

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Иванов С. В., Колыхматов И. И., Бухановский А. В.** Параллельные алгоритмы моделирования комплексных сетей 5
- Алешкин А. П., Савочкин П. В., Манташян М. Ю., Курушкин С. М.** Метод обработки результатов оптических измерений на основе векторного редуцированного оценивания 12
- Суханов А. В., Нестерук Г. Ф.** Обеспечение безопасности автоматизированных информационных сетей 16

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Кабанов Д. С., Крашенинников Б. А.** Управление траекторией движения автомобиля с использованием алгоритма последовательной оптимизации 21

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Тимофеев А. В., Дерин О. А.** Анализ сложных мультиизображений в режиме реального времени 25
- Ковалев И. В., Завьялова О. И., Лайков А. Н.** Формирование избыточного программного обеспечения отказоустойчивых систем управления 30

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Усольцев А. А., Лукичёв Д. В.** Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным 35
- Жиганов И. Ю.** Развитие телевизионных методов измерения геометрических параметров труб 42
- Неронов Ю. И.** Модуль управления ЯМР-томографом 47

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Алексеев С. А., Кононов С. А., Секарин К. Г., Трофимов В. А.** Исследование возможности обнаружения объектов на основе поляризационного контраста 52
- Прокопенко В. Т., Храмовский И. А., Землянский В. С., Лисицын Ю. В., Секарин К. Г.** Эллипсометрия оптических соединений элементов оптоэлектроники 57
- Сюй А. В., Кравцова Н. А., Строганов В. И., Криштоп В. В.** Параметрический метод построения эллипса поляризации излучения 65
- Демидов В. М., Поляков А. Ю.** Уменьшение влияния параллакса на погрешность стабилизации видеоизображений 69

Зверев В. А., Романова Г. Э. Компенсаторы для несферических поверхностей зеркальных телескопов.....	72
Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К., Смирнов В. Д. Егельский И. Д. Компоновка многоканальной аппаратуры инфракрасного и миллиметрового диапазонов.....	76
ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ	
Скворцов А. М., Дышловенко С. С., Погумирский М. В., Фам Куанг Тунг, Соколов В. И. Некоторые свойства кремниевых структур, полученных лазерным микроstructuringированием.....	79
Жерновой А. И. Определение состава нефтегазовой смеси методом ядерного магнитного резонанса.....	84
ИНФОРМАЦИЯ	87
SUMMARY	90

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Ivanov S. V., Kolykhatov I. I., Boukhanovsky A. V.** Parallel Algorithms for Complex Networks Simulations 5
- Aleshkin A. P., Savochkin P. V., Mantashian M. Yu., Kurushkin S. M.** Method of Data Processing Optical Measurements on the Basis of Vector Reduced Evaluation 12
- Sukhanov A. V., Nesteruk G. F.** Automation of a Safety of Corporate Networks 16

DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Kabanov D. S., Krashennnikov B. A.** Control of Course Movements of a Car Using an Algorithm of Sequential Optimization 21

COMPUTING TECHNIQUE

- Timofeev A. V., Derin O. A.** Analyze of Difficult Multiimages in a Mode of Real Time 25
- Kovalev I. V., Zavjalova O. I., Lajkov A. N.** The Design of the Redundant Fault-Tolerant Control System Software..... 30

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Usoltsev A. A., Lukichev D. V.** Definition of Parameters of Model of the Asynchronous Engine on the Help Data..... 35
- Zhiganov I. Yu.** Development of Television Methods of Tubes Geometric Parameters Measurement 42
- Neronov Yu. I.** Module of Management of the NMR-Tomograph..... 47

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Alekseev S. A., Kononov S. A., Sekarin K. G., Trofimov V. A.** Research of Ability Disclosure Objects on Basis of Polarised Contrast 52
- Prokopenko V. T., Khramzovsky I. A., Zemlyansky V. S., Lisitsyn Yu. V., Sekarin K. G.** Ellipsometry of Optical Connections Optoelectronics Elements 57
- Syuy A. V., Kravtsova N. A., Stroganov V. I., Krishtop V. V.** Parametrical Method of Construction of the Ellipse of Polarization of Radiation 65
- Demidov V. M., Polyakov A. Yu.** Influence Decreasing Parallax on Videoimages Stabilization Error..... 69
- Zverev V. A., Romanova G. E.** Null Correctors for the Aspherical Surfaces in the Schemes of the Mirror Telescopes 72
- Umbitaliev A. A., Tsytsulin A. K., Smirnov V. D., Egelsky I. D.** Composition Multichannel Infrared and Millimeter Wave Band Devices..... 76

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

Skvortsov A. M., Dyshlovenko S. S., Pogumirsky M. V., Pham Quang Tung, Sokolov V. I. Some Properties of Silicon Structures, Received by Laser Microstructurization	79
Zhernovoy A. I. Investigation of the Composition of Petroleum-Water-Gas Mixture by Nuclear Magnetic Resonance Method	84
INFORMATION	87
SUMMARY	90

Editor-in-Chief L. F. Porfiriev

С. В. ИВАНОВ, И. И. КОЛЫХМАТОВ, А. В. БУХАНОВСКИЙ

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ СЕТЕЙ

Представлено семейство параллельных алгоритмов, которые позволяют воспроизводить комплексную сеть как стохастический граф с заданными вероятностными свойствами. Каждый из алгоритмов основывается на естественных свойствах распараллеливания структуры графов и соответствует особенностям конкретной вычислительной архитектуры, включающих системы с общей и разделенной памятью, а также кластерные системы. Приводятся результаты экспериментальных исследований производительности параллельных алгоритмов на многоядерных вычислительных системах и кластерной системе TForge-Mini.

Ключевые слова: комплексные сети, генерация графа, параллельные алгоритмы, гибридная архитектура, модели производительности.

Введение. Моделирование сетей с использованием аппарата теории графов является важным направлением дискретной математики [1]. В последнее десятилетие возрос интерес исследователей к комплексным сетям, включающим большое количество узлов, структура которых нерегулярна, сложна и динамически эволюционирует во времени [2]. Примером комплексных сетей служат социальные сети (знакомств, соавторства ученых [3]), информационные (цитирования в научных статьях [4], web-ссылок [5]), технологические (Интернет, транспортные и электрические сети) и биологические (сети нейронов в мозге, взаимодействующих протеинов, генетические сети).

