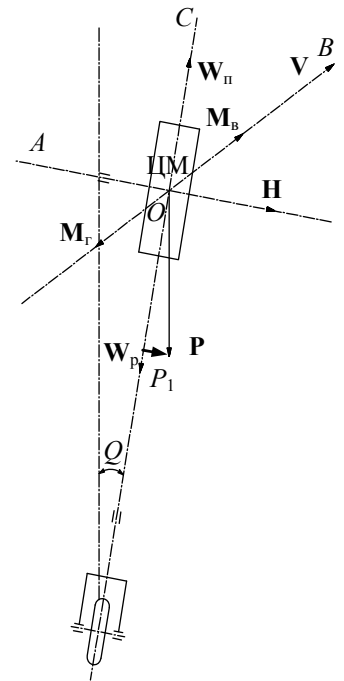


Рис. 3

Таким образом, в настоящей статье описан принцип стабилизации двухколесного мотоцикла с использованием одностепенного гироскопа, определены основные условия стабилизированного движения мотоцикла. Основным фактором такого движения является направление кинетического момента гироскопа относительно вектора линейной скорости мотоцикла. Он должен направляться влево от вектора скорости мотоцикла \mathbf{V} , а переднее колесо должно быть самоустанавливающимся. Тогда конструкция мотоцикла становится устойчивой к воздействию внешних опрокидывающих моментов и сил, а условие устойчивости записывается в виде равенства (1). На основании проведенных исследований была разработана и реализована модель гироскопического двухколесного мотоцикла, полностью подтвердившая представленные положения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неймарк Ю. А., Фуфаев Н. А. Динамика неголономных систем. М.: Наука, 1967. 519 с.
2. Лурье А. И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961. 371 с.
3. Ишинский А. Ю. О неголономном движении гироскопических систем. Прикладные задачи механики. Кн. 2. Механика упругих и абсолютно твердых тел. М.: Наука, 1986. 350 с.
4. Патент Франции № 522726, МКИ А 63 Н 11/14. 1924.
5. Патент SU №1760972, МКИ А63 Н 13/14 / В. И. Ветренко, О. В. Глазкин, В. И. Копытов, В. А. Петрухин, С. Н. Самойлов. 1992. БИ № 33.
6. Павлов В. А. Гироскопический эффект, его проявления и использование. Л.: Судостроение, 1978. 123 с.
7. [Электронный ресурс]: <<http://icarbio.ru/news/2012/janeuary/rolling-smartphon.html>>.
8. Патент SU №1806292, МКИ F03 G 1/02/ 3/08 / В. И. Ветренко, О. В. Глазкин, В. И. Копытов, В. А. Петрухин, С. Н. Самойлов. 1993. БИ № 12.

Сведения об авторах

- Владимир Ильич Ветренко** — канд. техн. наук, доцент; Томский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра производственного менеджмента; E-mail: vladim.vetrenko@yandex.ru
- Татьяна Ильинична Романова** — Томский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра производственного менеджмента; старший преподаватель; E-mail: e2e4@vtomske.ru
- Александр Сергеевич Романов** — студент; Томский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра производственного менеджмента; E-mail: rmnw@mail.ru

Рекомендована кафедрой
производственного менеджмента

Поступила в редакцию
08.01.14 г.

УДК 527.6

Л. П. БАРАБАНОВА

АЛГОРИТМ ДЛЯ ПРИЕМНИКА ГЛОБАЛЬНОГО СПУТНИКОВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В НЕОДНОРОДНОЙ АТМОСФЕРЕ

Представлен новый алгоритм для навигационного приемника системы глобального спутникового позиционирования, разработанный на основе лучевой теории в предположении, что известна зависимость скорости света от расстояния до поверхности Земли.

Ключевые слова: навигационный приемник, скорость света, алгоритм, навигация, боковой параметр, задержка прибытия сигнала.

За последние годы написано много статей о влиянии неоднородности атмосферы на показания глобальных навигационных спутниковых систем. Оптимизировать данные навигационных измерений, выполненных с помощью специальной аппаратуры, возможно благодаря тому, что в документах систем GPS и ГЛОНАСС [1] полностью приводятся протоколы приема-передачи навигационных спутниковых сообщений. Настоящая статья посвящена исследованию алгоритмов вторичной обработки сигналов с целью повышения точности позиционирования в неоднородной атмосфере Земли.

Если бы атмосфера была однородной, то задача навигации в ней могла быть решена как разностно-дальномерная. Термин „разностно-дальномерная задача“ (РДЗ) впервые был предложен в работе [2], спустя несколько лет в англоязычной литературе этот метод навигации получил название TDOA (Time Difference of Arrival). Отечественные специалисты называют этот метод беззапросным, поскольку подразумевается, что приемник только принимает сигналы синхронных излучателей (маяков), не отвечая на них. Этот принцип использован в методах спутниковой навигации, в которых основным параметром является неизвестный при привязке к спутниковой шкале времени [3, 4] момент времени синхронного излучения.

Введем исходную базовую систему уравнений РДЗ для однородной атмосферы

$$|x - a_j| = c(t_j - \tau); \quad j = 0, \dots, N - 1, \quad (1)$$

здесь $|x - a_j|$ — расстояние от известного навигационного спутника (маяка) a_j до неизвестного приемника x , c — известная постоянная скорость света, τ — неизвестный момент синхронного излучения радиосигналов маяками (по часам приемника), t_j — измеренный момент

приема радиосигнала маяка a_j (по часам приемника x), N — число маяков. Число неизвестных, таким образом, 4, поэтому требуется как минимум четыре спутника ($N \geq 4$). В этой задаче основное внимание следует уделить временным параметрам.

В РДЗ параметр τ исключается путем вычитания одного из уравнений из всех других, таким образом необходимо найти трехмерный столбец x :

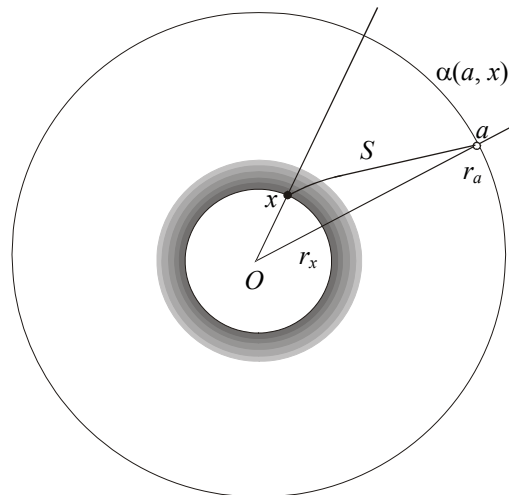
$$|x - a_j| - |x - a_0| = c(t_j - t_0); \quad j = 1, \dots, (N - 1).$$

Особенности базовой системы уравнений для глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) и конечный алгоритм для нее представлены в работе [5].

Повысить точность показаний GNSS возможно следующим образом. Исходя из той или иной модели атмосферы сначала находят задержки радиосигналов в атмосфере, а затем вычитают их из соответствующих показаний t_j таймера приемника в базовой системе уравнений для вакуума [4]. Такой подход является эвристическим.

Существует более строгий подход [5—7], согласно которому сама скорость света считается неизвестной величиной и находится из базовой системы уравнений как эффективная скорость радиосигнала вместе с четырьмя неизвестными параметрами позиционирования. Этот подход предполагает видимость пяти и более спутников, его применение в высокочувствительных приемниках обеспечивает значительное повышение точности позиционирования GNSS.

В настоящей статье использована модель сферически слоистой атмосферы, при этом считается, что зависимость скорости света от расстояния до Земли известна. Далее эта зависимость обозначается как $c(r)$, где r — расстояние от центра Земли (см. рисунок). В развитие идей работы [5] в настоящей работе выведена система уравнений навигации в рамках лучевой теории для сферически слоистой среды, а также получен алгоритм решения этой системы. При таком подходе релятивистскими эффектами и вращением Земли можно пренебречь.



Согласно принципу Ферма, время распространения излучения минимизировано [8]. Непосредственно из этого принципа следует, что траектория луча лежит в вертикальной плоскости, проходящей через навигационный спутник a и приемник x (см. рисунок). В плоскости aOx введем полярные координаты (r, α) с центром O . В этих координатах для дифференциала ds дуги луча имеем

$$ds = \sqrt{(dr)^2 + r^2 (d\alpha)^2} = \sqrt{1 + r^2 \alpha'(r)^2} dr. \quad (2)$$

Соответственно время пробега луча по пути S между маяком a и приемником x есть

$$T(S) = \int_I \frac{ds}{c(r)} = \int_I \frac{\sqrt{1+r^2\alpha'(r)^2}}{c(r)} dr,$$

где $I = [r_x, r_a]$.

По принципу Ферма на пути S функционал $T(S)$ достигает минимума, это условие определяется уравнением Эйлера [9]:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{\partial}{\partial \alpha'} \left(\frac{\sqrt{1+r^2\alpha'(r)^2}}{c(r)} \right) \right) = 0.$$

Отсюда получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{r^2\alpha'(r)}{c(r)\sqrt{1+r^2\alpha'(r)^2}} = \lambda = \text{const},$$

которое преобразуется в

$$\alpha'(r) = \frac{\lambda c(r)}{r\sqrt{r^2 - \lambda^2 (c(r))^2}}. \quad (3)$$

Следовательно, угловое расстояние в радианах между маяком и приемником есть

$$\alpha(a, x) = \int_{r_x}^{r_a} \frac{\lambda c(r)}{r\sqrt{r^2 - \lambda^2 (c(r))^2}} dr. \quad (4)$$

С другой стороны, это же угловое расстояние, согласно сферической геометрии [10], есть

$$\alpha(a, x) = \arccos(\sin \varphi_a \sin \varphi_x + \cos \varphi_a \cos \varphi_x \cos(\psi_x - \psi_a)), \quad (5)$$

где φ_a, ψ_a — известные широта и долгота маяка в стандартных земных сферических координатах, а φ_x, ψ_x — неизвестные широта и долгота приемника в тех же координатах. Из условия равенства (4), (5) получим первое уравнение для a :

$$\alpha(a, x) - \int_{r_x}^{r_a} \frac{\lambda c(r)}{r\sqrt{r^2 - \lambda^2 (c(r))^2}} dr = 0.$$

Если $\lambda = 0$, то $\alpha(a, x) = 0$, т.е. маяк a_j находится в зените по отношению к приемнику x_j .

Очевидно также, что подынтегральное выражение возрастает по λ . Поэтому возрастает с увеличением λ и угловое расстояние $\alpha(a, x)$. Сказанное позволяет назвать параметр λ *боковым параметром* луча, он имеет физическую размерность времени.

Второе уравнение для a получим, используя выражения (2) и (3):

$$dt = \frac{ds}{c(r)} = \frac{\sqrt{1+r^2\alpha'(r)^2}}{c(r)} dr = \frac{1}{c(r)} \sqrt{1 + \frac{\lambda^2 c(r)^2}{r^2 - \lambda^2 c(r)^2}} dr = \frac{r}{c(r)\sqrt{r^2 - \lambda^2 c(r)^2}} dr,$$

откуда

$$t - \tau - \int_{r_x}^{r_a} \frac{r}{c(r)\sqrt{r^2 - \lambda^2 c(r)^2}} dr = 0,$$

Следовательно, для описания сигналов каждого спутника $j = 0, \dots, N-1$ могут быть использованы два уравнения, т.е. получим систему из $2N$ уравнений при $4 + N$ неизвестных $\tau, r_x, \varphi_x, \psi_x, \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{N-1}$. Отсюда ясно, что должно быть $2N \geq 4 + N$, т.е. $N \geq 4$ маяков. Тогда получается новая базовая система $2N$ уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha(a_j, x) - \int_{r_x}^{r_{a_j}} \frac{\lambda_j c(r)}{r \sqrt{r^2 - \lambda_j^2 c(r)^2}} dr = 0, \\ t_j - \tau - \int_{r_x}^{r_{a_j}} \frac{r}{c(r) \sqrt{r^2 - \lambda_j^2 c(r)^2}} dr = 0. \end{array} \right. \quad (6)$$

Таким образом, предлагаемый метод при минимальном числе $N = 4$ видимых маяков приводит к системе из 8 уравнений с 8 неизвестными $\tau, r_x, \varphi_x, \psi_x, \lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$.

Нетрудно проверить, при $c(r) = c = \text{const}$ система уравнений (6) после исключения $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ и возврата к декартовым координатам сведется к системе (1).

Алгоритм. При $N = 4$ система (6) решается с использованием итерационного алгоритма Ньютона, а при $N > 4$ — итерационным алгоритмом Гаусса—Ньютона.

При использовании этих алгоритмов важно правильно выбрать начальное приближение. В данном случае для $\tau, r_x, \varphi_x, \psi_x$ это может быть результат любого известного способа GNSS-позиционирования с пересчетом декартовых координат в сферические. Значения $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{N-1}$ можно найти из четных уравнений системы (второе уравнение для каждого маяка) по формуле

$$\lambda_j = \frac{1}{2(t_j - \tau)} \sqrt{4(t_j - \tau)^2 \left(\frac{r_{a_j}}{c} \right)^2 - \left((t_j - \tau)^2 + \left(\frac{r_{a_j}}{c} \right)^2 - \left(\frac{r_x}{c} \right)^2 \right)^2},$$

где c — некоторая усредненная скорость света.

Заключение. Представленный алгоритм позволяет наиболее точно вычислить местоположение приемника в сферически слоистой среде. Время решения предложенной базовой системы $2N$ уравнений больше времени решения исходной базовой системы. Однако для многих навигационных и для большинства геодезических задач такие задержки несущественны. Для практического применения предложенного метода полезным может оказаться учет (исходя из начального приближения) локальных неоднородностей атмосферы.

Достоинством предложенной базовой системы уравнений является возможность выбора различных моделей зависимости скорости света от расстояния до поверхности Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС // Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.1. М., 2008.
2. Барабанов О. О., Барабанова Л. П. Универсальный конечный алгоритм для разностно-дальномерной навигационной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 1989. № 5. С. 42—45.
3. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. М.: Техносфера, 2002.
4. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2005. С. 237—245.
5. Барабанов О. О., Барабанова Л. П. Математические задачи дальномерной навигации. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 272 с.
6. Барабанов О. О., Барабанова Л. П. Новый метод разностно-дальномерного позиционирования с оценкой скорости света // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2008. № 4. С. 90—96.

7. Патент РФ № 2310213. Способ разностно-дальномерного определения декартовых координат приемника / *О. О. Барабанов, Л. П. Барабанова*. 10.10.2007.
8. *Китайгородский А. И.* Введение в физику. М.: Наука, 1973. С. 129.
9. *Лаврентьев М., Люстерник Л.* Основы вариационного исчисления. Т. I. Ч. II. М.—Л.: Объединенное науч.-техн. изд-во НКТП СССР, 1935. С. 9—15.
10. *Жаров В. Е.* Сферическая астрономия. М., 2006. С. 67.

Сведения об авторе

Любовь Петровна Барабанова — канд. физ.-мат. наук, доцент; Ковровская государственная технологическая академия им. В. А. Дегтярева; E-mail: lpbarabanova@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
высшей математики

Поступила в редакцию
11.11.13 г.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 519.7; 004.056

С. А. Куш

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ С COGNATE-РЕАЛИЗАЦИЕЙ

Предложено использовать cognate-представление булевых функций при аналого-цифровом преобразовании. Это позволяет оптимальным образом доопределить полученную функцию и сэкономить аппаратные затраты при проектировании и использовании аналого-цифровых преобразователей.

Ключевые слова: cognate-реализация, аналого-цифровой преобразователь, частично определенные булевы функции, доопределение булевых функций.

Введение. Cognate-реализация булевых функций (БФ) предложена в работе [1] в качестве обобщения классической однозначной реализации комбинационных схем (КС). КС являются информационными ядрами конечных (цифровых) автоматов. Классическая реализация КС на n двоичных входах и выходах заключается в формировании системы БФ, каждая из которых реализует отдельную логическую функцию от n аргументов:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_1(X_n), \\ y_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_2(X_n), \\ &\dots \\ y_m &= f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_m(X_n), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где x_i — входные сигналы КС, y_i — выходные функции КС, f_i — логические функции для i -го выхода КС. Cognate-реализация БФ отличается от классической тем, что позволяет вместе с полиномиальными применять так называемые „близкие“ БФ. Система (1) в случае использования cognate-реализации будет выглядеть следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= f_1[X^{(n)}] \vee F_{11}[X^{(n)}] \vee \dots \vee F_{1p_1}[X^{(n)}], \\ &\vdots \\ Z_m &= f_m[X^{(n)}] \vee F_{m1}[X^{(n)}] \vee \dots \vee F_{mp_m}[X^{(n)}], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $X^{(n)}$ — вектор аргументов размерности n , т.е. вектор дискретных сигналов на входах КС; $f_1[X^{(n)}], \dots, f_m[X^{(n)}]$ — БФ, которые задаются для КС с помощью таблицы истинности или другим способом, т.е. БФ, реализующие номинальный режим работы КС;

$F_{11}[X^{(n)}], \dots, F_{1p_1}[X^{(n)}]$ — допустимые варианты реализации начальной БФ $f_1[X^{(n)}]$;
 $F_{m1}[X^{(n)}], \dots, F_{mp_1}[X^{(n)}]$ — допустимые варианты реализации начальной БФ $f_m[X^{(n)}]$.