Для исследования таких комплексных сетей *in-silico** необходимо генерировать стохастические графы с количеством вершин порядка 10^6 — 10^{10} . Это, в свою очередь, инициирует развитие параллельных алгоритмов генерации графов и соответствующих способов их хранения в распределенной вычислительной среде.

В настоящее время сформулировано четыре подхода к моделированию комплексных сетей, основанных на моделях графов специального вида и ряде стандартных алгоритмов:

- 1) случайных пуассоновских графов и обобщенных случайных графов [6, 7];
- 2) марковских случайных графов и моделях блуждания по „графу графов“ [8—10];
- 3) модели „малого мира“ Уотса и Стратоса [11] и ее обобщений;
- 4) эволюционной модели роста сети Барабаси и Альберт [12] и модели Прайса [4].

Первые три подхода подразумевают генерацию случайного графа с заранее известным числом вершин и заданными вероятностными свойствами.

* В современной терминологии eScience „in-silico“ — компьютерное моделирование объектов, используемое, когда другие способы исследования (наблюдением — *in vivo*, *in situ*, активным экспериментом — *in vitro*) не представляются целесообразными или возможными.

В настоящей работе представлены параллельные алгоритмы генерации комплексных сетей с заданным законом распределения степеней вершин, адаптированные для параллельных вычислительных архитектур с общей (symmetric multiprocessing, SMP) и разделенной (massive parallel processing, MPP) памятью.

Вероятностная модель комплексной сети. Комплексная сеть представляет собой граф G , который определяется как совокупность (V, E) конечного множества вершин V , $\dim(V) = N$, и множества ребер E , состоящего из неупорядоченных пар (u, v) , где $u, v \in V$ и $u \neq v$. Каждая вершина характеризуется своей степенью, т.е. числом инцидентных ей ребер. Упорядоченный список степеней вершин называется степенной последовательностью.

Интегральной характеристикой комплексной сети является закон распределения степеней вершин p_k , который определяет вероятность того, что случайно выбранная вершина имеет степень k . Степенную последовательность для неориентированного графа удобно представить в форме $d = (c_1^{k_1}, c_2^{k_2}, \dots, c_N^{k_N})$, где число c_i — степень, а показатель k_i обозначает количество повторений числа c_i в последовательности. Такая запись позволяет связать дискретное распределение степеней вершин p_k со степенной последовательностью d в форме

$$p_k \stackrel{\text{def}}{=} P[x = c_i] = k_i / N.$$

В модели случайных графов [6] ребро, инцидентное любым двум вершинам, присутствует или отсутствует с равной вероятностью, вследствие чего распределение p_k будет биномиальным или (в пределе по N) пуассоновским. Однако большинство реальных сетей имеет структуру, отличную от структуры случайных графов, что отражается на характере распределения степеней вершин [2]. В частности, во многих реальных сетях эмпирическое распределение степеней вершин интерпретируется в терминах степенного распределения $p_k = k^{-\gamma} / \zeta(\gamma)$, где ζ -функция Римана играет роль нормирующей константы. Это распределение характеризуется единственным параметром γ , определяющим скорость убывания хвоста распределения. В ряде случаев могут использоваться более сложные аппроксимации на основе степенного распределения, например, на основе усеченного распределения или смеси нескольких распределений с разными параметрами.

Способ генерации комплексной сети по заданному закону распределения степеней вершин. Наиболее популярным способом генерации сетей с заданным законом распределения степеней вершин является так называемая конфигурационная модель [13—15] или близкая ей по смыслу l -процедура [16]. Если распределение p_k задано, то вычислительная процедура сводится к следующим операциям:

— формируется степенная последовательность d путем выбора N чисел k_i согласно заданному распределению p_k , где $i = \overline{1, N}$;

— каждой вершине i графа присваивается k_i „заготовок“ (концов) для будущих ребер;

— из степенной последовательности случайным образом извлекаются пары вершин, которые соединяются ребром в том случае, если это не приведет к появлению ребер-циклов (петель) или мультиребер. Если ребро сгенерировано, то соответствующие индексы из степенной последовательности удаляются;

— предыдущий шаг повторяется до тех пор, пока степенная последовательность не будет пустой.

На основе распределения p_k любой граф может быть построен $\prod_i k_i!$ различными способами, поскольку „заготовки“ для будущих ребер неразличимы. Таким образом, этот процесс с равной вероятностью генерирует любую возможную конфигурацию сети с заданным

распределением степеней вершин. Преимуществом данного алгоритма является его универсальность, так как с его помощью можно построить сеть с любым распределением степеней вершин.

Базовый параллельный алгоритм. Непосредственное распараллеливание конфигурационной модели не представляется целесообразным, поскольку для проверки наличия мультиребер требуется хранить для каждой вершины номера всех смежных с ней вершин. Когда несколько вычислителей (процессоров или ядер) одновременно участвуют в создании новых ребер, для корректной работы алгоритма требуется обеспечить синхронизацию доступа вычислителей к разделяемым ресурсам, что, с точки зрения параллельных вычислений, является нежелательной операцией. Многочисленные синхронные обращения к спискам смежных вершин могут серьезно снизить эффективность параллельной реализации алгоритма. Разумной альтернативой является блочная организация алгоритмов, основанная на операциях с максимально большими блоками комплексной сети.

Поскольку комплексная сеть, характеризуемая произвольным распределением p_k , является статистически однородной, то количество ребер между двумя блоками сети одинакового размера должно быть одинаковым; следовательно, для любой пары блоков ребра можно генерировать независимо. Если количество таких блоков превышает количество вычислителей, то, подбирая независимые пары блоков для каждого вычислителя, генерацию сети можно осуществлять параллельно. Для системы, состоящей из K вычислителей, разделение множества вершин N на $2K$ равных частей обеспечит наибольшие размеры независимых блоков. При этом между вершинами каждой пары различных блоков будет находиться $M/2K^2$ ребер, а между вершинами одного блока — $M/4K^2$ ребер, где

$$M = N \sum_i k_i p_i = N \langle k \rangle$$

— общее число ребер в сети, $\langle k \rangle$ — средняя степень вершины.

На рис. 1 приведена общая схема параллельного алгоритма генерации комплексной сети.