Далее указания на действительную зависимость от $X^{(n)}$ всех компонентов системы (2) будем опускать, т.е. (1) будем записывать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= f_1 \vee F_{11} \vee \dots \vee F_{1p_1}; \\ &\vdots \\ Z_m &= f_m \vee F_{m1} \vee \dots \vee F_{mp_m}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Из системы (3) видно, что каждая БФ в общем случае может быть реализована в виде p_i родственных (близких) вариантов. В работе [2] доказано, что любая БФ имеет некоторое множество близких функций, мощность которого зависит от условий применения cognate-реализации, а следовательно реализована в cognate-форме.

Цель настоящей работы — количественно оценить эффективность применения cognate-реализации и сравнить ее с эффективностью классической однозначной реализации (см. (1)) в устройствах аналого-цифрового преобразования (АЦП).

Безусловно, эффективность cognate-реализации зависит от условий формирования множества близких БФ, многообразие вариантов такого формирования не позволяет описать их в полном объеме. Рассмотрим cognate-реализацию БФ:

1) в блоках, обрабатывающих цифровую информацию и содержащих элементы выявления и корректировки ошибок в одном или двух произвольных разрядах выходного сигнала;

2) в которых множество близких БФ состоит из различных альтернативных форм представления;

3) в которых цифровая информация обрабатывается на основе аналого-цифрового преобразования входной аналоговой информации.

Выбор варианта определяется четкими правилами формирования множеств близких БФ, которые позволяют средствами технологии Extended Data Mining [3] поставить вычислительный эксперимент по определению среднестатистической оценки эффективности cognate-реализации. Далее рассмотрим третий вариант, а именно — выигрыш при аналого-цифровом преобразовании. Как правило, количество разрядов в типичных АЦП среднего класса составляет 12, т.е. погрешность в одном младшем разряде составляет $2^{-12}=2,4 \cdot 10^{-4}$ в двух разрядах — $2^{-12}=4,9 \cdot 10^{-4}$, в трех — $2^{-10}=9,8 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, для типовых инженерных реализаций, когда погрешность входной аналоговой информации не превышает $\pm 0,1\%$, вполне обоснованно считать, что номинальная функция f_i (3) является частично определенной БФ (ЧОБФ) с тремя неопределенными младшими разрядами. Это позволяет для каждой номинальной ЧОБФ после оптимального доопределения составить соответствующую оптимально определенную БФ, например, в классической, Риды-Мюллера, или алгебраической форме представления [4]. На рис. 1 предлагается схема процесса аналого-цифрового преобразования с блоками обработки и минимизации при использовании cognate-реализации БФ.

Количественное сравнение параметров булевых функций в классической и оптимальной БФ после доопределения было проведено по суммам следующих показателей:

— S_{ad} — число слагаемых в записи булевой функции, которая определяет количество входов подматрицы ПЛМ2, т.е. в той части ПЛМ, в которой формируются дизъюнкции;

— S_s — габаритная площадь полуматрицы формирования конъюнкций ПЛМ1;

— S_L — классический показатель — число букв в минимизированной дизъюнктивно-нормальной форме БФ [4]. Результаты расчетов приведены в табл. 1—3 (звездочкой обозначены приближенные значения показателей). Рассматривались случаи доопределения по од-

ному, двум и трем младшим разрядам, для функций $n = 2, 3, 4$ переменных, по всему множеству функций. На рис. 2 приведен выигрыш N при определении функций, $k=1$; рис. 3 — $k=2$; рис. 4 — $k=3$.



Рис. 1

Таблица 1

Сравнение суммарных показателей при $k=1$

n	Число БФ	S_s	S_s^*	S_L	S_L^*	S_{ad}	S_{ad}^*
2	16	80	28	29	16	20	14
3	256	3540	1548	1218	756	590	486
4	65536	2167176	1206936	766860	550650	270897	248066

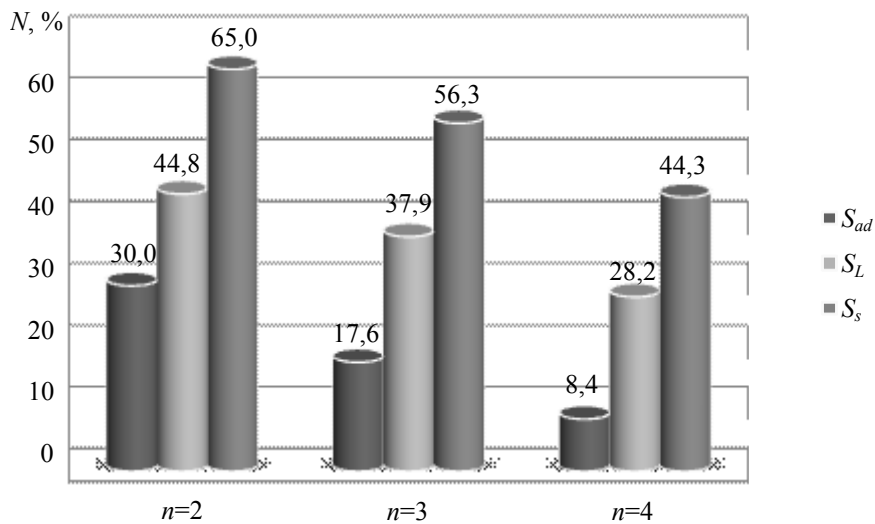


Рис. 2

Таблица 2

Сравнение суммарных показателей при $k=2$

n	Число БФ	S_s	S_s^*	S_L	S_L^*	S_{ad}	S_{ad}^*
2	16	80	16	29	8	20	16
3	256	3540	1332	1218	624	590	428
4	65536	2167176	1101424	766860	492908	270897	232344

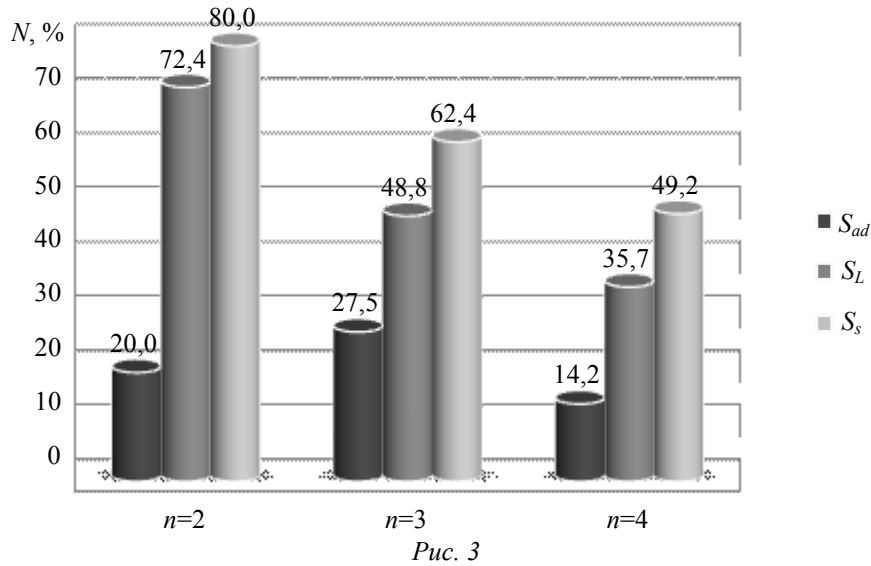
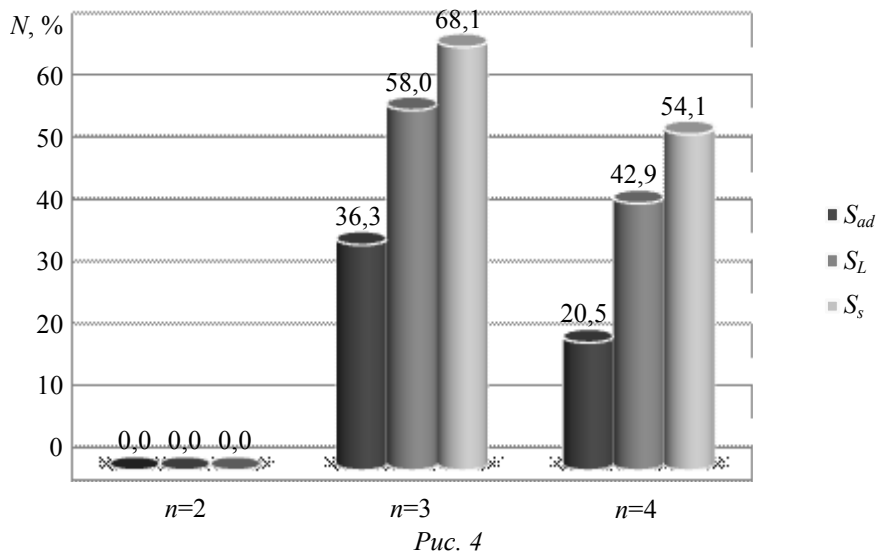


Таблица 3

Сравнение суммарных показателей при $k=3$

n	Число БФ	S_s	S_s^*	S_L	S_L^*	S_{ad}	S_{ad}^*
2	16	80	—	29	—	20	—
3	256	3540	1128	1218	512	590	376
4	65536	2167176	995264	766860	437528	270897	215288



Выводы. Результаты вычислительного эксперимента показали, что при использовании cognate-реализации эффективность получения оптимальной БФ растет: для коэффициента S_s — с 44 до 80 %, для S_{ad} — с 8,4 до 36,3 %, для S_L — с 28,2 до 72,4%. Это позволяет сделать вывод о перспективности предложенного метода, что выразится в экономии аппаратных затрат при создании оптимальных аналого-цифровых преобразователей для применения в устройствах считывания и защиты информации, а также радиоэлектронной аппаратуре широкого использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочкарев Ю. А., Куц С. А. Представление и реализация логических функций в родственной форме // Электронное моделирование. 2011. № 6. С. 73—80.

2. Кочкарев Ю. А., Куц С. А. Родственная реализация логических функций на основе их представления в изоморфной форме // Электронное моделирование. 2012. № 4. С. 119—123.
3. Кочкарев Ю. А., Бузько В. В., Кучерова Н. С. Исследование структуры полного множества логических функций на основе технологии EDM // Вестн. Черкасского гос. техн. ун-та. 2007. № 1—2. С. 60—65.
4. Кочкарев Ю. А., Казаринова Н. Л., Пантелева Н. Н., Шакун С. А. Классические и альтернативные минимальные формы логических функций. Черкассы: ИПМЭ, 1999. 195 с.

Сведения об авторе**Сергей Александрович Куц**

— канд. техн. наук; Черкасский государственный технологический университет, кафедра информатики и информационной безопасности; старший преподаватель; E-mail: kushch@ieee.org

Рекомендована кафедрой
информатики и информационной
безопасности

Поступила в редакцию
05.02.14 г.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.317

А. Л. СУШКОВ

КОРРЕКЦИЯ КРИВИЗНЫ ПОЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ЛИНЗЫ С РАДИАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Рассмотрены подходы к расчету линзы с минимизированной кривизной изображения в области аббераций третьего и высших порядков на основе применения неоднородной оптической среды с радиальным градиентом показателя преломления. Такая линза может быть использована с целью конструктивного упрощения компонента оптической системы для минимизации его габаритов.

Ключевые слова: линза, кривизна поля изображения, радиальный градиент показателя преломления.

Рассмотрим условие получения заданной величины кривизны поля третьего порядка (кривизны поля Петцваля) одиночной линзы в воздухе при наличии радиального градиента показателя преломления (ПП).

В однородной линзе кривизна изображения в области Зейделя отсутствует (изображение плоское), если линза является мениском с поверхностями равной кривизны. Это следует из формулы [1]:

$$S_{IVe} = -\sum \frac{\Delta\mu}{r}, \quad (1)$$

где $\mu = \frac{1}{n}$, n — показатель преломления материала линзы, r — радиус кривизны поверхности линзы, S_{IVe} — коэффициент Петцваля при естественной нормировке углов и высот первого и второго вспомогательных лучей.

При различных значениях кривизны поверхностей линзы изображение находится на поверхности с радиусом кривизны, определяемым из формулы [2]:

$$\frac{1}{R_p} = -\frac{n'}{f'} S_{IVk}, \quad (2)$$

где f' — фокусное расстояние линзы, n' — показатель преломления в пространстве изображений, R_p — радиус Петцваля, а коэффициент S_{IVk} имеет каноническую нормировку ($f'=1$).

Естественная и каноническая нормировки коэффициента S_{IV} связаны следующим образом: $S_{IVk} = S_{IVe} f'$.

Согласно формуле (1), для одиночной линзы имеем:

$$S_{IVe} = \frac{1}{n} (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3)$$

Оптическая сила тонкой линзы определяется как

$$\Phi = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (4)$$

откуда получим выражение:

$$S_{IVe} = \frac{\Phi}{n}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что при $f'=1$ коэффициент S_{IVk} для тонкой линзы есть величина, обратная показателю преломления n .

Из формулы (1) следует, что для сложных многолинзовых компонентов, содержащих k линз, формула (5) записывается в виде

$$S_{IV} = \sum \frac{\Phi_k}{n_k}, \quad (6)$$

где Φ_k — оптическая сила k -й линзы.

Согласно выражению (6), в схемах объективов с плоским изображением необходимо присутствие как положительных, так и отрицательных линз. Радиальная неоднородность ПП, согласно работе [3], является дополнительным коррекционным параметром для получения в линзе заданной кривизны изображения.

Радиальное распределение ПП в линзе задается полиномом:

$$n(y) = n_{00} + n_{10}y^2 + n_{20}y^4 + \dots,$$

где n_{00} — показатель преломления на оси линзы, n_{10} , n_{20} — коэффициенты, определяющие свойства градиентной среды в области первого и третьего порядков.

Покажем, что, воспользовавшись формулами для коэффициентов аберрации третьего порядка градиентных оптических систем на начальном этапе синтеза линзы, можно получить заданное значение коэффициента $S_{IV} = 0$ (в частном случае).

Известно [3, 4], что для градиентной линзы

$$S_{IVe} = \bar{S}_{IVe} + \tilde{S}_{IVe}, \quad (7)$$

где \bar{S}_{IVe} — однородная составляющая, обусловленная величиной показателя преломления и оптической силой тонкой линзы, \tilde{S}_{IVe} — составляющая, обусловленная наличием радиальной неоднородности показателя преломления:

$$\bar{S}_{IVe} = -\sum_1^2 \frac{\Delta\mu}{r_k} = \frac{n_{00} - 1}{n_{00}} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad \tilde{S}_{IVe} = -\frac{2n_{10}d}{n_{00}^2}, \quad (8)$$

где r_1 , r_2 — радиус кривизны 1-й и 2-й поверхностей линзы, d — толщина линзы.

Линза с радиальной неоднородностью ПП может быть описана эквивалентной системой из двух элементов в воздухе: однородной линзой толщиной d с радиусами кривизны r_1 , r_2 и плоскопараллельной пластинкой толщиной d с градиентным ПП (линза Вуда).

Анализ в параксиальной области показывает, что поскольку оптическая сила градиентной пластинки с фокусирующим и рассеивающим распределением ПП определяется зависимостью $\tilde{\Phi} = -2n_{10}d$, то основной параметр тонкой линзы П можно представить в виде суммы:

$$\Pi = \bar{\Pi} + \tilde{\Pi}, \quad (9)$$

где $\bar{\Pi}$, $\tilde{\Pi}$ — коэффициенты кривизны изображения π (по Г. Г. Слюсареву [1]) однородной линзы и градиентной плоскопараллельной пластинки:

$$\bar{\Pi} = \frac{1}{n_{00}}, \quad \tilde{\Pi} = \frac{1}{n_{00}^2}. \quad (10)$$

Если градиентная среда является фокусирующей, т.е. $n_{10} < 0$ и $\tilde{\Phi} > 0$, то для исправления кривизны Петцваля оптическая сила однородной линзы должна быть отрицательной. Использование условий (9) и (10) позволяет расширить возможности проектировщика по получению заданной величины кривизны поля в одиночной линзе.

Если воспользоваться соотношениями (7) и (8) для линзы малой, но конечной толщины, то для заданной величины $S_{IVк}$ получим соотношение кривизны поверхностей линзы:

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = \frac{S_{IVк} n_{00} + \frac{2n_{10}d}{n_{00}}}{(n_{00} - 1)}. \quad (11)$$

Оптическую силу тонкой градиентной линзы можно рассматривать как сумму оптических сил, обусловленных кривизной поверхностей линзы и неоднородной составляющей показателя преломления:

$$\Phi = \bar{\Phi} + \tilde{\Phi}, \quad (12)$$

где

$$\bar{\Phi} = \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) (n_{00} - 1) + \frac{(n_{00} - 1)^2 d}{r_1 r_2 n_{00}}, \quad (13)$$

$$\tilde{\Phi} = -2n_{10}d. \quad (14)$$

После подстановки (13) и (14) в (12) и алгебраических преобразований совместно с уравнением (11) получаем формулу для коэффициента n_{10} , при котором линза имеет заданную величину коэффициента $S_{IVк}$:

$$n_{10} = \frac{\frac{n_{00} - 1}{r_1^2 n_{00}} - \frac{1}{f'd(n_{00} - 1)} - \frac{S_{IVк}}{f'} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{n_{00}}{d(n_{00} - 1)} \right)}{\frac{2}{n_{00}} + \frac{2d}{r_1 n_{00}^2}}. \quad (15)$$

Формула (15) дает первое приближение в расчете заданной величины коэффициента $S_{IVк}$. Точность ее повышается с уменьшением толщины линзы.

В качестве примеров приведем результаты введения в исходно однородную линзу радиальной неоднородности ПП с целью исправления кривизны поля.

В табл. 1—9 приведены конструктивные данные линз с различной конфигурацией поверхностей, их фокусные расстояния и величины астигматических отрезков Z_m , Z_s (здесь ω , y' — угловое и линейное поле в пространстве предметов и изображений). Рассматриваются исходная однородная линза, линза с исправленной кривизной третьего порядка (15) и линза, кривизна поля высших порядков которой минимизирована оптимизацией кривизны поверхностей, толщины линзы, коэффициента n_{10} и положения входного зрачка s_p .

Пример 1. В табл. 1 приведены конструктивные параметры и aberrации исходной однородной линзы — *положительного мениска* с фокусным расстоянием $f' = 20$ мм. Входной зрачок расположен справа от первой поверхности на расстоянии $s_p = 3,0$ мм; $t = 0,000$ мм⁻¹ — фокусирующая константа; $r_1 = 8,000$; $r_2 = 21,75$; $d = 2$; $n_{00} = 1,6$; $n_{10} = 0,00$ мм⁻².

Таблица 1

ω, \dots°	$y', \text{ мм}$	$Z'_m, \text{ мм}$	$Z'_s, \text{ мм}$
-8,2850	3,00	-0,5832	-0,2822
-6,0208	2,12	-0,2966	-0,143
0,000	0,00	0,0000	0,0000

На краю поля линза имеет значительные астигматические отрезки Z'_m , Z'_s , $S_{IVе} = 0,029633$, $S_{IVк} = 0,59267$.

В табл. 2 приведены характеристики линзы после введения в ПП градиента по формуле (15). Линза имеет конфигурацию поверхностей „отрицательный мениск“. Параксиальные параметры: фокусное расстояние $f'=19,41$ мм; $s'_F=16,44$ мм; входной зрачок на расстоянии $s_p=3,0$ мм; $t = 0,176$ мм⁻¹; $r_1=8,000$; $r_2=4,382$; $d=2$; $n_{00}=1,6$; $n_{10}=-2,477 \cdot 10^{-2}$ мм⁻²; $S_{IVe}=8,575 \cdot 10^{-6}$, $S_{IVK}=1,665 \cdot 10^{-4}$.

Таблица 2

ω, \dots°	$y',$ мм	$Z'_m,$ мм	$Z'_s,$ мм
-8,4301	3,000	-0,3561	-0,1191
-6,1239	2,121	-0,1816	-0,0607
0,0000	0,000	0,0000	0,0000

В табл. 3 приведены параметры линзы после оптимизации: конфигурация линзы — „отрицательный мениск“: $f'=19,59$ мм; заднее вершинное фокусное расстояние $s'_F=16,273$ мм; $s_p=3,0$ мм; $t = 0,165$ мм⁻¹; $r_1=6,3736$; $r_2=4,044$; $d=2$; $n_{00}=1,6$; $n_{10}=-2,169 \cdot 10^{-2}$ мм⁻².

Таблица 3

ω, \dots°	$y',$ мм	$Z'_m,$ мм	$Z'_s,$ мм
-8,3833	3,0	-0,0258	-0,0079
-6,0922	2,12	-0,0168	-0,0046
0,0000	0,00	0,0000	0,0000

Из табл. 3 видно, что исправлены третьи и высшие порядки астигматизма и кривизны поля изображения, $S_{IVe}=3,355 \cdot 10^{-6}$, $S_{IVK}=6,573 \cdot 10^{-5}$.

Пример 2. В табл. 4 приведены параметры исходной двояковыпуклой однородной линзы, и ее параксиальные характеристики: $f' = 174,73$ мм; $s'_F=167,725$ мм; $s_p=3,0$ мм; $t = 0,000$ мм⁻¹; $r_1=99,7800$; $r_2=-674,008$; $d=12$; $n_{00}=1,5$; $n_{10}=0,000$.

Таблица 4

ω, \dots°	$y',$ мм	$Z'_m,$ мм	$Z'_s,$ мм
-3,1631	10,00	-1,008	-0,464
-2,1901	7,07	-0,505	-0,232
0,0000	0,00	0,0000	0,0000

Астигматические отрезки для края поля Z'_m, Z'_s имеют достаточно большую величину, $S_{IVe} = 0,03835$, $S_{IVK} = 0,6701$.

В табл. 5 приведены параметры линзы после введения в показатель ПП градиента. Линза приобрела конфигурацию „отрицательный мениск“, фокусное расстояние положительное: $f' = 166,112$ мм; $s'_F = 149,501$ мм; $s_p= 3,0$ мм; $t = 0,02919$ мм⁻¹; $r_1=99,78$; $r_2=32,818$; $d=12$; $n_{00}=1,5$; $n_{10}=-0,639 \cdot 10^{-3}$ мм⁻².

Таблица 5

ω, \dots°	$y',$ мм	$Z'_m,$ мм	$Z'_s,$ мм
-3,2636	10,00	-0,849	-0,282
-2,2611	7,07	-0,426	-0,141
0,0000	0,00	0,000	0,000

Введение в ПП градиента позволило приблизительно на 20—40 % уменьшить астигматические отрезки; $S_{IVe}=1,1278 \cdot 10^{-7}$, $S_{IVK}=1,874 \cdot 10^{-5}$.

В табл. 6 приведены конструктивные данные и астигматические отрезки градиентной линзы после оптимизации.

Параксиальные характеристики линзы: $f' = 166,12$ мм; $s'_F = 142,636$ мм; $s_p= 18,311$ мм; $t = 0,025633$ мм⁻¹; $r_1=41,693$; $r_2=25,178$; $d=12$; $n_{00}=1,5$; $n_{10}=-0,492 \cdot 10^{-3}$ мм⁻².

Таблица 6

ω, \dots°	$y',$ мм	$Z'_m,$ мм	$Z'_s,$ мм
-3,2630	10,00	0,0005	0,0001
-2,2609	7,07	-0,0006	-0,0001
0,0000	0,00	0,0000	0,0000

Астигматизм и кривизна поля исправлены, высшие порядки aberrаций скомпенсированы третьими порядками; $S_{IVe}=1,2362 \cdot 10^{-5}$, $S_{IVk}=2,054 \cdot 10^{-3}$.

Пример 3. Абберационные параметры исходной однородной отрицательной двояковогнутой линзы приведены в табл. 7. Линза имеет характеристики: $f' = -170,011$ мм; $s'_F = -175,82$ мм; $s_p = 10,99$ мм; $S_{IVe} = -3,667 \cdot 10^{-3}$; $S_{IVk} = 0,6235$; $t = 0,00$ мм⁻¹; $r_1 = -109,75$; $r_2 = 1493,8$; $d = 10$; $n_{00} = 1,6$; $n_{10} = -0,000$ мм⁻².

Таблица 7

ω, \dots°	$y',$ мм	$Z'_m,$ мм	$Z'_s,$ мм
3,2202	10,00	1,071	0,480
2,2254	7,07	0,536	0,240
0,0000	0,00	0,000	0,0000

Как видно из табл. 7, линза имеет достаточно большие положительные величины астигматических отрезков Z'_m, Z'_s .

Абберационные характеристики линзы после введения градиента ПП приведены в табл. 8. Линза имеет характеристики: $f' = -178,557$ мм; $s'_F = -194,43$ мм; $s_p = 10,99$ мм; $S_{IVe} = -2,299 \cdot 10^{-7}$; $S_{IVk} = 4,1059 \cdot 10^{-5}$; $t = 0,03275$ мм⁻¹; $r_1 = -109,75$; $r_2 = -37,054$; $d = 10$; $n_{00} = 1,6$; $n_{10} = 0,8580 \cdot 10^{-3}$ мм⁻². Градиентная среда рассеивающего типа.

Таблица 8

ω, \dots°	$y',$ мм	$Z'_m,$ мм	$Z'_s,$ мм
3,1224	10,00	0,208	0,0755
2,1604	7,07	0,101	0,0381
0,000	0,00	0,000	0,0000

Введение градиента ПП позволило почти в пять раз уменьшить астигматические отрезки Z'_m, Z'_s .

В табл. 9 приведены параметры линзы после оптимизации: $f' = -178,563$ мм; $s'_F = -179,302$ мм; $s_p = 47,495$ мм; $S_{IVe} = -2,1316 \cdot 10^{-3}$; $S_{IVk} = 0,3807$; $t = 0,02701$ мм⁻¹; $r_1 = 365,891$; $r_2 = 423,507$; $d = 4,981$; $n_{00} = 1,6$; $n_{10} = 0,5836 \cdot 10^{-3}$ мм⁻².

Таблица 9

ω, \dots°	$y',$ мм	$Z'_m,$ мм	$Z'_s,$ мм
3,1227	10,00	-0,0216	0,0645
2,1605	7,07	-0,0106	0,0325
0,000	0,00	0,000	0,000

Выводы. Аналитические формулы позволяют получить первичные конструктивные данные линзы с исправленной кривизной поля третьего порядка. Для исправления кривизны поля при конечных углах поля требуется численная оптимизация формы линзы на минимум астигматических отрезков.

Анализ показал, что радиальный градиент ПП в области конечных величин углового поля наиболее эффективен в менискообразных линзах.

Введение радиальной неоднородности показателя преломления собирающего или рассеивающего типов позволяет исправить в линзе третьи порядки aberrации кривизны поля, что расширяет возможности оптика-конструктора по коррекции остальных aberrаций оптической системы третьего и высших порядков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. М.: Машиностроение, 1969. 550 с.
2. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. Л.: Искусство, 1972. 650 с.

3. Moore D. T., Salvage R. T. Radial gradient-index lenses with zero Petzval aberration // Appl. Optics. 1980. Vol. 19, N 7. P. 1081—1086.
4. Сушков А. Л. Монохроматические aberrации градиентов как базовых элементов жестких эндоскопов. Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 44 с.

Сведения об авторе

Александр Леонидович Сушков

— канд. техн. наук, доцент; МГТУ им. Н. Э. Баумана; кафедра лазерных оптико-электронных систем; E-mail: ale-sushkov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
лазерных оптико-электронных
систем

Поступила в редакцию
28.10.10 г.

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 629.7

И. В. ЗАХАРОВ, Г. В. КРЕМЕЗ, Е. В. ФРОЛКОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ СЕРИИ „МОЖАЕЦ“

Представлены результаты выполненных на космических аппаратах „Можаяец-3“ и „Можаяец-4“ натуральных экспериментов, в которых исследовалось влияние факторов космического пространства на бортовую радиоэлектронную аппаратуру. Представлены результаты исследования характеристик надежности элементной базы в натуральных условиях.

Ключевые слова: космический эксперимент, надежность, стойкость электронной компонентной базы.

Обеспечение работоспособности бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в условиях воздействия комплекса ионизирующих излучений является сложной задачей. Смоделировать с высокой точностью влияние дестабилизирующих гелиогеофизических факторов на бортовую аппаратуру космических аппаратов (КА) в наземных условиях практически не представляется невозможным. В частности, в работе [1] отмечено, что значения радиационной стойкости интегральных микросхем (ИМС) в реальных условиях эксплуатации при низкой интенсивности излучения и определенные на лабораторных установках могут различаться более чем в три раза. При этом доминирующие механизмы отказов в лабораторных условиях и в космосе могут быть различными.

В Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского начиная с 1995 г. проводятся работы, связанные с исследованием устойчивости функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Натурные эксперименты проводились с помощью комплексов научной аппаратуры „Призма-1“ и „Призма-2“ на малых КА серии „Можаяец“, функционирующих на солнечно-синхронных орбитах высотой около 700 км и наклоном 98° [2].

Комплекс „Призма-1“ [2] включает три блока электронных приборов с различной толщиной корпуса и два блока датчиков радиационного контроля (размещены на внешней поверхности КА), а также блок сопряжения (расположен в приборном отсеке КА), обеспечивающий опрос испытываемых микросхем и передачу контролируемых параметров в систему телеметрии. Испытываемые приборы представляют собой генераторы тактовых импульсов (ГТИ), построенные на базе ИМС 140УД12.

Комплекс „Призма-2“ [2] содержит четыре блока испытываемых приборов с четырьмя микросхемами оперативной памяти 537РУ16 (размещены на внешней поверхности КА), датчики температуры и накопленной дозы (расположены совместно с испытываемой микросхе-

мой памяти в одном из блоков), а также блок согласования с бортовым комплексом управления (расположен в приборном отсеке КА „Можаяец-4“), обеспечивающий тестирование испытываемых микросхем и передачу контролируемых параметров в систему телеметрии.

За время полета КА „Можаяец-3“ испытываемые блоки проработали в активном режиме более 3000 часов: получено более 170 000 значений оцениваемых параметров. В качестве основного показателя, характеризующего работу микросхем, использовалась амплитуда выходного напряжения, за время функционирования выявлено ее снижение в пределах 5 %.

Наибольший разброс амплитуд зафиксирован при первых включениях аппаратуры, что соответствует этапу приработки. В дальнейшем разброс существенно снизился (в 2—6 раз), при этом тенденции к изменению значений амплитуды не прослеживаются, что также свидетельствует о стабильности выходных электрических параметров испытываемых ГТИ.

В ходе натурного космического эксперимента на КА „Можаяец-3“ была успешно апробирована технология сбора и анализа экспериментальных данных. Полученные результаты подтвердили устойчивость функционирования ИМС малой и средней степени интеграции в условиях космического пространства и позволили создать практический задел для постановки и проведения космического эксперимента на КА „Можаяец-4“.

В комплексе „Призма-2“ тестирование микросхем памяти осуществляется управляющим микропроцессором 1880BE31У, который считывает и затем выполняет команды программы. Программа реализует стандартные тесты проверки памяти: запись-считывание в ячейки оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) нулей, единиц, шахматного кода. Считанные коды сравниваются с эталонными, при несовпадении подсчитывается число ошибок, которое в дальнейшем через систему телеметрии передается потребителю.

Анализ работы комплекса „Призма-2“ за время функционирования КА „Можаяец-4“ показал изменения интенсивности перемежающихся отказов (сбоев) ячеек в блоках ОЗУ в достаточно широких пределах — от 0,03 до 0,47 в сутки.

На рис. 1 представлены результаты функционирования комплекса „Призма-2“ с января 2004 г. по сентябрь 2007 г.

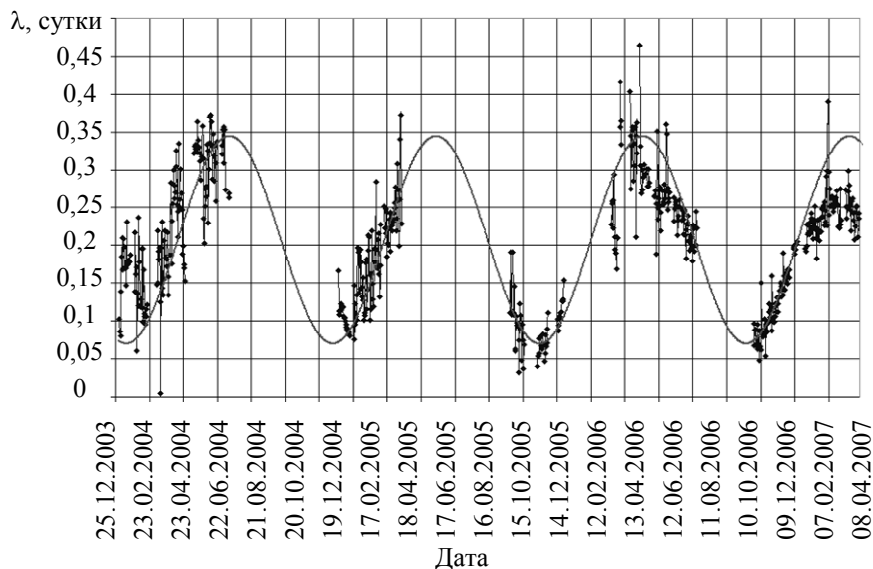


Рис. 1

Как видно из графика, изменения интенсивности λ носят сезонный характер: минимум приходится на январь—февраль, максимум — на июль. В предположении изменения значений λ по закону синуса среднюю величину интенсивности можно определить с помощью соотношений:

— для месячного интервала оценки

$$\lambda(i) |_{\Delta t=30 \text{ сут}} = 0,207 + 0,137 \sin(0,17\pi i - 0,625\pi),$$

где i — номер календарного месяца;

— для ежедневной оценки

$$\lambda(i) = 0,207 + 0,137 \sin(0,0055\pi i - 0,541\pi),$$

где i — номер календарного дня в году.