На первом этапе алгоритма сети формируются независимые фрагменты степенной последовательности d_j ($j = \overline{1, 2K}$) и инициализируются блоки сети.

На втором этапе генерируются связи между вершинами из разных блоков. Множество из $2K$ блоков разбивается на K пар так, чтобы связи между вершинами любых двух фиксированных блоков генерировались лишь однажды. При этом за каждым вычислителем закрепляются два независимых блока. В течение одной фазы каждый процессор выполняет построение ребер графа по алгоритму конфигурационной модели, на каждом шаге случайным образом выбирая вершину из одного блока своей пары, а другую — из другого блока. Этот процесс повторяется $2K - 1$ раз, т.е. до тех пор, пока не будут установлены ребра между всеми возможными сочетаниями блоков.

На третьем этапе происходит генерация ребер между вершинами каждого из $2K$ блоков. Связи между вершинами из одного блока генерируются независимо от других блоков, поэтому этот этап можно рассматривать как реализацию последовательного алгоритма конфигурационной модели разными вычислителями одновременно, применительно к независимым блокам (по два блока на вычислитель).

Принципиальной особенностью рассмотренного выше алгоритма является наличие „расписания“ (т.е. заданной последовательности обработки независимых блоков), которое обеспечивает обработку всех возможных парных сочетаний блоков. Существуют различные способы построения расписаний [17]; возможность их применения зависит, в первую очередь, от архитектуры вычислительной системы. В частности, для МРР-систем принципиальное значение имеет составление расписания с учетом балансировки нагрузки таким образом,

чтобы этап обменов данными занимал минимально возможное время. В данном случае допустимо использовать циклические расписания, аналогичные применяемым в матричных алгоритмах Фокса и Кэннона [18].

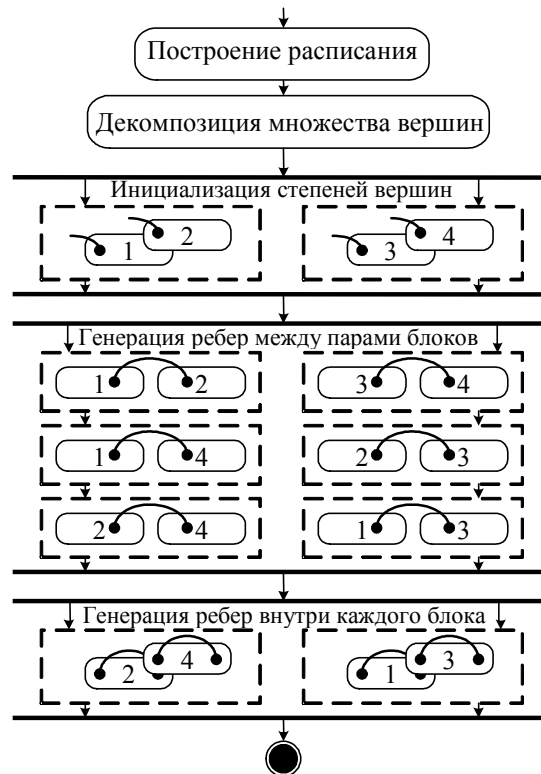


Рис. 1

Отображение алгоритма на вычислительную архитектуру. Система с общей памятью.

Отображение алгоритма, представленного на рис. 1, на архитектуру вычислительной системы с общей памятью не требует принудительного разделения данных между вычислителями. Алгоритм реализуется через набор потоков, каждый из которых на произвольной итерации работает с собственными блоками данных. По завершении каждой итерации выполняется синхронизация, после чего со всеми потоками ассоциируются новые блоки в соответствии с расписанием. На рис. 2, а представлена схема алгоритма в виде UML-диаграммы последовательностей для SMP-систем. Программная реализация такого алгоритма выполнена на основе технологии OpenMP [19].

С учетом того что время работы параллельного алгоритма (см. рис. 2, а) линейно зависит от N , параллельное ускорение в первом приближении может быть представлено в форме модификации закона Амдала:

$$S_K = \frac{1 + g(\langle k \rangle)}{1 + g(\langle k \rangle)/K}, \quad (1)$$

где безразмерная функция $g(\langle k \rangle) = \alpha + \beta \langle k \rangle$ отражает зависимость времени выполнения от средней степени вершины $\langle k \rangle$. Коэффициент α характеризует ресурсоемкость операции установления нового ребра, а β — определяет затраты на просмотр списка вершин в поиске мультиребер. На рис. 3, а результаты вычислительных экспериментов для SMP-систем, выполненных на компьютере с четырехъядерным процессором Intel Core2 Quad 2.4 ГГц, сопоставлены с выражением (1) при $\alpha = 0,91$ и $\beta = 0,054$ для различных значений $\langle k \rangle$ (1 — $\langle k \rangle = 12$; 2 — 3,6; 3 — 1,8). Из рисунка видно, что модель (1), несмотря на простоту, удовлетворительно согласуется с эксперимен-

тальными данными (значки). При этом значения параллельного ускорения весьма невелики: на четырех узлах не превышают двух. Это связано с достаточно весомой (по сравнению с операцией над ребрами) процедурой декомпозиции множества вершин и создания заготовок.