Также из графика видно, что наибольшие значения среднего отклонения (СО) интенсивности отказов приходятся на 2004 год и к 2007 г. постепенно снижаются. Данная тенденция может быть обусловлена спадом 23-го цикла солнечной активности, максимум которого пришелся на 2002 г.

Из сопоставления полученных результатов с различными показателями гелиогеофизической активности (ионизирующее излучение, геомагнитная активность, солнечная активность, рентгеновское и другие виды излучения), было установлено, что явной зависимости числа перемежающихся отказов микросхем от указанных характеристик не прослеживается.

Прямая зависимость числа отказов ячеек оперативной памяти от воздействия ионизирующего излучения не была выявлена, видимо, вследствие того что в статических запоминающих устройствах основную роль в возникновении сбоев играет величина суммарного заряда, накопленного за счет ионизации [3]. Поскольку существует критическое значение заряда, при достижении которого происходит переход ячейки ОЗУ в другое логическое состояние (из „0“ в „1“ или из „1“ в „0“), для характеристики устойчивости функционирования микросхем целесообразно использовать не интенсивность отказов, а ее среднее отклонение $\Delta\lambda$:

$$\Delta\lambda(t_j) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\lambda(t_j) - \bar{\lambda}|,$$

где n — число измерений за рассматриваемый интервал функционирования.

При анализе результатов экспериментов целесообразно использовать мощность дозы протонного излучения, поскольку оно, по оценкам многих исследователей [1, 3, 4], „ответственно“ за большинство солнечных радиационных эффектов.

Была обнаружена удовлетворительная корреляция $\Delta\lambda$ со значениями мощности дозы протонов. В качестве примера на рис. 2 представлены графики изменения среднего отклонения интенсивности отказов (1) и мощности P дозы протонов всех энергий (2) за 2005 г., рассчитанных на основе данных с КА серии POES [5] с использованием известного соотношения [6]:

$$P_D(t) = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} k \int_{E_1}^{E_2} \varphi(E, t) S(E) dE,$$

где φ — поток частиц ионизирующих излучений, $S(E)$ — удельные потери в поглощающей среде, k — коэффициент перехода от потока частиц к дозе излучения.

Нижний предел интегрирования определяется пороговой энергией ионизирующих частиц, верхний предел — значениями энергии заряженных частиц, для которых определены значения коэффициентов, зависящих от материала и вида частицы.

При этом, как видно из рисунка, задержка эффекта воздействия ионизирующего излучения $\tau \approx 4-8$ суток, что может быть обусловлено временем достижения критического заряда, достаточного для сбоя ячейки ОЗУ. Кроме того, сравнительный анализ значений мощности дозы протонов, по данным с КА серии POES, со значениями индексов геомагнитной активно-

сти показал удовлетворительную корреляцию указанных величин. Поэтому показатели геомагнитной активности также могут использоваться при оценке функционирования РЭА в условиях отсутствия непосредственно данных о потоках $\phi(E)$ с КА.

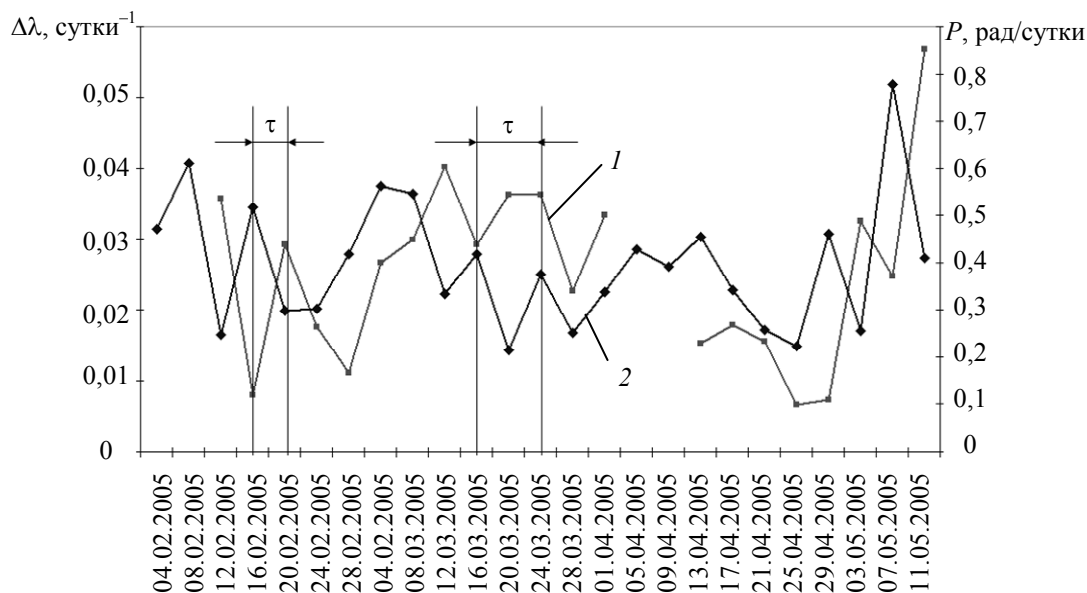


Рис. 2

Таким образом, в результате эксперимента на КА „Можаец-4“ получены зависимости, характеризующие циклическое сезонное изменение интенсивности отказов микросхем оперативной памяти в процессе функционирования комплекса „Призма-2“. С использованием методов регрессионного анализа установлены зависимости среднего отклонения интенсивности отказов от мощности дозы протонов.

Полученные авторами эмпирические соотношения могут быть использованы при оценке и прогнозировании состояния бортовых вычислительных систем КА, функционирующих на солнечно-синхронной орбите, при планировании работ в рамках технологических циклов управления космическими аппаратами [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новые наукоемкие технологии в технике // Энциклопедия. Т. 16. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. Л. С. Новикова и М. И. Панасюка. М.: ЭНЦИТЕХ, 2000. 296 с.
2. Фатеев В. Ф., Кремез Г. В., Фролков Е. В. Исследование работоспособности электронных компонентов бортовой аппаратуры космических аппаратов посредством экспериментальных комплексов „Призма-1“ и „Призма-2“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 78—81.
3. Чернышев А. А. Перемежающиеся и устойчивые отказы в цифровых интегральных микросхемах при воздействии ионизирующего излучения // Зарубежная электронная техника. 1986. № 7. С. 3.
4. Кузнецов В. Д., Болдырев С. И., Зайцев А. В. Прогноз космической погоды в околоземном пространстве // Научная сессия МИФИ. 2007. Т. 7. С. 29—31.
5. [Электронный ресурс]: <<http://ngdc.noaa.gov>>.
6. Модель космического пространства. Т. III. Расчетная модель / Под ред. С. Н. Вернова. М.: Изд-во МГУ, 1983. 636 с.
7. Захаров И. В., Иваненко А. Ю., Кремез Г. В., Фролков Е. В., Шпак А. В. Повышение функциональной устойчивости бортовых вычислительных систем малых космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 6. С. 65—67.

Сведения об авторах

- Иван Вячеславович Захаров** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербург; E-mail: x.vapo-z80@yandex.ru
- Георгий Вальтерович Кремез** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербург; E-mail: gykremez@mail.ru
- Евгений Владимирович Фролков** — д-р техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербург; E-mail: e_frolkov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-вычислительных
систем и сетей

Поступила в редакцию
26.12.13 г.

С. В. КОСАРЕВСКИЙ, В. Н. ЛАТЫПОВ

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СБОРКИ ВИНТОВЫХ ПАР ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ПО ДАННЫМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

С целью моделирования сборки винтовых пар деталей машиностроения рассмотрено обобщенное преобразование Хафа для извлечения геометрических примитивов (геликоидов) из трехмерного поля плотностей резьбовых деталей, полученного с помощью компьютерного томографа. Для преобразования поля плотностей в трехмерное изображение и последующего имитационного моделирования применен метода бегущих кубиков сборки. Данные для различных резьб получены на рентгеновском СТ-сканере Carl Zeiss Metrotom 1500.

Ключевые слова: компьютерная томография, резьба, моделирование.

Введение. Современная теория контроля резьбовых соединений во многом основана на работах Георга Берндта [1], со времени написания которых методы контроля не претерпели качественных изменений. Идея имитационного моделирования сборки деталей и так называемых виртуальных калибров была предложена в 1990-х гг., однако она не была реализована из-за недостаточного развития сканирующих координатно-измерительных машин и отсутствия устройств для промышленной томографии с погрешностью менее 0,1 мм. В начале XXI в. функция моделирования виртуальных калибров была включена в некоторые CAD/CAM-системы проектирования (например, модули к системе CATIA фирмы Dassault Systems), однако ограничивалась применением только гладких калибров, а чаще цилиндрических гладких калибров. Существующие методы не предназначены для моделирования резьбовых соединений с использованием данных компьютерной томографии. Актуальность этой проблемы подтверждают недавние работы зарубежных ученых (J. Mailhea, J. M. Linares, J. M. Sprauela, P. Bourdet, E. Pairel, P. Hernandez, M. Giordano, L. De Chiffre и др.), посвященные вопросам моделирования виртуальных калибров. Развитие методов промышленной компьютерной томографии для метрологии (метротомографии) и сканирующих измерительных систем различного рода позволит получать исходные данные для разрабатываемых алгоритмов и математических моделей. В настоящее время для контроля резьбовых соединений широко используются резьбовые и гладкие калибры, которые позволяют комплексно контролировать резьбу. Калибры большого диаметра (более M100) являются дорогостоящим средством контроля, поскольку они подвержены значительному износу, а операции свинчивания выполняются вручную и могут занимать значительное время. Резьбовые калибры, размеры которых выходят за величину допуска при прямых измерениях, могут быть „свернуты“ с пригодными контрольными калибрами. Применение калибров и прямых измерений параметров не относится к взаимоисключающим методам контроля. Для измерения калибров, в частности, применяется поэлементный контроль (измеряются шаг, средний диаметр, наружный и

внутренний диаметр резьбы), затем, чтобы убедиться в достоверности измерений, используются калибры [2]. Поэлементный контроль более точен, но измерения выполняются не на всей поверхности калибра, поэтому могут быть не учтены отклонения формы. Считается, что для очень маленьких резьб поэлементный контроль непрактичен и использование калибров является наилучшим вариантом. Согласно [2], основной причиной расхождения результатов поэлементного контроля и использования калибров являются отклонения формы поверхности резьбы.

В настоящее время развиваются различные методы поэлементного контроля резьбы, основанные на координатных средствах измерения и компьютерной обработке результатов. Карминьято и Шиффре [3] предложили поэлементно измерять резьбу на координатно-измерительной машине с использованием специального остроконечного игольчатого щупа. В статье [4] рассмотрена возможность определения параметров поврежденных резьб путем распознавания изображения с CCD-видеокамеры. В докладе [5] рассмотрены методы поэлементного контроля внутренней резьбы, основанные на данных лазерного сенсора и CCD-видеокамеры, обеспечивающих оперативный контроль параметров резьбы в автомобильном производстве. В работах [6—8] предложено использовать преобразование Хафа для распознавания плоских сечений резьбы, полученных с приборов измерения профиля.

В последние годы для точных координатных измерений применяются средства компьютерной томографии высокого разрешения как инструмент количественной оценки. В таких задачах особенности образца определяют результаты пространственных измерений. Для достижения высокой точности результатов измерений в алгоритмах построения отсканированной модели необходимо проводить компенсацию различных физических эффектов, возникающих при сканировании. Прослеживаемость результатов измерений, полученных на устройствах компьютерной томографии, обеспечивается применением специальных калибровочных приспособлений, которые в настоящее время получили сертификаты DIN/ISO. Программное обеспечение позволяет строить геометрические элементы по отсканированному полю плотностей и определять на них параметры формы и расположения в соответствии с DIN/ISO. Для оценки точности функционирования систем компьютерной томографии помимо процедуры калибровки применяются аттестованные детали. Алюминиевые детали измеряются на высокоточной координатно-измерительной машине и результаты измерений сравниваются с данными томографии.

Представление резьбы и извлечение изоповерхности. Расширим модель, предложенную авторами в работе [2]. Введем следующие обозначения. Пусть $f(x_1, x_2, x_3)$ — распределение оптической плотности материала детали, полученное с помощью томографа; $D \subset \mathcal{R}^3$ — область пространства, на которой задана функция f . В качестве „характерных“ плоских сечений резьбы рассмотрим набор плоскостей P_α , проходящих через точку $r = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3)$ — „центр масс“ измеренного объекта. Компоненты r определяются по формулам

$$\bar{x}_l = \int_D x_l f(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3, \quad l = 0, 1, 2. \quad (1)$$

Общей линией для всех плоскостей P_α является ось резьбы, в качестве которой выбирается одна из осей симметрии объекта. Направляющие векторы осей симметрии хорошо описываются собственными векторами ковариационной матрицы, составленной из центральных моментов второго порядка [5]:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mu_{200} & \mu_{110} & \mu_{101} \\ \mu_{110} & \mu_{020} & \mu_{011} \\ \mu_{101} & \mu_{011} & \mu_{002} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где

$$\mu_{ijk} = \int_D (x_1 - \bar{x}_1)^i (x_2 - \bar{x}_2)^j (x_3 - \bar{x}_3)^k f(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3. \quad (3)$$

Рассмотрим систему координат, координатными поверхностями которой являются геликоиды:

$$\left. \begin{aligned} x &= w \left(1 + |u| \frac{H}{D} \right) \sin(Rv + \pi u), \\ y &= w \left(1 + |u| \frac{H}{D} \right) \cos(Rv + \pi u), \\ z &= v, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$u \in [-1; 1]; v \in [0; V]; w \in [0; +\infty).$$

Для определения принадлежности точки $(x; y; z)$ поверхности (4) необходимо выполнить преобразование $(x; y; z) \rightarrow (u; v; w)$. Также заметим, что

$$x^2 + y^2 = w^2 \left(1 + |u| \frac{H}{D} \right)^2$$

и

$$\frac{x}{y} = \operatorname{tg}(Rv + \pi u),$$

поэтому

$$u = \frac{\operatorname{arctg}\left(\frac{x}{y} - Rz\right)}{\pi}; u \in [-1; 1], v = z, w = + \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{1 + |u| \frac{H}{D}}. \quad (5)$$

Убедимся, что плоские сечения поверхности $w = D$ являются кусочно-линейными. В проекции на плоскость Oyz имеем $x = 0$, т.е. $\sin(Rv + \pi u) = 0$ или

$$\left. \begin{aligned} Rv + \pi u &= \pi k; u = \left[\frac{\pi k - Rv}{\pi} \right]; u \in [-1; 1], \\ y &= (-1)^k w \left(1 + |u| \frac{H}{D} \right), \\ z &= v. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Метрическую резьбу однозначно характеризуют следующие параметры [1]: P — шаг, т.е. расстояние между одноименными боковыми сторонами профиля; H — высота исходного треугольника; D — номинальный диаметр. В соответствии с [1] примем:

$$c = \frac{1}{8} H. \quad (7)$$

Угол профиля метрической резьбы $\alpha = 60^\circ$, тогда $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{P}{2H}$, и из соотношений (7) получим:

$$c = \frac{P}{16 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}.$$

Плоское сечение метрической резьбы представляет собой одно из плоских сечений координатной поверхности (4), усеченное с двух сторон в соответствии с величиной c .

Для извлечения изоповерхности из скалярного поля плотностей воспользуемся следующим алгоритмом [6].

1. *Получить скалярное поле плотностей.* Сканирование выполняется на компьютерном томографе (для оценки правильности реализации алгоритма используются автогенерированные данные).

2. *Выполнить сегментацию.* С использованием отсечки по константе скалярное поле плотностей приводится к бинарным значениям 0 и 1 (1 — материал детали). На рис. 1 показан результат сегментации наружной резьбы М5 при пороге отсечения 0,48 [6].

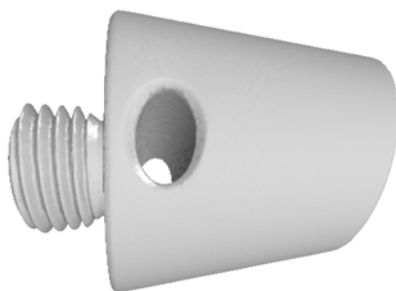


Рис. 1

3. *Найти ось резьбы.* Вычисляется ковариационная матрица по формуле (2) и находятся ее собственные векторы. После этого определяется ось резьбы, через которую далее будут строиться плоские сечения.

Далее применяется метод бегущих кубиков (marching cubes [9]) на равномерной сетке $1024 \times 1024 \times 1024$ для построения полигональной модели резьбы, которая будет использована при моделировании сборки резьбы с виртуальным резьбовым калибром.

Моделирование сборки. Для моделирования сборки винтовой пары были подготовлены CAD-модели виртуальных резьбовых калибров — двух колец (рис. 2) и пробки (рис. 3).