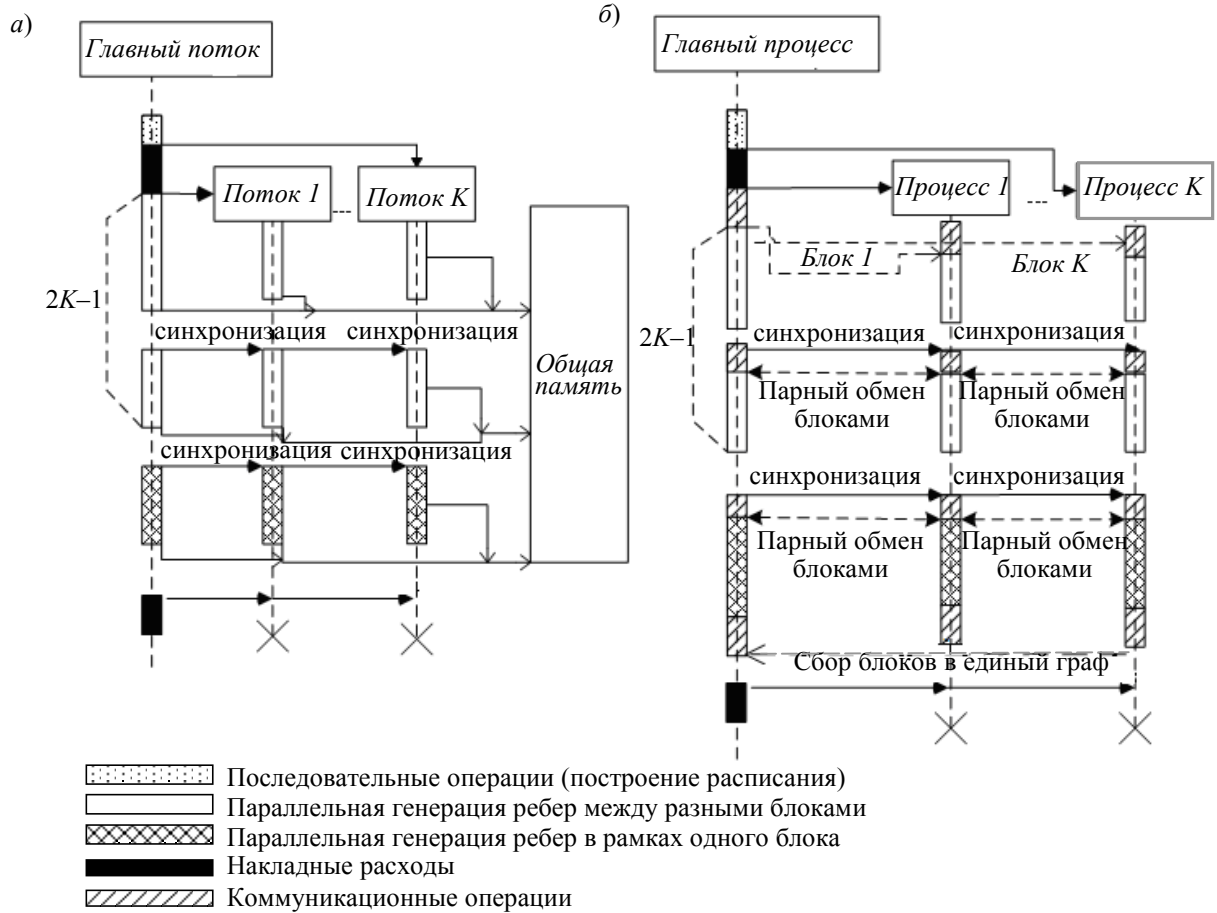


Рис. 2

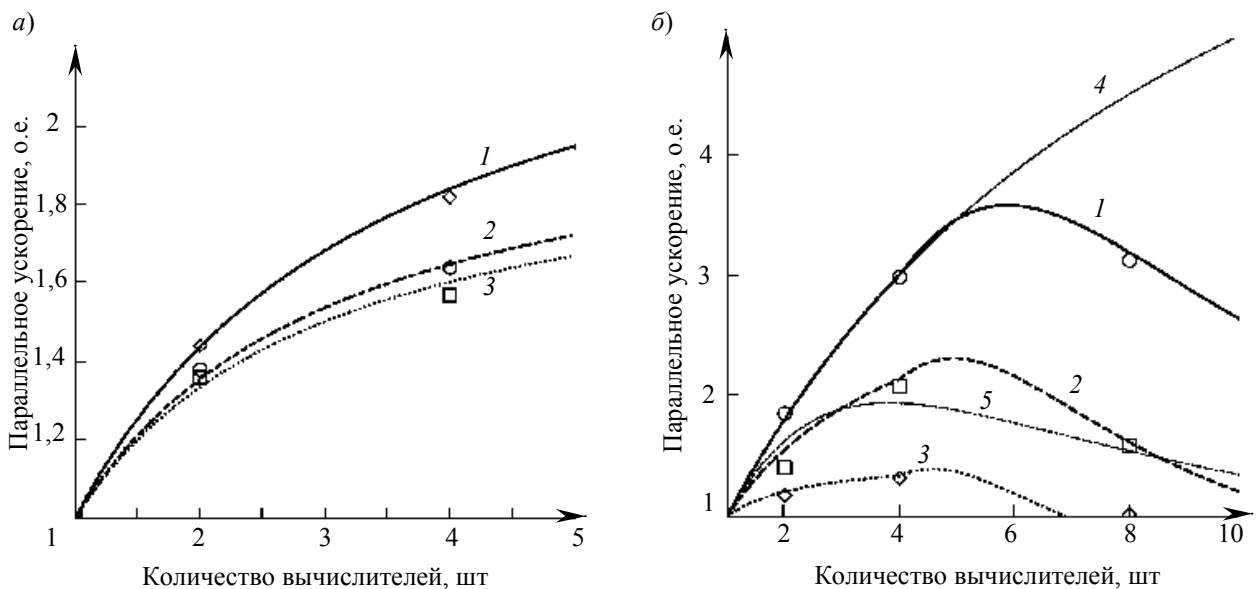


Рис. 3

Система с разделенной памятью. Для систем с разделенной памятью реализация параллельного алгоритма требует физического распределения фрагментов сети между вычислителями с последующей организацией обменов между узлами в соответствии с заданным расписанием. Программная реализация выполнена с использованием технологии MPI (см. рис. 2, б).

Главной проблемой при реализации предложенного параллельного алгоритма с помощью MPI является необходимость передачи списков смежности между узлами вычислительной техники. Функции MPI предназначены для передачи данных, расположенных в памяти последовательно. Эффективная реализация списков смежности подразумевает независимый динамический массив для каждой вершины отдельно. По этой причине для передачи списков смежности разумно использовать упаковку и распаковку динамических данных при помощи специальных функций `MPI_Pack` и `MPI_Unpack`.