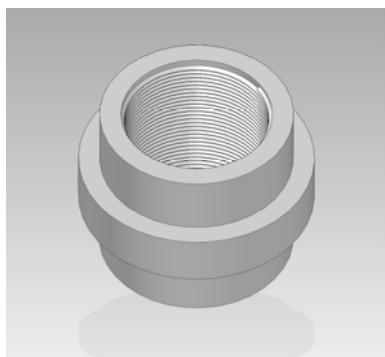


Рис. 2

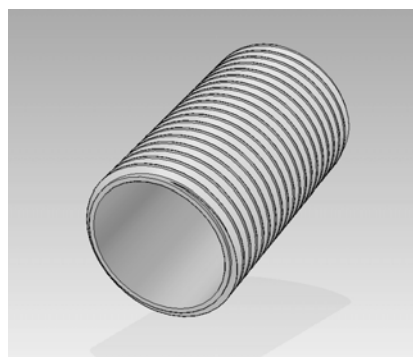
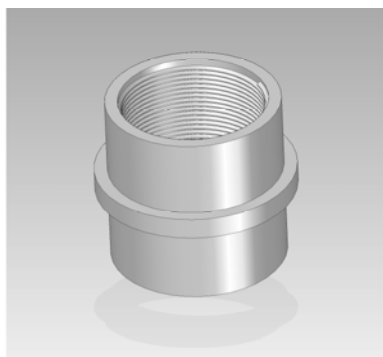


Рис. 3

На томографе Carl Zeiss Metrotom 1500 были отсканированы два алюминиевых образца с метрической резьбой: наружной М5 и внутренней М5. CAD-модели и триангулированные изоповерхности отсканированных резьб были сохранены в формате STL (stereolithography).

Моделирование сборки выполнялось с помощью библиотеки ODE (Open Dynamics Engine, <<http://www.ode.org>>). Для представления поверхности контакта резьбы использовалась иерархия ограничивающих объемов (Bounding Volume Hierarchy, BVH) из ориентированных параллелепипедов.

Путем построения и растеризации сечений полученной полигональной модели возможно сравнить результаты метода бегущих кубиков с результатами метода плоских сечений, предложенного в работе [6]. Стандартные отклонения параметров P , D и H менее 0,001 мм, что приемлемо для задачи контроля резьбы на производстве [10].

Выводы. В отличие от резьбового калибра предложенный метод контроля резьбы обеспечивает получение не только ответа „годен“ или „не годен“, но и информации, о том, какие именно элементы резьбы изготовлены неправильно. Это важно для принятия дальнейших технологических решений в процессе производства.

Для облегчения принятия технологических решений необходимо обеспечить возможность наглядной визуализации полученных результатов, так, например, величина зазоров между моделью резьбового калибра и проверяемой резьбой может быть представлена трехмерной эпюрой. Разработка программы визуализации может стать одним из дальнейших направлений развития настоящей работы.

Предложенный метод также требует разработки методов оптимизации, которые позволят ускорить построение BVH-иерархии, поскольку именно построение дерева ограничивающих объемов является самой времязатратной операцией данного метода.

Работа подготовлена при поддержке гранта ОПТЭК – Carl Zeiss 2012. При визуализации изображений использованы библиотеки Linderdaum Engine и Linderdaum Volume Rendering Library <<http://www.linderdaum.com>>, разработанные авторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 24705-2004 (ИСО 724:1993) Резьба метрическая. Основные размеры. М.: Стандартинформ, 2005.
2. Косаревский С. В., Латыпов В. Н. Математическое моделирование комплексного контроля резьбы на основе данных, полученных с устройств компьютерной томографии // Математическое моделирование. 2011. № 6(23). С. 68—80.
3. Kosarevsky S., Latypov V. Development of an algorithm to detect screw threads in planar point clouds // Measurement Science Review. 2010. Vol. 10, N 4. P. 136—141.
4. Kosarevsky S., Latypov V. Practical procedure for position tolerance uncertainty determination via Monte-Carlo error propagation // Measurement Sci. Rev. 2012. Vol. 12, N 1. P. 1—7.
5. Lorensen W. E., Cline H. E. Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm // Computer Graphics. 1987. Vol. 21, N 4.
6. Berndt G. Die Anlagekorrekturen bei der Bestimmung des Flankendurchmessers von symmetrischen und unsymmetrischen Aussen- und Innengewinden nach der Dreidrahtmethode oder mittels zweier Kugeln // Zeitschrift für Instrumentenkunde. 1940. Bd. 60.
7. Carmignato S., De Chiffre L. A new method for thread calibration on coordinate measuring machines // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2003. Vol. 52. P. 447—450.
8. Katz R., Zhang H., Hong E. Internal thread measurement. NSF Engineering Research Center for Reconfigurable Manufacturing Systems. Michigan, 2009.
9. He F.J., Zhang R.J., Du Z.J., Cui X.M. Non-contact measurement of damaged external tapered thread based on linead array CCD // J. of Physics: Conf. Ser. Intern. Symp. on Instrumentation Science, Technology. 2006. Vol. 48. P. 676—680.
10. NPL Notes on Screw Gauges. National Physical Laboratory [Электронный ресурс]: <<http://www.npl.co.uk/science-+technology/dimensional/dimensional-measurements/npl-notes-on-screw-gauges>>.

- Сергей Владимирович Косаревский** — *Сведения об авторах* — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Институт машиностроения, кафедра технологии, оборудования и автоматизации машиностроительных производств; E-mail: kosarevsky@mail.ru
- Виктор Николаевич Латыпов** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский государственный университет

Рекомендована кафедрой
технологии, оборудования
и автоматизации
машиностроительных производств

Поступила в редакцию
09.11.13 г.

УДК 621.833

И. М. ЕГОРОВ, С. А. АЛЕКСАНИН, М. Е. ФЕДОСОВСКИЙ, А. С. ПТИЦЫНА

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЗМА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КРИВОШИПОВ НА КИНЕМАТИЧЕСКУЮ ТОЧНОСТЬ ПЛАНЕТАРНОГО ЦЕВОЧНОГО РЕДУКТОРА

Рассматривается влияние погрешностей элементов механизма параллельных кривошипов на кинематическую точность планетарного цевочного редуктора типа k-h-v. Приведена методика определения ошибки угла поворота выходного вала для случаев применения одного и двух сателлитов.

Ключевые слова: планетарный редуктор, цевочная передача, циклоидальное зацепление, кинематическая погрешность, ошибка положения, высшая кинематическая пара, профильная нормаль.

Планетарные цевочные редукторы (ПЦР) типа k-h-v широко применяются в приводах мехатронных и робототехнических систем, к которым предъявляются повышенные требования по кинематической точности и жесткости. На рис. 1 представлен ПЦР, здесь 1 — цевка; 2 — 1-й сателлит; 3 — отверстие 1-го сателлита; 4 — 2-й сателлит; 5 — отверстие 2-го сателлита; 6 — палец выходного вала; O — центральная ось; O_{g1} — ось 1-го сателлита 1; O_{g2} — ось 2-го сателлита.

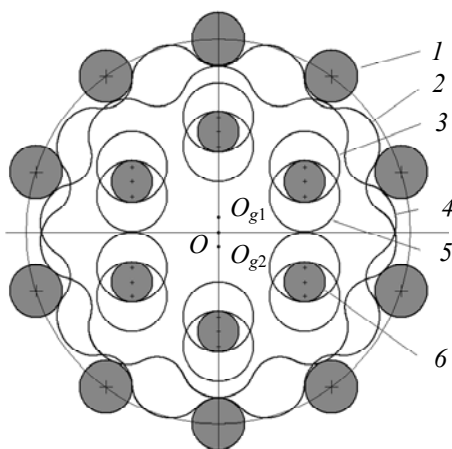


Рис. 1

В ПЦР наряду с циклоидальным зацеплением применяется механизм v, преобразующий планетарное движение сателлитов во вращательное движение выходного вала. В качестве такого механизма в ряде случаев применяется крестовая муфта с промежуточными телами качения [1]. В редукторах типа gv осуществляется передача вращения на фланцы выходного вала непосредственно коленчатыми валами сателлитов [2]. Благодаря простоте конструкции наиболее широко применяется механизм, который за счет замены высших кинематических пар на низшие преобразуется в механизм параллельных кривошипов [3—7].

Общие методы расчета точности механизмов рассмотрены в работе [8], точности механизмов с высшими кинематическими парами посвящены работы [9, 10].

Первичные ошибки зацепления i -го отверстия сателлита с пальцем выходного вала представлены на рис. 2, здесь P — полюс зацепления; XOY — система координат, жестко свя-

занная с полюсом зацепления; $X_g O_g Y_g$ — система координат, жестко связанная с сателлитом; φ_1 — угол поворота входного вала; φ_2 — угол поворота выходного вала; $A O_g$ — ось симметрии впадины зубчатого венца сателлита, проходящая через полюс зацепления при $\varphi_1 = 0$; θ_1 — угловое положение 1-го отверстия сателлита относительно оси $A O_g$; ψ_i — угловое положение i -го отверстия сателлита; K_i — точка контакта; \mathbf{e}_i — орт профильной нормали; h_i — плечо профильной нормали относительно центральной оси; \mathbf{E}_g, θ_g — эксцентриситет окружности центров отверстий сателлита и его фаза; $R_c, \Delta R_{ci}$ — радиус окружности центров отверстий сателлита и его отклонение; \mathbf{E}_p, θ_p — эксцентриситет окружности центров пальцев выходного вала и его фаза; $\Delta x_i, \Delta y_i$ — отклонения координат центра отверстия; ΔR_i — отклонение радиуса пальца выходного вала.

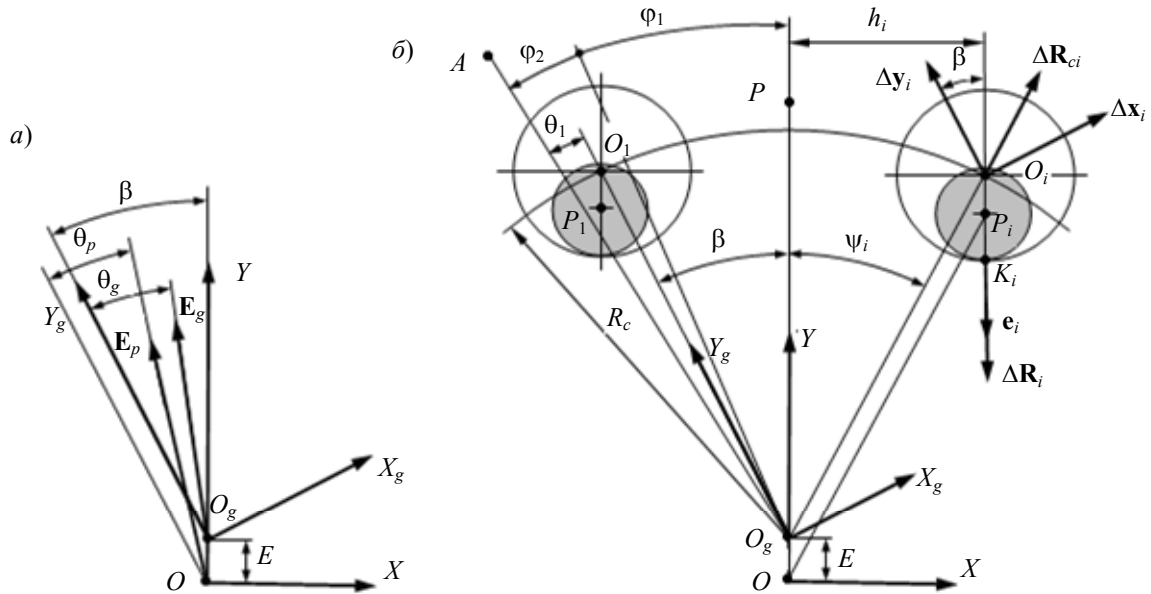


Рис. 2

Погрешности положения отверстий сателлита задаются отклонением радиуса окружности центров отверстий, ее эксцентриситетом и отклонениями положений центров отверстий относительно окружности центров (т.е. окружности, для которой отклонения положений центров отверстий минимальны). Аналогично задаются погрешности положения пальцев выходного вала.

Такое представление погрешностей позволяет упростить оценку влияния точностных параметров технологических процессов изготовления деталей на кинематическую погрешность редуктора и ее прогнозирование на основании результатов измерений на координатно-измерительной машине.

В системах координат XOY орт профильной нормали и рассматриваемые векторы первичных ошибок (см. рис. 2) имеют следующее представление:

$$\mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{E}_g = E_g \begin{bmatrix} -\sin(\beta - \theta_g) \\ \cos(\beta - \theta_g) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{E}_p = E_p \begin{bmatrix} -\sin(\beta - \theta_p) \\ \cos(\beta - \theta_p) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\Delta R_i = dR_i \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}; \quad \Delta R_{ci} = \Delta R_c \begin{bmatrix} \sin \psi_i \\ \cos \psi_i \end{bmatrix}; \quad \Delta x_i = \Delta x_i \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix}; \quad \Delta y_i = \Delta y_i \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ \cos \beta \end{bmatrix},$$

$$\beta = \varphi_1 + \varphi_2 - \theta_1.$$

Угол поворота выходного вала $\varphi_2 = \frac{\varphi_1}{u}$, где u — передаточное число редуктора.

При равномерном распределении отверстий по окружности угловое положение i -го отверстия определяется по формуле: $\psi_i = \tau_o (i-1) - \beta$, где τ_o — угловой шаг отверстий сателлита. При заданном угле поворота входного вала в зацеплении находятся только отверстия, расположенные по одну сторону от прямой OP (рис. 2, б).

Радиус окружности центров отверстий сателлита равен радиусу окружности центров пальцев выходного вала. В эксцентриситете окружности центров отверстий можно учитывать эксцентриситет сателлита. В эксцентриситете окружности центров пальцев — эксцентриситет выходного вала.

Координаты центров пальцев задаются в системе координат $X_p O_p Y_p$, жестко связанной с выходным валом, ось $O_p Y_p$ которой проходит через центр первого пальца (на рис. 2 не показана). Прямые $O_g O_i$ и $O_p P_i$ всегда параллельны, поэтому оси системы координат $X_p O_p Y_p$ всегда параллельны осям системы координат $X_g O_g Y_g$. Это позволяет учитывать отклонения координат центров пальцев при назначении отклонений координат центров отверстий. По той же причине можно суммировать отклонения радиусов окружностей центров отверстий и пальцев.

Отклонение радиуса пальца ΔR_i и отклонение радиуса отверстия параллельны орту профильной нормали e_i , их тоже можно суммировать.

При определении ошибки угла поворота выходного вала использована методика расчета погрешности механизма с высшей кинематической парой [9]. В соответствии с методикой ошибка положения звена, которое совершает вращательное движение, равна частному от деления суммы проекций векторов первичных ошибок (на профильную нормаль) на ее плечо относительно оси вращения звена:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta e}{h}, \quad (2)$$

где Δ — сумма векторов первичных ошибок; e , h — орт и плечо профильной нормали.

При выбранном на рис. 2 направлении орта нормали векторы первичных ошибок, относящихся к пальцам выходного вала, суммируются со знаком „плюс“, к отверстиям сателлита — со знаком „минус“.

В соответствии с (1) и (2) для заданного угла поворота входного вала ошибка угла поворота выходного вала, при зацеплении i -го отверстия сателлита с пальцем выходного вала определяется по формуле:

$$\Delta\varphi_{2i}(\varphi_1) = \frac{(\mathbf{E}_p + \Delta\mathbf{R}_i - \mathbf{E}_g - \Delta\mathbf{R}_{ci} - \Delta\mathbf{x}_i - \Delta\mathbf{y}_i)\mathbf{e}_i}{h_i}; \quad h_i = R_c \sin \psi_i. \quad (3)$$

Максимальное значение $\Delta\varphi_{2i}(\varphi_1)$ для всех n отверстий, находящихся в одновременном зацеплении, определяет ошибку угла поворота выходного вала:

$$\Delta\varphi_2(\varphi_1) = \max \left\{ \Delta\varphi_{2i}(\varphi_1) \right\}_{i=1}^{i=n}.$$

Для второго сателлита ошибка угла поворота выходного вала определяется аналогичным образом. В случае четного числа отверстий пальцы, зацепляющиеся с отверстиями 2-го сателлита, располагают симметрично центральной оси по отношению к пальцам, зацепляющимся с отверстиями 1-го.

Следует отметить, что вследствие разности между максимальным для одного и минимальным — для другого сателлита значениями ошибок угла поворота может возникнуть заклинивание пальцев в отверстиях сателлитов. Этот эффект создает предварительный натяг в зацеплении сателлитов с цевками колеса и может использоваться для выборки кинематического и снижения упругого мертвого хода в передаче.

Полученные формулы применены при разработке программы, которая позволяет получить функции ошибки поворота выходного вала при различных первичных ошибках элементов механизма параллельных кривошипов.

На рис. 3, 4 приведены результаты расчетов функции ошибки угла поворота на одном обороте выходного вала для передачи со следующими параметрами: передаточное число $u = 35$; $R_c = 60$ мм; число пальцев выходного вала 8 (отклонение радиуса окружности центров отверстий сателлитов $+5$ мкм, в пределах $00^{\circ}00'34'' \dots 00^{\circ}32'50''$; эксцентриситет окружности центров пальцев выходного вала 5 мкм, в пределах $-00^{\circ}00'36'' \dots 00^{\circ}32'45''$).

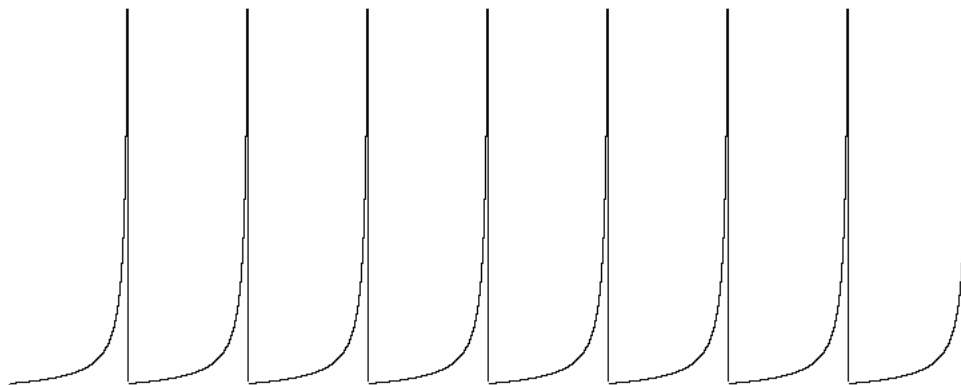


Рис. 3

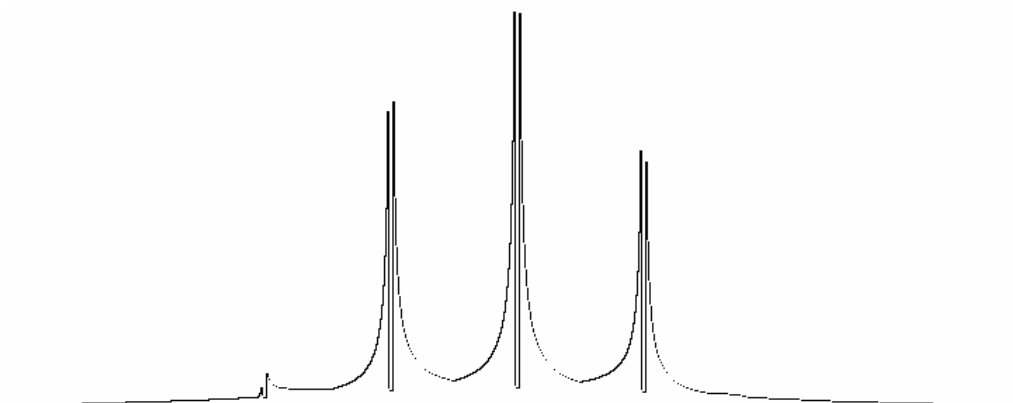


Рис. 4

Погрешности элементов механизма параллельных кривошипов оказывают различное влияние на ошибку угла поворота выходного вала редуктора. Приведенная методика расчета позволяет обоснованно назначать точностные параметры технологических процессов изготовления деталей редуктора и дает возможность, на основании результатов измерения деталей на координатно-измерительной машине, прогнозировать кинематическую погрешность редуктора. Полученные результаты применены при разработке САПР планетарных цевочных редукторов.

Статья написана в рамках выполнения НИОКР „Создание высокотехнологичного производства прецизионных быстродействующих силовых электромеханических приводов нового поколения“ в Университете ИТМО, при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации согласно постановлению Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218 „О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства“.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spinea, TwinSpin. Catalogue. 2009.
2. Nabtesco, VIGO drive RV series. Technical data. 2012.
3. Sumitomo, Cyclo 6000 speed reducer. Catalog 03.601.50.007. 2010.
4. Кудрявцев В. Н. Планетарные передачи. М.—Л.: Машиностроение, 1966. 307 с.
5. Шанников В. М. Теория и конструирование редукторов с внецентренным циклоидальным зацеплением // Зубчатые и червячные передачи. М.—Л.: Машгиз, 1959. С. 74—109.
6. Dascalescu A. Contribution to the Kinematics and Dynamics Studys of the Planetary Gears with Cycloid Toothing and Roller Teeth. PhD Theses. Cluj-Napoca Technical University, Cluj-Napoca, Romania. 2005.
7. Fedosovskii M, E, Aleksanin S. A., Nikolaev V. V. The Effect of a Cycloid Reducer Geometry on its Loading Capacity // World Appl. Sci. J. 2013. Vol. 24, N 7. P. 895—899.
8. Бруевич Н. Г. Точность механизмов. М.—Л.: ГИТТЛ, 1946. 332 с.
9. Литвин Ф. Л. Проектирование механизмов и деталей приборов. Л.: Машиностроение, 1973. 695 с.
10. Сергеев В. И. Методологические основы повышения точности механизмов с высшими кинематическими парами // Проблемы машиностроения и надежности машин. РАН. 2006. № 1. С. 3—9.

Сведения об авторах

- Иван Михайлович Егоров** — канд. техн. наук; ЗАО „Диаконт“, Санкт-Петербург; ведущий научный сотрудник; E-mail: egrov@mail.ru
- Сергей Андреевич Алексанин** — ЗАО „Диаконт“, Санкт-Петербург; заместитель генерального директора
- Михаил Евгеньевич Федосовский** — канд. техн. наук; ЗАО „Диаконт“, Санкт-Петербург; генеральный директор; E-mail: diakont@diakont.com
- Анастасия Сергеевна Птицына** — Университет ИТМО, Санкт-Петербург; инженер; E-mail: Anastasia_88.88@mail.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
24.09.14 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 62-65, 62-69

А. С. ЗЛАТОВ, В. В. ЗАХАРОВ

ПРОВЕДЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КОНФОКАЛЬНОМ СКАНИРУЮЩЕМ МИКРОСКОПЕ

Представлена приставка для конфокального лазерного сканирующего микроскопа Zeiss LSM710, позволяющая проводить исследования оптических характеристик образцов при температуре 30—110 °С с точностью ее удержания $\pm 0,25$ °С.

Ключевые слова: конфокальный микроскоп, люминесценция, температурные исследования.

В настоящее время конфокальная микроскопия активно используется в различных медицинских и биологических приложениях [1], позволяя получать изображения тонких оптических срезов и на их основе строить объемное изображение изучаемого объекта. Во многих исследованиях большой интерес представляет наблюдение объекта при различной температуре и изучение зависимости динамики его оптических характеристик от температуры [2].

Цель настоящей работы заключалась в создании приставки для конфокального лазерного сканирующего микроскопа Zeiss LSM710 для возможности изучения люминесцирующих свойств образцов при различных температурах. Была разработана приставка, состоящая из блока питания с выходным напряжением 30 В и током 300 мА, стеклянной плоскопараллельной пластинки размером 70×70 мм с нанесенным на одну из поверхностей токопроводящим прозрачным покрытием, 8 температурных датчиков Dallas 18B20, а также программно-аппаратного комплекса, включающего управляющий микроконтроллер Atmel ATmega16A, USB-UART мост Silicon Labs CP2102, и компьютерную программу, созданную в среде LabVIEW 8.2. При температуре 25 °С приставка позволяет нагревать образец до 110 °С и стабилизировать температуру с точностью $\pm 0,25$ °С.

Приставка успешно апробирована и активно используется в центре Информационных и оптических технологий НИУ ИТМО. С использованием приставки были проведены исследования влияния температур в диапазоне 35—85 °С на интенсивность люминесценции маркеров, выполненных на базе квантовых точек CdSe/ZnS. На рис. 1 приведен график изменения температуры на исследуемом образце с квантовыми точками CdSe/ZnS (диаметр ядра 2,5 нм). Приставка позволяет плавно изменять температуру образца, не допуская перегрева или переохлаждения, а также поддерживать заданную температуру в широком диапазоне в течение эксперимента. На рис. 2 представлены спектры люминесценции исследуемого образца, измеренные в процессе первого цикла измерения (нагрев: 1 — 35, 2 — 45, 3 — 65, 4 — 85 °С; охлаждение: 5 — 35, 6 — 45, 7 — 65 °С). Из рисунка видно, что температура оказывает существенное влияние на интенсивность люминесценции I и положение максимума — при увеличении

температуры маркера с 30 до 85 °С интенсивность люминесценции падает в три раза, максимум люминесценции сдвигается на 6 нм в длинноволновую область.

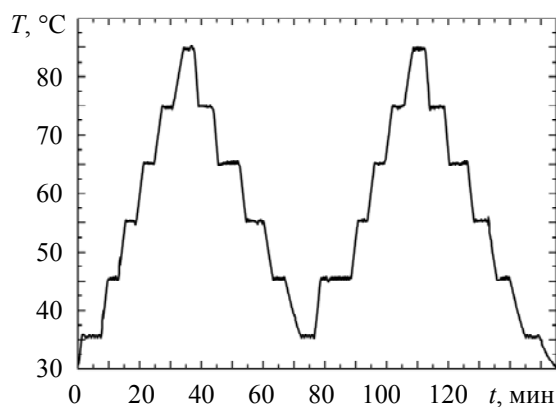


Рис. 1

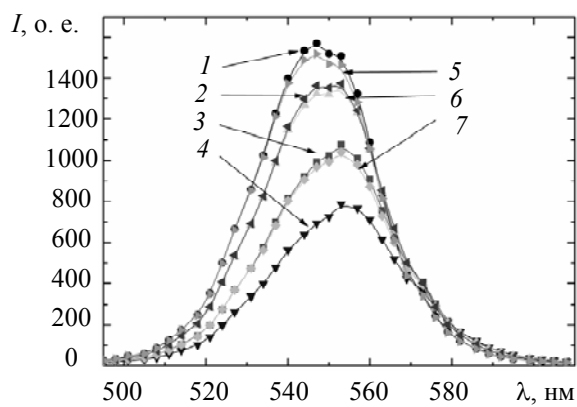


Рис. 2

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант №14.В25.31.0002) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №12-02-01263 и 12-02-00938).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saldaca C., Morales-Tlalpan V., Castaco V.M. Confocal microscopy: from fundamental optics to innovative applications // *Microscopy: Science, Technology, Applications and Education*. 2010. P. 1350—1355.
2. Gupta R., Mikhaylenko G., Balasubramaniam V. M., Tang J. Combined pressure and temperature effects on the chemical marker (4-hydroxy-5-methyl-3(2H)-furanone) formation in whey protein gels // *LWT - Food Science and Technology*. 2011. Vol. 44. P. 2141—2146.

Сведения об авторах

Андрей Сергеевич Златов

— аспирант; Университет ИТМО, кафедра оптической физики и современного естествознания, Санкт-Петербург; E-mail: zlatov@oi.ifmo.ru

Виктор Валерьевич Захаров

— аспирант; Университет ИТМО, кафедра оптической физики и современного естествознания, Санкт-Петербург; E-mail: Viktor-zah@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
оптической физики и современного
естествознания

Поступила в редакцию
02.09.14 г.

Е. В. ГОРБУНОВА, В. В. КОРОТАЕВ, Е. А. ЛАСТОВСКАЯ

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРЫТИЙ

Приведено описание автоматизированной установки, предназначенной для исследования и контроля покрытий различного вида, нанесенных на плоские поверхности.

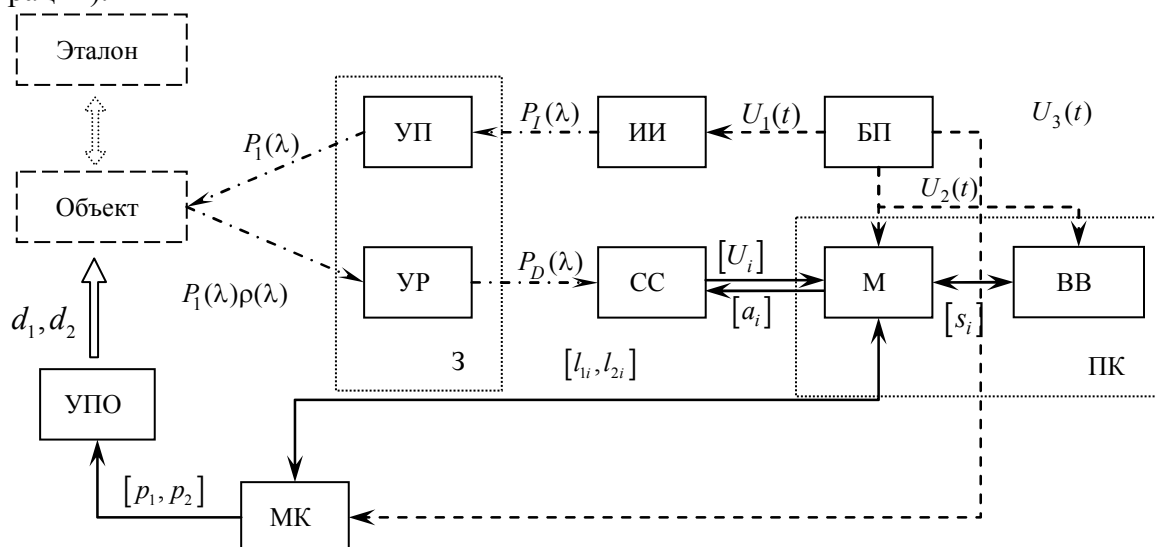
Ключевые слова: коэффициент спектрального отражения, отражательная способность, цветовой параметр, покрытие, контроль качества.

При использовании высокоточных технологий нанесения разнообразных покрытий на различные поверхности требуется обеспечить соответствующий контроль качества.

Основными параметрами, характеризующими свойства видов покрытий (красочных, лакокрасочных, маркирующих, защитных и т.п.), являются спектральный коэффициент отражения, отражательная способность и цветовые параметры.

Датчики и измерительные системы, предназначенные для измерения спектров отражения, альbedo или цветовых параметров объектов [1], не позволяют определить изменение характеристик в локальных участках исследуемой поверхности. Для решения этой задачи авторами настоящей статьи разработан аппаратно-программный комплекс для анализа и контроля спектральных коэффициентов отражения, отражательной способности и цветовых параметров плоских объектов размером до 150×150 мм. Возможно построение цветового образа поверхности, рассчитанного для различных стандартных источников излучения (А, В, С, D65, Е, F2, F7, F11, GE) или источников с заданным спектром излучения.

Функциональная схема оптико-электронной системы для контроля оптических характеристик плоских поверхностей представлена на рисунке (БП — блок питания; ВВ — устройство ввода-вывода; З — зонд; ИИ — источник излучения; М — микропроцессор; МК — микроконтроллер; ПК — персональный компьютер; СС — спектрофотометрическая система; УП — устройство подсветки; УПО — устройство позиционирования объекта; УР — устройство регистрации).



Источник излучения обеспечивает требуемый вид спектрального распределения потока излучения $P_I(\lambda)$ на входном окне устройства подсветки и интенсивность освещенности

исследуемого локального участка анализируемого объекта потоком $P_1(\lambda)$. Отраженное от объекта излучение источника $P_1(\lambda)\rho(\lambda)$ попадает на входное окно устройства регистрации, которое передает поток $P_D(\lambda)$ на входное окно спектрофотометрической системы $[a_i]$, передающей данные измерений $[U_i]$ в микропроцессор персонального компьютера. Микропроцессор обрабатывает полученные данные, а также выдает на устройство ввода-вывода результаты $[s_i]$.

Перемещение объекта по двум координатам d_1 и d_2 обеспечивает устройство позиционирования, управляемое при помощи сигналов $[p_1, p_2]$ со специализированного микроконтроллера, который, в свою очередь, управляется командами $[l_{1i}, l_{2i}]$ с компьютера.

Блок питания обеспечивает необходимые режимы питания $U_1(t)$, $U_2(t)$ и $U_3(t)$ для ИИ, ПК и МК соответственно.

Устройства подсветки и регистрации объединены в зонд, который обеспечивает возможность измерения как зеркальной, так и диффузной составляющих коэффициента отражения поверхности исследуемого объекта.

Обработка полученных данных производится с использованием специально разработанного программного обеспечения [2, 3]. С его помощью также можно прогнозировать характеристики покрытия объекта при различных условиях освещения.

Работа выполнена при частичной государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (госзадание 2014/190).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Products and Services of Pro-Lite technology (Products catalog) [Электронный ресурс]: <http://www.pro-lite.uk.com/File/light_measurement_overview.php>.
2. Измерение спектров отражения, пропускания и оптической плотности объектов / Е. В. Горбунова, А. Н. Чертов, В. В. Коротаев. Св-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2014613360 от 25.03.2014.
3. Определение цветовых параметров поверхностей объектов по известным спектрам отражения / Е. В. Горбунова, Д. Б. Петухова, А. Н. Чертов. Св-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2014614441 от 24.04.2014.