Технология MPI позволяет эффективно работать как с разделенной, так и с общей памятью; в последнем случае скорость обменов данными кардинально возрастает, что необходимо учитывать, если программа функционирует на системе гибридной архитектуры, например, кластере на основе SMP-узлов. В качестве примера на рис. 3, б приведены оценки параллельного ускорения при различных значениях $\langle k \rangle$ (см. рис. 3, а) по результатам расчетов на кластере TForge-Mini (4 двухпроцессорных двухъядерных узла на основе AMD Opteron 275). С учетом накладных расходов на обмен данными между узлами модель (1) трансформируется в более привычную для MPP-систем форму:

$$S_K = \frac{K}{1 + \frac{(K-1)}{1 + g(\langle k \rangle)} + \chi(K - K_{\max}) \frac{(K - K_{\max})(K - K_{\max} - 1)}{1 + g(\langle k \rangle)} \tau}. \quad (2)$$

Здесь K_{\max} — максимальное количество вычислителей (ядер) на узле, $\chi(\bullet)$ — ступенчатая функция Хевисайда, τ — безразмерный параметр, характеризующий отношение базовой операции по передаче данных к базовой вычислительной операции. Значение τ не зависит от других параметров задачи и является (для заданного алгоритма) объективной характеристикой вычислительной архитектуры. Для кластера TForge-Mini $\tau \cong 0,55$.

На рис. 3, б модель (2) (4 — для SMP-системы, $K_{\max} = 16$; 5 — для MPP-системы, $K_{\max} = 1$) сопоставлена с результатами экспериментов (значки) — результаты согласуются удовлетворительно. Из сопоставления рис. 3, а и б видно, что при одних и тех же данных алгоритм для общей памяти масштабируется хуже, чем для разделенной памяти. Это объясняется не только различием архитектуры (и скорости доступа к общей памяти) на узле кластера и в рабочей станции с четырехъядерным процессором, но и различием программных реализаций. Для SMP-реализации (вследствие отсутствия необходимости физической передачи данных между узлами) хранение списков смежности организовано более эффективно, чем для MPP-реализации. Как следствие, абсолютное время последовательной работы MPP-реализации в среднем в 1,5 раза больше, чем для SMP-реализации, это вызвано пониженной зернистостью (дробностью), что способствует увеличению масштабируемости.

Рассмотренные алгоритмы и полученные на их основе результаты были использованы авторами при моделировании динамики эпидемии ВИЧ [20].

Заключение. Таким образом, предложенный параллельный алгоритм генерации комплексной сети с заданным законом распределения допустимо использовать на вычислительных системах как с SMP-, так и с MPP-архитектурой. Возможности современных рабочих станций (пусть даже на основе многоядерных процессоров) ограничены построением сетей размера порядка 10^7 вершин. Потому моделирование более обширных сетей возможно лишь на основе кластерных архитектур. Несмотря на то что эффективность данного алгоритма невелика (по результатам экспериментов — не более 50 %), его принципиальным отличием является практическая независимость масштабируемости от размера комплексной сети N . Это дает определенные гарантии возможности получения результата за разумное (пусть и достаточно большое) время при увеличении количества вычислительных узлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boccaletti S., Latora V., Moreno Y.* et al. Complex networks: Structure and dynamics // *Phys. Rep.* 2006. Vol. 424, N 4—5. P. 175—308.
2. *Newman M. E. J.* The Structure and Function of Complex Networks // *SIAM Rev.* 2003. Vol. 45, N 2. P. 167—256.
3. *Redner S.* How popular is your paper? An empirical study of the citation distribution // *Europ. Phys. J. B.* 1998. Vol. 4. P. 131—134.
4. *Price D. J. de S.* A general theory of bibliometric and other cumulative advantage processes // *Journal of the American Society for Information Science.* 1976. Vol. 27. P. 292—306.
5. *Broder A., Kumar R., Maghoul F.* et al. Graph structure in the web // *Computer Networks.* 2000. Vol. 33. P. 309—320.
6. *Erdős P., Rényi A.* On the evolution of random graphs // *Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences.* 1960. Vol. 5. P. 17—61.
7. *Rapoport A.* Contribution to the theory of random and biased nets // *Bulletin of Mathematical Biophysics.* 1957. Vol. 19. P. 257—277.
8. *Holland P. W., Leinhardt S.* An exponential family of probability distributions for directed graphs // *J. of the American Statistical Association.* 1981. Vol. 76. P. 33—65.
9. *Frank O., Strauss D.* Markov graphs // *J. of the American Statistical Association.* 1986. Vol. 81. P. 832—842.
10. The Markov chain simulation method for generating connected power law random graphs / *C. Gkantsidis, M. Mihail, E. Zegura* // *Proc. of the 5th Workshop on Algorithm Engineering and Experiments.* Baltimore, Maryland, USA, 2003. P. 16—25.
11. *Watts D. J., Strogatz S. H.* Collective dynamics of „small-world“ networks // *Nature.* 1998. Vol. 393. P. 440—442.
12. *Barabási A.-L., Albert R.* Emergence of scaling in random networks // *Science.* 1999. Vol. 286. P. 509—512.
13. *Bekessy A., Bekessy P., Komlos J.* Asymptotic enumeration of regular matrices // *Studia Scientiarum Mathematicarum Hungarica.* 1972. Vol. 7. P. 343—353.
14. *Bender E. A., Canfield E. R.* The asymptotic number of labeled graphs with given degree sequences // *Journal of Combinatorial Theory A.* 1978. Vol. 24. P. 296—307.
15. *Molloy M., Reed B.* A critical point for random graphs with a given degree sequence // *Random Structures Algorithms.* 1995. Vol. 6. P. 161—179.
16. *Емеличев В. А., Мельников О. И., Сарванов В. И.* и др. Лекции по теории графов. М.: Наука, 1990.
17. *Lee P., Kedem Z. M.* Automatic data and computation decomposition on distributed memory parallel computers // *ACM Transactions on Programming Languages and Systems.* 2002. Vol. 24, N 1. P. 1—50.
18. *Choi J., Dongarra J. J., Walker D. W.* Parallel matrix transpose algorithms on distributed memory concurrent computers // *Parallel Computing.* 1995. Vol. 21, N 9. P. 1387—1405.
19. *Chandra R., Menon R., Dagum L.* et al. *Parallel Programming in OpenMP.* Morgan Kaufmann Publishers, 2000.
20. *Sloot P. M. A., Ivanov S. V., Boukhanovsky A. V.* et al. Stochastic simulation of HIV population dynamics through complex network modeling // *Int. J. of Computer Mathematics.* 2008. Vol. 85, N 8. P. 1175—1187.