Сведения об авторах

- Елена Васильевна Горбунова** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: vtedina_ia@mail.ru
- Валерий Викторович Коротаев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; заведующий кафедрой; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Елена Александровна Ластовская** — студент; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: plastelinchik@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов
и систем

Поступила в редакцию
12.05.14 г.

М. П. МАРУСИН, Т. А. ПРОТАСЕНЯ

РАЗРАБОТКА ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИБОРА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Разработан первичный преобразователь для реализации метода динамического индентирования при неразрушающем контроле механических характеристик материалов (твердости, модуля упругости и трещиностойкости).

Ключевые слова: первичный преобразователь, неразрушающий контроль, динамическое индентирование, твердость, модуль упругости.

Одним из перспективных методов неразрушающего контроля (НК), позволяющих не только достоверно и оперативно определять механические характеристики материалов (твердость, модуль упругости и др.), но и использовать портативное оборудование для исследования крупногабаритных объектов, является динамическое индентирование [1]. Повышение чувствительности измерительной аппаратуры и переход к компьютерной обработке первичной измерительной информации о процессе ударного вдавливания жесткого индентора в испытываемый материал позволяют определять механические характеристики материала на основе анализа зависимости нагрузка–перемещение индентора.

Основной задачей при разработке прибора динамического индентирования является выбор конструкции первичного преобразователя текущей скорости движения индентора в процессе испытательного удара с контролируемым материалом. Конструкция должна обеспечивать строгую пропорциональность между сигналом первичного преобразователя и скоростью перемещения индентора во время соударения. Выполнение этого требования позволит согласовать результаты контроля механических характеристик материалов с заданными условиям испытаний, что, в свою очередь, обеспечит сопоставимость данных проведенных измерений.

Для регистрации процесса внедрения индентора в материал авторами применялась магнитоиндукционная установка, позволяющая бесконтактно определить скорость перемещения индентора при его соударении с испытуемым материалом. Электрическая часть установки представляет собой систему аналого-цифрового преобразования сигнала индукционного датчика, для последующей обработки информация в цифровом виде выводится в память персонального компьютера (ПК). Схема получения и преобразования первичных данных приведена на рис. 1 (1 — индукционный преобразователь; 2 — индентор; 3 — постоянный магнит; 4 — исследуемый материал; 5 — предварительный усилитель; 6 — блок синхронизации; 7 — АЦП; 8 — ПК).

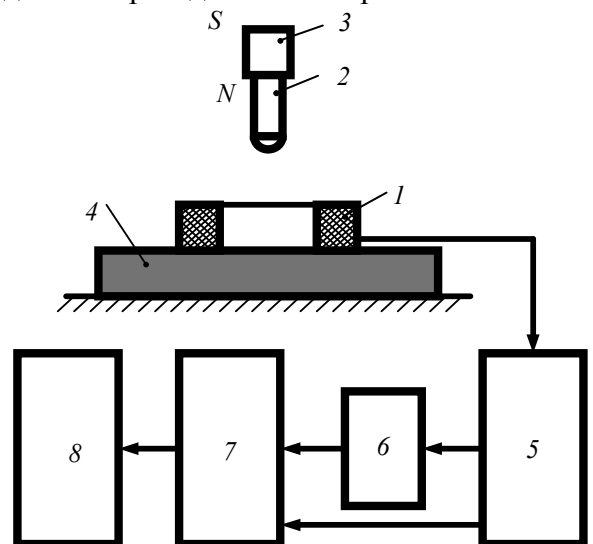


Рис. 1

Выполненная с помощью программы SolidWorks трехмерная модель разработанного авторами первичного преобразователя представлена на рис. 2. Преобразователь обеспечивает перемещение индентора относительно поверхности контролируемого материала. Помимо индентора, закрепленного на одном конце рычага, преобразователь содержит механизмы

перемещения и фиксации индентора, катушку индуктивности и предварительный усилитель аналогового сигнала.

Индентор выполнен из твердосплавного материала (карбид вольфрама), находящийся в нем магнит изготовлен из сплава на основе редкоземельных металлов — $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Высокая удельная магнитная энергия и сопротивляемость размагничиванию в сильных полях определяют преимущества сплава перед другими магнитными материалами [2]. Технология изготовления магнитов из NdFeB достаточно сложна из-за высокой окисляемости редкоземельных металлов, поэтому процесс изготовления сплава проводят в вакууме. Для получения максимальной анизотропии порошок сплава прессуют в магнитном поле, после чего образцы магнитов спекают и допрессовывают под нагревом [3].

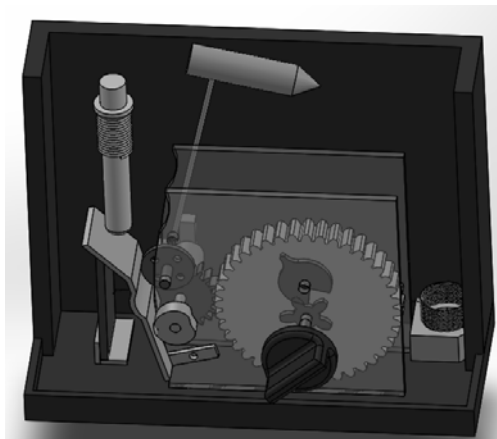


Рис. 2

В предложенном первичном преобразователе прибора динамического индентирования используется криволинейное движение индентора по дуге окружности (это дает большие преимущества в возможности автоматизации процесса заводки и нанесения удара, уменьшении габаритных размеров прибора). Расположенный на конце индентора твердосплавный шарик контактирует с материалом. При пересечении витков катушки индентором, создающим магнитное поле, в последней наводится ЭДС, пропорциональная скорости движения индентора.

Основные формулы для оценки предупредительной скорости индентора действительны как для криволинейного движения, так и для случая, когда удар наносится свободно падающим индентором. Достижение пропорциональной зависимости между сигналом первичного преобразователя и скоростью перемещения предложенного индентора позволяет повысить точность определения механических характеристик исследуемых материалов.

Апробация разработанного первичного преобразователя прибора динамического индентирования была проведена на образцах пирографита изотропного. Полученные результаты измерения механических свойств (твердости, модуля упругости и трещиностойкости) пирографита подтвердили надежность разработанного прибора и возможность его использования при НК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев С. И., Алехин В. П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
2. Марусина М. Я., Базаров Б. А., Галайдин П. А., Силаев А. А., Марусин М. П., Закемовская Е. Ю., Гилев А. Г., Алексеев А. В. Магнитная система на основе постоянных магнитов для расходомера многофазных текучих сред // Измерительная техника. 2014. № 4. С. 62—65.
3. Marusina M. Ya., Bazarov B. A., Galaidin P. A., Marusin M. P., Silayev A. A., Zakemovskaya E. Yu., Mustafaev Yu. N. Design of a Gradient System for a Multiphase Flowmeter // Measurement Techniques. NY: Springer, 2014. Vol. 57, N 5. P. 580—586.

- Сведения об авторах*
- Михаил Петрович Марусин** — Университет ИТМО, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии, Санкт-Петербург; ассистент;
E-mail: mishasp06@mail.ru
- Татьяна Анатольевна Протасеня** — Институт прикладной физики национальной академии наук Беларуси, лаборатория контактно-динамических методов контроля, Минск; младший научный сотрудник; E-mail: 5657397@gmail.com

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.10.14 г.

УДК 535.211:535.214

Д. В. ЧЕСНОКОВ, Д. В. КОЧКАРЕВ, В. А. РАЙХЕРТ,
М. В. КУЗНЕЦОВ, В. В. ЧЕСНОКОВ

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ОДНОСТАДИЙНОГО ЛАЗЕРНОГО МЕТОДА МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ САПФИРА

Представлено описание процесса лазерного сублимационного формирования упорядоченного глубокого микрорельефа на поверхности пластин из лейко-сапфира.

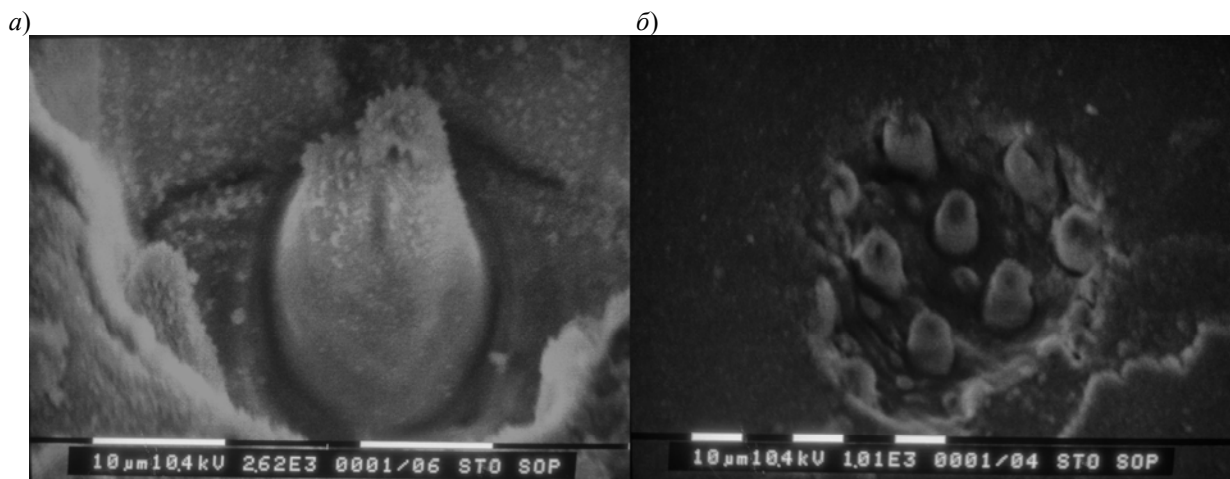
Ключевые слова: лазерная сублимация, рельеф на поверхности, светодиод, тугоплавкие диэлектрики, лейкосапфир.

Разработка и исследования технологий создания микро- и нанорельефов на поверхностях тугоплавких химически стойких диэлектриков (лазерное сверление алмазов, получение алмазной дифракционной оптики и др.) являются актуальными задачами. В настоящей работе приводятся предварительные результаты исследования одностадийного метода формирования (без использования фотолитографии и химических технологий) упорядоченного микрорельефа на поверхностях подложек из лейкосапфира с использованием процессов лазерной сублимации.

Объяснение эффектов лазерного повреждения поверхностей тугоплавких, особенно прозрачных для излучения, диэлектриков встречает затруднения [1]. Начальные этапы развития повреждения предположительно связаны с эффектом возникновения фотопроводимости (в случае рубина), многофотонного поглощения, поглощения на дефектах, в том числе связанных с центрами окраски и др. Последующие этапы повреждения, видимо, обусловлены термохимическими или плазмохимическими процессами в веществе, инициированными выделившимся на начальном этапе теплом [2, 3] и приводящими к дальнейшему повышению температуры.

В проведенных авторами экспериментах поверхности полированных подложек облучались сфокусированным многоканальным лазерным пучком твердотельного Nd:YAG-лазера с длиной волны 355 нм; длительность импульсов 5 нс; импульсная плотность мощности падающего излучения на подложке до $6,7 \cdot 10^{18}$ Вт/м²; частота импульсов 50 Гц; исследования выполнялись на аппаратуре, описанной в работе [4]. В области каналов лазерного пучка интенсивность излучения мала; материал сублимируется в промежутках между каналами, оставляя выступы округлой формы; на поверхности подложек из лейкосапфира или карбида кремния может быть сформирован массив микрообразований типа „полусфера“.

Полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа изображения участков рельефа на поверхности лейкосапфировых подложек, образовавшегося при сублимационном режиме лазерного облучения, приведены на рисунке (*a* — видна поверхность образца, у которого на дне углубления сформирована „микролуковица“ высотой 19 мкм, диаметром 16 мкм, образовавшаяся при облучении в течение 10 с; *б* — глубина кратера составляет 6,5 мкм, видны выступы диаметром 8 мкм, экспозиция 3 с).



В результате анализа полученных результатов было выдвинуто предположение о том, что при облучении на поверхности происходит образование и накопление с последующими импульсами продуктов диссоциации лейкосапфира, термически нестабильного при температуре плавления [5]; продукты реакции обладают повышенным поглощением падающего излучения, это способствует интенсификации процессов и повышению температуры подложки до инициации сублимации лейкосапфира. Аналогичным образом можно объяснить образование микрорельефа на поверхности монокристаллического карбида кремния.

Полученные результаты подтверждают возможность создания упорядоченных глубоких микрорельефов на поверхности сапфира и других тугоплавких диэлектриков или полупроводников методами лазерной сублимации, одностадийным нелитографическим способом. При формировании такого рельефа на поверхности чипа промышленных образцов светодиодов обнаружено существенное увеличение внешнего квантового выхода диодов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рэди Д. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974.
2. Вейко В. П. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика. М.: Физматлит, 2008.
3. Либенсон М. Н. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние. СПб: Наука, 2007.
4. Чесноков В. В., Резникова Е. Ф., Чесноков Д. В. Лазерные наносекундные микротехнологии. Новосибирск: СГГА, 2003.
5. Термодинамические свойства неорганических веществ. Справочник / Под общ. ред. А. П. Зефирова. М.: Атомиздат, 1965.

Сведения об авторах

- Дмитрий Владимирович Чесноков** — канд. техн. наук, доцент; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оплотехники, Новосибирск; E-mail: phys003@list.ru
- Денис Вячеславович Кочкарев** — Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра физики, Новосибирск; инженер; E-mail: denlnsk@mail.ru

- Валерий Андреевич Райхерт** — Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра физики, Новосибирск; ведущий инженер
- Максим Витальевич Кузнецов** — Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра физики, Новосибирск; техник
- Владимир Владимирович Чесноков** — д-р техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра физики, Новосибирск

Рекомендована кафедрой
физики

Поступила в редакцию
01.10.14 г.

ИНФОРМАЦИЯ

НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ БУТЕНИН

К 100-летию со дня рождения

Н. В. Бутенин (1914—1995) — выдающийся ученый, талантливый педагог и организатор. Николай Васильевич родился в Петрограде, среднюю школу окончил в городе Горький.



В 1932 г. он поступил на физико-математический факультет Горьковского государственного университета, который в 1937 г. окончил с отличием по специальности „механика“. После окончания университета Николай Васильевич был направлен на преподавательскую работу в Горьковский педагогический институт. Стремление к научным исследованиям побудило его в октябре 1938 г. поступить в аспирантуру Горьковского университета на кафедру теоретической физики. Н. В. Бутенину посчастливилось работать под руководством выдающегося советского ученого — академика А. А. Андропова.

В первые дни войны Николай Васильевич защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. В сентябре 1941 г. его призывают в Красную Армию и направляют на службу в Ленинградскую военно-воздушную академию (ныне Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского).

Долгое время главным направлением в научной работе Н. В. Бутенина являлась теория колебаний механических систем. Ряд его работ имел большое значение для развития теории нелинейных колебаний, разработки точных методов исследования нелинейных систем. В 1952 г. в Ленинградском политехническом институте Николай Васильевич блестяще защитил докторскую диссертацию, результаты которой развил в своих монографиях, часть которых была издана за рубежом.

В 1953 г. Н. В. Бутенину было присвоено ученое звание профессора.

Основным направлением исследований Н. В. Бутенина являлась теория гироскопических приборов. В этих трудах автор проанализировал влияние сил сухого и вязкого трения на движение гироскопа на подвижном и неподвижном основаниях.

За активную научную деятельность Н. В. Бутенину в 1966 г. было присвоено почетное звание Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР.

Николаем Васильевичем написано свыше 140 научных работ, среди них следует выделить написанный в начале 1970-х гг. в соавторстве с Я. Л. Лунцем и Д. Р. Меркиным фундаментальный двухтомный курс теоретической механики. Учебник выдержал 10 изданий, переведен на ряд иностранных языков.

Глубокие научные знания и творческие способности сочетались у Н. В. Бутенина с врожденным талантом педагога, он отдал 58 лет педагогической деятельности. В 1994 г. он был избран почетным профессором академии.

За многие годы работы в академии Н. В. Бутенин проявил себя как незаурядный организатор. Возглавив в 1944 г. кафедру теоретической механики, Николай Васильевич в трудные военные и послевоенные годы сумел создать сплоченный, работоспособный коллектив,

успешно решавший задачи. Под его руководством подготовлено много докторов и кандидатов наук не только в ВКА им. А. Ф. Можайского, но и в других вузах, а также в научно-исследовательских организациях.

Н. В. Бутенин прослужил в вооруженных силах более 30 лет и за этот период прошел путь до полковника.

Николай Васильевич был избран членом Национального комитета СССР по теоретической и прикладной механике, Научно-методического Совета по теоретической механике при МВ ССО СССР, членом экспертной комиссии ВАК, членом редакционного совета уникального шеститомного справочника „Вибрация в технике“, членом редколлегии журналов „Теоретическая механика“, а также „Известия высших учебных заведений. Приборостроение“.

Непрерывное расширение сферы приложений теории нелинейных колебаний, углубление и развитие ее математических методов, а также грандиозные возможности вычислительной техники с течением времени только усиливают значимость научных работ Н. В. Бутенина.

Коллектив кафедры теоретической механики и теории механизмов и машин
Военно-Космической академии имени А. Ф. Можайского

SUMMARY

P. 5—11.

THE RESTRICTIONS IN THE PROBLEM OF CONSTRUCTION OF OPTIMAL ALGORITHM FOR EVALUATION OF TECHNICAL CONDITION OF A SYSTEM

The problem of evaluation of technical state of a system is considered. Specifics of construction of algorithms optimal with respect to a predetermined criterion are analyzed. Formal structures are presented to describe the sequence of controlled parameters checking in the process of the algorithm optimization. An ingenious mathematical formulation of the problem of optimal algorithm synthesis is proposed based on the criterion of maximal average probability of correct decision on the system technical condition.

Keywords: algebra of subsets, algorithm, criterion, restrictions, optimization, indicator of efficiency, verification, condition.

Data on authors

- Valentin I. Senchenkov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Special Technical Systems of Space Complexes, St. Petersburg;
E-mail: svi9@rambler.ru
- Igor N. Nekrasov* — Post-Graduate Student; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Special Technical Systems of Space Complexes, St. Petersburg;
E-mail: ponomarev igor 1985@mail.ru

P. 12—16.

TECHNOLOGY OF CONSTRUCTION OF ADAPTIVE USER INTERFACE FOR MULTIPURPOSE INFORMATION SYSTEMS AT INDUSTRIAL PLANTS

A method is proposed for construction of user interface improving the multipurpose information system efficiency through adaptation of the interface to the context of the problem resolved on the base of users classification model.

Keywords: semantics, user interface, multipurpose information system.

Data on authors

- Vladimir V. Dikovitsky* — Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, Murmansk; Junior Researcher;
E-mail: dikovitsky@iimm.kolasc.net.ru
- Maxim G. Shishaev* — Dr. Techn. Sci.; Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, Murmansk;
E-mail: shishaev@iimm.kolasc.net.ru

P. 17—22.

AN AUTOMATIC ALGORITHM OF MULTIPLE SMALL TARGET TRACKING AND DETECTION UNDER PRIOR TARGET UNCERTAINTY

The problem of tracking of multiple objects under a priori uncertainty of temporal and spatial characteristics and requirement of minimal time for object detection is considered. A strobe method is developed for detection of target-like markers allowing for formation of tracks of many objects. The method may be applied for small distance between the objects at wide range of inter-frame displacements of the objects and high noise level. The method presupposes that each track may be approximated by a linear function over the course of 3—5 frames. Effectiveness of the proposed method is confirmed experimentally with the use of synthesized sequences.

Keywords: detection, automatic tracking, tracking of multiple objects.

Data on authors

- Valery T. Fissenko* — Cand. Techn. Sci.; The Branch of Open Joint Stock Company “Corporation ”Kometa” — Scientific Design Center “Electro-Optical Surveillance Systems”, St. Petersburg; Director; E-mail: valery@eoss.ru
- Vladimir I. Mojeiko* — Cand. Techn. Sci.; The Branch of Open Joint Stock Company “Corporation ”Kometa” — Scientific Design Center “Electro-Optical Surveillance Systems”, St. Petersburg; Head of Department; E-mail: Lab2@eoss.ru
- Tatiana Yu. Fissenko* — Cand. Techn. Sci.; The Branch of Open Joint Stock Company “Corporation ”Kometa” — Scientific Design Center “Electro-Optical Surveillance Systems”, St. Petersburg; Leading Scientist; E-mail: tatiana@eoss.ru
- Leonid D. Vilesov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Radioelectronics and Television; E-mail: vilesov@aanet.ru
- Dmitry A. Fedorov* — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Computer Photonics and Video Informatics, St. Petersburg; E-mail: End-ik@ya.ru

P. 23—28.

A METHOD OF POSTERIOR ESTIMATION OF CHARACTERISTICS OF FLYING VEHICLE CONTROL SYSTEM

The problem of estimation of a flying vehicle control system characteristics with the use of a limited number of field test is considered. A method proposed to solve the problem is based on priority of the experimental data: the weight assigned to the limited field tests data exceeds the weight of practically unlimited aprioristic information. Analytical expressions for posterior estimations of the control system characteristics are derived.

Keywords: flying vehicle, control system, characteristic, limited field tests.

Data on authors

- Vladimir N. Arseniev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Mozhaysky Military Space Academy, Department of On-board Information and Measuring Complexes, St. Petersburg; E-mail: vladar56@mail.ru
- Pavel V. Labetsky* — Post-Graduate Student; Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg; E-mail: p.v.labetskiy@gmail.com

P. 28—33.

A METHOD OF SYMBOL SYNCHRONIZATION OF TELEMETRIC SYSTEMS IN TIME-FREQUENCY DOMAIN

A method of symbol synchronization telemetric systems in time-frequency domain based on correlation-based classification of spectral images of binary symbols of group telemetry signal and their boundaries is developed. The method noise immunity estimations are presented.

Keywords: correlation, noise immunity, radio telemetry system, symbol synchronization, power spectral density.

Data on authors

- Andrey I. Loskutov* — Dr. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Telemetry Systems and Integrated Information Processing, St. Petersburg; Head of the Department; E-mail: rujenz@mail.ru
- Alexander A. Bjankin* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Telemetry Systems and Integrated Information Processing, St. Petersburg; E-mail: aab51@mail.ru
- Artem S. Dunikov* — Post-Graduate Student; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Telemetry Systems and Integrated Information Processing, St. Petersburg; E-mail: artem.sever1@yandex.ru
- Andrey V. Parshutkin* — Dr. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Telemetry Systems and Integrated Information Processing, St. Petersburg; E-mail: andydc2010@mail.ru

P. 34—37.

CONDITION AND STABILITY CRITERION FOR ELASTIC SENSING ELEMENT OF HERMETIC CONTACT

The question of linearization of equations of dynamics of elastic sensing elements of hermetic contact is considered. A condition and criterion of the element stability are derived and applied in design of a new hermetic contact.

Keywords: sensing element, reed switch, dynamic parameters, steadiness, reliability.

Data on authors

- Rimma Ya. Labkovskaya* — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Design and Security of Computer Systems, St. Petersburg; E-mail: studsovet_itmo@mail.ru
- Olga I. Pirozhnikova* — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Design and Security of Computer Systems, St. Petersburg; E-mail: studsovet_itmo@mail.ru
- Vera L. Tkalich* — Dr. Techn. Sci., Professor; ITMO University, Department of Design and Security of Computer Systems, St. Petersburg; E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru

P. 38—41.

CALCULATION OF MERSENNE MATRICES BY PALEY METHOD

A modified Paley method for calculation of Mersenne matrix of arbitrary order equal to a prime number is presented. An example of Mersenne matrix calculation is analyzed. Comparison of Mersenne matrices obtained with the use of the modified Sylvester and Paley methods is carried out. Effectiveness of the proposed method is analyzed with respect to the universal procedure of M-matrix retrieval.

Keywords: secure coding, data processing, orthogonal matrices, quasi-orthogonal matrices, Hadamard matrices, Mersenne matrices, Sylvester method, Scarpis method, Paley method.

Data on authors

- Nikolay A. Balonin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Computer Systems and Networks; E-mail: korbendfs@mail.ru
- Mikhail B. Sergeev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Computer Systems and Networks; Head of the Department; E-mail: mbse@mail.ru

P. 42—46.

MODEL OF MICROMECHANICAL GYROSCOPE DYNAMICS BASED ON RING RESONATOR IN ELASTIC SUSPENSION

A model of micromechanical gyroscope dynamics is presented. The model accounts for the effects of mass, elastic, dissipative, and Coriolis forces from the gyroscope suspension.

Keywords: micromechanical gyroscope, ring resonator, elastic suspension, radial and tangential loadings.

Data on authors

- Leonid A. Severov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Aerospace Systems of Orientation, Navigation, and Stabilization; Head of the Department; E-mail: severov@aanet.ru
- Valery K. Ponomarev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Aerospace Systems of Orientation, Navigation, and Stabilization; E-mail: severov@aanet.ru
- Alexander I. Panferov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Aerospace Systems of Orientation, Navigation, and Stabilization; E-mail: panferov@aanet.ru
- Natalia A. Ovchinnikova* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Aerospace Systems of Orientation, Navigation, and Stabilization; E-mail: reale@mail.ru

P. 47—50.

GYROSCOPIC STABILIZATION OF TWO-WHEELED MOBILE DEVICES

A concept of two-wheeled mobile object stabilization with the use of one-sedate gyroscope on the base of a motorcycle with self-established forward wheel is described. The conditions for stabilization of the device movement are defined. A kinematic scheme of two-wheeled motorcycle is proposed, a working model of the device is constructed.

Keywords: gyroscope, stabilization, gyroscopic moment, two-wheeled mobile object, self-established wheel.

Data on authors

- Vladimir I. Vetrenko* — Cand. Techn. Sci.; Tomsk State University of Architecture and Building, Department of Industrial Management; E-mail: vladim.vetrenko@yandex.ru
- Tatyana I. Romanova* — Tomsk State University of Architecture and Building, Department of Industrial Management; Senior Lecturer; E-mail: e2e4@vtomske.ru
- Alexander S. Romanov* — Student; Tomsk State University of Architecture and Building, Department of Industrial Management; E-mail: rmnw@mail.ru

P. 50—54.

AN ALGORITHM FOR GNSS RECEIVER IN INHOMOGENEOUS ATMOSPHERE

A new algorithm for a receiver of the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) is presented. The algorithm is developed in the frames of the ray optics theory; dependence of the speed of light on the distance from the Earth surface is supposed to be known.

Keywords: navigation receiver, speed of light, algorithm, navigation, side parameter, time difference of arrival.

Data on author

- Lyubov P. Barabanova* — Cand. Phys.-Math. Sci.; V. A. Degtyarev State Academy of Technology, Kovrov; E-mail: lpbarabanova@yandex.ru

P. 55—59.

GENERATION OF THE OPTIMAL BOOLEAN FUNCTIONS IN THE ANALOG-TO-DIGITAL CONVERSION USING COGNATE-REALIZATION

The cognate-representation of Boolean functions is proposed for the use in analog-to-digital conversion. The approach allows for optimal definition of the obtained function and saving on hardware cost in design and operation of analog-to-digital converters.

Keywords: cognate-realization, analog-digital converter, partially defined Boolean functions.

Data on author

Sergey A. Kushch — Cand. Techn. Sci.; Cherkasy State Technological University, Department of Informatics and Information Security; Senior Lecturer; E-mail: kushch@ieee.org

P. 60—65.

CORRECTION OF IMAGE FIELD CURVATURE FOR LENS WITH RADIAL INHOMOGENEITY OF THE REFRACTIVE INDEX

Several approaches to design of lens with minimized curvature of the image in the field of second and third aberration orders are discussed. The approaches under consideration are based on the use of inhomogeneous optical material with radial gradient of the refractive index. Application of such lenses is reported to allow for simplicity and decrease in overall dimensions of optical system components.

Keywords: lens, field curvature, radial gradient of refraction index.

Data on author

Alexander L. Sushkov — Cand. Techn. Sci.; Bauman Moscow State Technical University, Department of Laser and Optical-Electronic Systems, Moscow; E-mail: ale-sushkov@yandex.ru

P. 66—70.

EXPERIMENTAL STUDY OF OPERABILITY OF ELECTRONIC EQUIPMENT COMPONENTS ON BOARD OF “MOZHAETS” SERIES SPACECRAFT

Results of field studies of the effect of space factors on radio and electronic equipment on board of spacecraft Mozhaets-3 and Mozhaets-4 are presented. Characteristics of reliability of the electronic elements operating under exposure to solar and geophysical factors are analyzed.

Keywords: space experiment, reliability, electronic equipment stability.

Data on authors

Ivan V. Zakharov — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Information and Data-Processing Systems and Networks; St. Petersburg;

E-mail: x.vano-z80@yandex.ru

Georgy V. Kremez — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Information and Data-Processing Systems and Networks; St. Petersburg; E-mail: gvkremez@mail.ru

Evgeny V. Frolkov — Dr. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Information and Data-Processing Systems and Networks; St. Petersburg; E-mail: e_frolkov@mail.ru

P. 71—76.

IMITATION MODELING OF ASSEMBLING OF SCREW PAIRS OF MACHINE-BUILDING COMPONENTS BASED ON COMPUTER TOMOGRAPHY DATA

The generalized Hough transform is applied for derivation of geometric primitives (helicoids) from 3D distribution of screw pair density obtained with computer tomographic system. Transformation of the density field into 3D image and subsequent imitation modeling is carried out with the use of marching cubes algorithm method. The initial data for various screws thread are derived with the use of the Carl Zeiss Metrotom 1500 CT-scanner.

Keywords: computer tomography, screw thread, modeling.

Data on author

- Sergey V. Kosarevsky* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State Polytechnical University, Institute of Machine-Building, Department of Technology, Equipment, and Automation of Machine-Building Works; E-mail: kosarevsky@mail.ru
- Viktor N. Latypov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg State University

P. 76—80.

THE EFFECT OF MANUFACTURING ERRORS IN THE PARALLEL CRANK MECHANISM ELEMENTS ON KINEMATIC ACCURACY OF A CYCLOIDAL REDUCER

The effect of manufacturing errors in the parallel crank mechanism elements on kinematic accuracy of a k-h-v type cycloidal reducer is considered. A method for determination of the error of output shaft rotation angle for the cases when one and two satellites are used is presented.

Keywords: planetary reducer, pin transmission, cycloid engagement, kinematic error, position error, kinematic pair of higher degree, profile normal.

Data on authors

- Ivan M. Egorov* — Cand. Techn. Sci.; Joint-Stock Company “DIAKONT”, St. Petersburg; Leading Scientist; E-mail: egrov@mail.ru
- Sergey A. Aleksanin* — Joint-Stock Company “DIAKONT”, St. Petersburg; Deputy Director General
- Mikhail E. Fedosovsky* — Cand. Techn. Sci.; Joint-Stock Company “DIAKONT”, St. Petersburg; Director General; E-mail: diakont@diakont.com
- Anastasiia S. Ptitsyna* — ITMO University, St. Petersburg; Engineer; E-mail: troftu@mail.ru

P. 81—82.

PERFORMING TEMPERATURE STUDIES WITH SCANNING CONFOCAL MICROSCOPE

An attachment for the Zeiss LSM710 laser scanning microscope is designed for investigation of optical characteristics of samples at a temperature from 30°C to 110°C maintained with the accuracy of $\pm 0,25$ °C.

Keywords: confocal microscope, luminescence, temperature researches.

Data on authors

- Andrey S. Zlatov* — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical Physics and Modern Natural Science, St. Petersburg; E-mail: zlatov@oi.ifmo.ru
- Viktor V. Zakharov* — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical Physics and Modern Natural Science, St. Petersburg; E-mail: Viktor-zah@yandex.ru

P. 83—84.

MEASURING SYSTEM FOR ANALYSIS OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF COATING

An automated device for detailed study and control of various types of coatings deposited on flat surfaces is described.

Keywords: spectral characteristic of reflection, reflectance, color parameter, coating, quality control.

Data on authors

- Elena V. Gorbunova* — Cand. Techn. Sci.; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems, St. Petersburg; E-mail: vredina_ia@mail.ru
- Valery V. Korotaev* — Dr. Techn. Sci., Professor; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Head of the Department, St. Petersburg; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Elena A. Lastovskaya* — Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems, St. Petersburg; E-mail: plastelinchik@mail.ru

P. 85—86.

DEVELOPMENT OF PRIMARY TRANSDUCER FOR COMPARABLE MEASUREMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS

The description developed by the primary transducer for implementing the method of dynamic indentation under the control of mechanical properties of materials.

Keywords: primary transducer, nondestructive testing, dynamic indentation, hardness, elastic modulus.

Data on authors

- Mikhail P. Marusin* — ITMO University, Department of Measurement Technology and Computer Tomography, St. Petersburg; Assistant Lecturer; E-mail: mishasp06@mail.ru
- Tatiana A. Protasenia* — Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Laboratory of Contact-Dynamic Control Methods, Minsk; Junior Scientist; E-mail: 5657397@gmail.com

P. 87—89.

ABOUT THE POSSIBILITY OF A ONE-STEP METHOD OF LASER MICROSTRUCTURING OF SAPPHIRE SURFACE

The description of the laser sublimation orderly formation of deep surface micro-relief wafer sapphire.

Keywords: laser sublimation, relief on surface, LED, refractory dielectrics, leucosapphire.

Data on authors

- Dmitry V. Chesnokov* — Cand. Techn. Sci.; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Nanosystems and optical engineering, Novosibirsk; E-mail: phys003@list.ru
- Denis V. Kochkarev* — Siberian State Academy of Geodesy, Department of Physics, Novosibirsk; Engineer; E-mail: denlnsk@mail.ru
- Valery A. Reichert* — Siberian State Academy of Geodesy, Department of Physics, Novosibirsk; Leading Engineer;
- Maxim V. Kuznetsov* — Siberian State Academy of Geodesy, Department physics, Novosibirsk; technician
- Vladimir V. Chesnokov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Physics, Novosibirsk