Сведения об авторах

- Сергей Владимирович Иванов** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
E-mail: sergey.v.ivanov@rambler.ru
- Илья Игоревич Колыхматов** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
E-mail: kolyhmatov@gain.ifmo.ru
- Александр Валерьевич Бухановский** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
E-mail: avb_mail@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

А. П. АЛЕШКИН, П. В. САВОЧКИН, М. Ю. МАНТАШЯН, С. М. КУРУШКИН

МЕТОД ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНОГО РЕДУЦИРОВАННОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Предложен метод обработки результатов угловых измерений, выполненных с помощью оптико-электронных систем, позволяющий повысить точность определения параметров движения динамического объекта за счет совместного использования метода максимального правдоподобия и векторной редукции.

Ключевые слова: векторная редукция, идентификация, несмещенная/смещенная оценка, оптические измерения, ММП-оценка.

В настоящее время в задачах идентификации вектора состояния динамических объектов в основном применяются алгоритмы, основанные на методе максимального правдоподобия (ММП) [1]. При формировании оценок в реальном масштабе времени широко используется алгоритм калмановской фильтрации и его модификации. Первоначальные данные для завязки траекторий малоразмерных космических объектов в условиях интенсивных шумов измерений не позволяют решать задачу идентификации динамических объектов с требуемой точностью. Это связано с тем, что дисперсия измерений после ММП-оценивания получается недопустимо большой.

Известно неравенство Рао—Крамера [2, 3], которое подтверждает возможность получения меньшей полной квадратичной ошибки для смещенной оценки, чем дисперсия несмещенного ММП-оценивания. Для этого представляется целесообразным последовательно использовать несмещенное и смещенное оценивание в процедурах обработки данных измерений.

При представлении модели наблюдения простым линейным уравнением

$$\bar{y} = A\bar{x} + \bar{\varepsilon}_{\text{ш}} \quad (1)$$

максимально правдоподобная оценка $\hat{x}_{\text{ММП}}$ вектора \bar{x} (m -мерного вектора оцениваемых параметров) является решением уравнения

$$\frac{\partial \Phi(\bar{x}, \bar{y})}{\partial \bar{x}} = 0$$

и имеет вид $\Phi(\bar{x}, \bar{y}) = (\bar{y} - A\bar{x})^T K_{\varepsilon}^{-1} (\bar{y} - A\bar{x})$,

$$\hat{x}_{\text{ММП}} = (A^T K_{\varepsilon}^{-1} A)^{-1} A^T K_{\varepsilon}^{-1} \bar{y}, \quad (2)$$

где \bar{y} — n -мерный вектор измерений; $\bar{\varepsilon}_{\text{ш}}$ — m -мерный вектор шумов, распределенных по нормальному закону, характеризующийся корреляционной матрицей K_{ε} ; A — $n \times m$ матрица наблюдения (функциональная матрица).

В теории статистического оценивания известно несколько вариантов смещенных оценок [2—5], каждый из которых эффективен для конкретных условий применения. Наиболее популярным и понятным с позиций физической интерпретации представляется следующий вариант векторной смещенной оценки:

$$\bar{x}^* = r\hat{x}. \quad (3)$$

При этом исходная несмещенная оценка $\hat{x}_i = x_i + \varepsilon_{\text{ММП}_i}$ (x_i — значение истинного вектора оцениваемого параметра, $\varepsilon_{\text{ММП}_i}$ — случайная погрешность, распределенная по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 , т.е.

$\varepsilon_{\text{ММП}_i} \in N(0, \sigma^2)$) умножается на некоторый коэффициент r , значение которого должно быть меньше единицы. Действительно, только в этом случае возможно уменьшение погрешности $\bar{\varepsilon}$. Однако при этом появится смещение, равное $b_i = (1 - r)x_i$.

Выполнив поиск экстремума функции полной ошибки оценивания по параметру r , несложно получить наилучшее значение коэффициента редукции $r_{\text{опт}i} = \frac{x_i^2}{x_i^2 + \sigma^2}$.

Таким образом, оптимальным вариантом векторной редуцированной оценки является следующий:

$$x_{\text{опт}i}^* = r_{\text{опт}i} \hat{x}_i = \frac{x_i^2}{x_i^2 + \sigma^2} \hat{x}_i. \quad (4)$$

Более универсальной представляется следующая форма редуцированной оценки [2, 3], удобная для практической реализации:

$$x_i^* = x_{\text{оп}i} + \frac{(\hat{x}_i - x_{\text{оп}i})^2}{(\hat{x}_i - x_{\text{оп}i})^2 + \sigma^2} (\hat{x}_i - x_{\text{оп}i}) = x_{\text{оп}i} + r_i (\hat{x}_i - x_{\text{оп}i}), \quad (5)$$

где $x_{\text{оп}i}$ — значение априорно известного вектора, в направлении которого осуществляется редукция, называемого опорным.

При объединении ММП и векторной редуцированной оценки в соответствии с выражениями (2) и (5) получим

$$x_i^* = x_{\text{оп}i} + \frac{(\hat{x}_{\text{ММП}_i} - x_{\text{оп}i})^3}{(\hat{x}_{\text{ММП}_i} - x_{\text{оп}i})^2 + \sigma^2} = x_{\text{оп}i} + r_i (\hat{x}_{\text{ММП}_i} - x_{\text{оп}i}), \quad (6)$$

где $\hat{x}_{\text{ММП}_i}$ — максимально правдоподобная оценка вектора \bar{x} .

При выборе опорного вектора $\bar{x}_{\text{оп}}$ в задачах идентификации траекторий динамических объектов целесообразно осуществлять оценку не самих измеряемых параметров, а их невязок относительно прогнозируемых значений. Действительно, опорный вектор можно заменить средним значением невязок ($x_{\text{н}i}$) по каждому оцениваемому параметру:

$$\tilde{x}_{\text{оп}} = \frac{1}{N} \sum (x'_i - \hat{x}_{\text{ММП}_i}) = \frac{1}{N} \sum x_{\text{н}i}, \quad (7)$$

где N — общее количество измеренных параметров вектора \bar{x} ; x'_i — прогнозируемое значение вектора \bar{x} .

Тогда выражение (6) примет вид:

$$x_{\text{н}i}^* = \tilde{x}_{\text{оп}i} + \frac{(x_{\text{н}i} - \tilde{x}_{\text{оп}i})^3}{(x_{\text{н}i} - \tilde{x}_{\text{оп}i})^2 + \sigma^2} = \tilde{x}_{\text{оп}i} + r_i (x_{\text{н}i} - \tilde{x}_{\text{оп}i}). \quad (8)$$

В условиях точного прогнозирования, как показало компьютерное моделирование, наилучшим образом зарекомендовала себя оценка вида:

$$x_{\text{н}i}^* = \tilde{x}_{\text{оп}i} + r_i^\alpha (x_{\text{н}i} - \tilde{x}_{\text{оп}i}), \quad (9)$$

где $\alpha = 2, 3, \dots$

На рис. 1 представлен график работы алгоритма в соответствии с выражением (8). Из графика видно, что редуцированная оценка \bar{x}_H^* дает существенный выигрыш по точности по сравнению с ММП-оценкой $\bar{x}_{ММП}$.

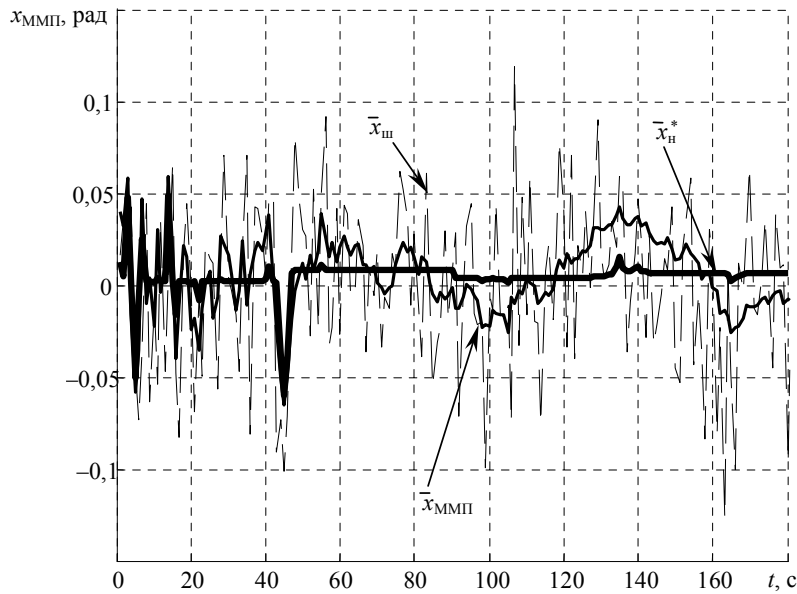


Рис. 1

На рис. 2 представлены гистограммы распределения плотности вероятности (P) при использовании рекуррентной фильтрации (а, в) и редуцированной оценки (б, г) в зависимости от объема выборки N (а, б — 183; в, г — 366) усреднения опорного значения $\tilde{x}_{оп}$ при дисперсии шума измерений $\sigma_{ш}^2 = 1$ и нулевом математическом ожидании.

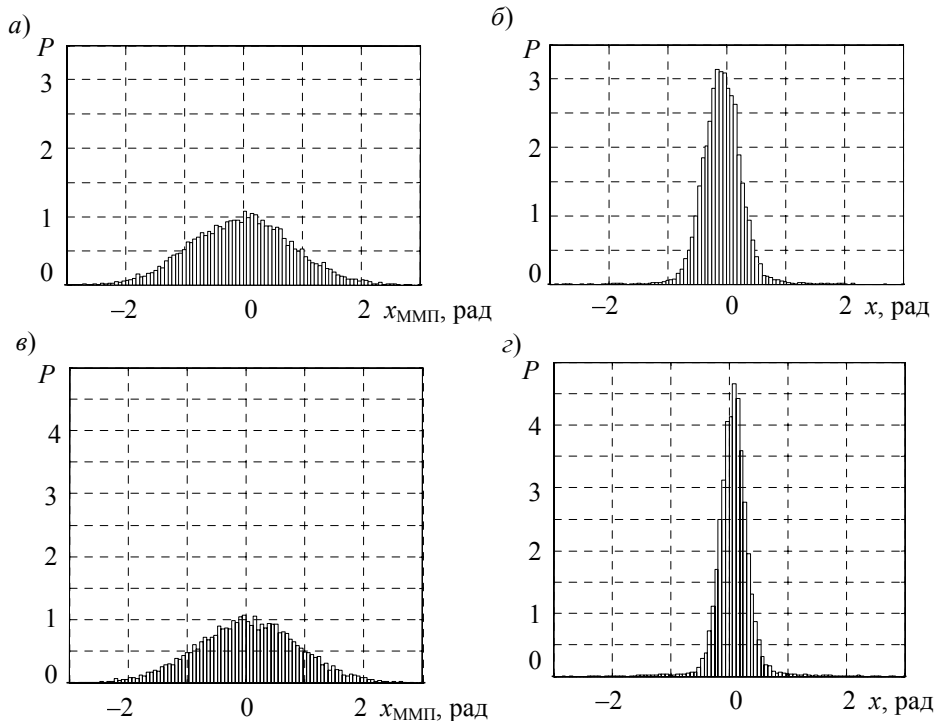


Рис. 2

Усреднение $\tilde{x}_{оп}$ производилось с различным числом выборки измерений N вектора измерений \bar{x} .

Из анализа гистограмм можно сделать вывод о доминировании смещенной оценки над несмещенной, а также повышении точности смещенного оценивания с ростом числа усредняемых измерений при нахождении $\tilde{x}_{\text{оп}}$.

Таким образом, совместное использование процедур несмещенного и смещенного оценивания значительно уменьшает погрешность измерений. Следует отметить, что редуцированная оценка обеспечивает заметный выигрыш в случае высокой интенсивности шумов измерений и не приводит к снижению точности несмещенного оценивания при малых значениях указанного шума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Малютин Ю. М., Экало А. В.* Применение ЭВМ для решения задач идентификации объектов. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1988. 256 с.
2. *Костылев А. А., Степанов М. Г.* Смещенные оценки и метод регуляризации в радиотехнических задачах. Учеб. пос. М.: МО СССР, 1984. 83 с.
3. *Степанов М. Г.* Введение в теорию смещенного оценивания параметров движения космических аппаратов по ограниченным данным. СПб: ВИККА им. А. Ф. Можайского, 1993. 135 с.
4. *Алешкин А. П.* Плотность вероятности адаптивной редуцированной оценки данных наблюдений, полученных угломерными оптико-электронными системами // Оптич. журн. 2000. Т. 67, № 7. С. 45—49.
5. *Алешкин А. П.* Основы теории адаптивного смещенного оценивания с нелинейными ограничениями и ее применение к решению некорректных навигационных задач. СПб: ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 2001. 153 с.

Сведения об авторах

<i>Андрей Петрович Алешкин</i>	— Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург
<i>Павел Владимирович Савочкин</i>	— Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, E-mail: p_gehon@mail.ru
<i>Максим Юрьевич Манташян</i>	— Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург
<i>Сергей Михайлович Курушкин</i>	— Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой
антенно-фидерных устройств

Поступила в редакцию
26.06.08 г.

А. В. СУХАНОВ, Г. Ф. НЕСТЕРУК

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Информационная безопасность (ИБ) телекоммуникационных систем в значительной степени обеспечивается за счет включения интеллектуальных средств в состав систем защиты информации (СЗИ). Придание отдельным механизмам защиты биоподобных свойств, таких как адаптивность и самоорганизация, свидетельствует о новом этапе в развитии СЗИ — автоматизации обеспечения информационной безопасности систем. Предлагается задачу автоматизации обеспечения ИБ корпоративных сетей решать комплексно с позиций биосистемной аналогии, а именно: аналогии в иерархической организации, иерархии механизмов защиты, структурированном полевом представлении информации и эволюционных процессах наследования, развития, адаптации и отбора.

Ключевые слова: система защиты информации, механизм защиты, средство интеллектуальной защиты, нейронная сеть, иммунная система.

К традиционным средствам обеспечения информационной безопасности (ИБ) корпоративных сетей относят антивирусы, детекторы уязвимостей, межсетевые экраны и детекторы вторжений. Функции подобных средств в достаточной мере специфичны и решают отдельные задачи обеспечения ИБ корпоративной сети и, как правило, могут быть преодолены, особенно при командной работе достаточно квалифицированной группы нарушителей. Подобные группы хорошо осведомлены о возможностях средств защиты, используемых в корпоративной сети, реагируют на регулярные обновления базы уязвимостей широко применяемого программного обеспечения (ПО), публикуемые в специальных изданиях и Интернете, оперативно обмениваются результатами зондирования защиты атакуемой корпоративной сети и гибко изменяют тактику осуществления вторжения [1].

Известны примеры применения *средств интеллектуальной защиты*, которые в меньшей степени уязвимы для тактических приемов нарушителей, поскольку работа подобных средств защиты основана на выявлении в анализируемой информации скрытых закономерностей — *интеллектуальном анализе* первичных (входных, „сырых“) данных. Достоинством интеллектуальных средств защиты является наличие элементов самоорганизации и эволюции, которые используются для *оперативных действий* в системах защиты информации (СЗИ) по классификации угроз и нейтрализации последствий вторжения [2].

Автоматизация обеспечения ИБ. Для уменьшения вероятности несанкционированных проникновений в корпоративную сеть в последнее время используются *средства автоматизации* управления СЗИ, к которым относятся корреляторы событий, системы обновлений, средства ЗА — аутентификации, авторизации и администрирования, а также и системы управления рисками. Корреляторы событий *по результатам анализа* системных журналов выделяют признаки атак, системы обновления автоматизируют процедуру оперативного устранения выявленных ошибок и поиска скрытых уязвимостей ПО. Средства ЗА позволяют управлять идентификационной информацией и допуском пользователей к информационным ресурсам, а системы управления рисками — моделировать и оценивать ожидаемый ущерб от атаки на корпоративную среду, что с успехом решается путем использования интеллектуальных средств нейронных сетей, нечеткой логики и генетических алгоритмов.

Отличительной чертой существующих систем защиты информации является наличие средств идентификации (задача классификации) угроз и оперативной реакции на несанкционированные проникновения в корпоративную сеть (которые соответствуют иммунному уровню защиты в биологических системах), а их общим недостатком — отсутствие уровня иерархии в системах защиты, обеспечивающего накопление и обобщение опыта взаимодействия корпоративной сети с внешней средой (соответствует рецепторному уровню защиты в биологических системах).

На наш взгляд, для успешного решения проблемы автоматизации обеспечения ИБ корпоративной сети необходим комплексный, основанный на биосистемной аналогии, подход и прежде всего иерархическая организация СЗИ с применением интеллектуальных средств как на иммунном (автоматическая идентификация угроз), так и на рецепторном уровне защиты (накопление опыта нейтрализации атак на корпоративную сеть).

Интеллектуальные средства анализа данных и самоорганизация в СЗИ. Основными интеллектуальными средствами для автоматизации обеспечения ИБ являются экспертные системы (ЭС), нейронные сети (НС), нечеткие логические системы (НЛ), гибридные решения, например в виде нейро-нечетких сетей, и эволюционные методы оптимизации параметров информационных полей интеллектуальных средств (см. таблицу).

Характеристика	Система			
	ЭС	НЛ	НС	ГА
Представление знания	о	•	◇	◆
Допущение неопределенности в данных	о	•	•	•
Допущение неточности данных	◇	•	•	•
Адаптируемость	◇	◆	•	•
Способность обучения	◇	◇	•	•
Способность объяснения результатов	•	•	◇	◆
Выявление знаний и анализ данных	◇	◆	•	о
Надежность в эксплуатации	◇	о	•	о
Уровень: ◇ — плохой, ◆ — скорее плохой, о — довольно хороший, • — хороший				

Сравнение возможностей перечисленных средств позволяет при решении задач интеллектуального анализа данных отдать предпочтение нейро-нечетким системам и генетическим алгоритмам (ГА) в качестве оптимизационной методики [3].

Для реализации механизма самоорганизации в иерархии системы защиты можно использовать *самообучающиеся* НС, которые способны решать задачу кластеризации входных векторов (задачу автоматического расширения классификации, например, угроз по вектору признаков атаки) при изменении поля угроз. Кластеризация и возможность обучения НС и нейро-нечетких систем позволяют реализовать эволюционные процессы адаптации и развития в системах автоматического обеспечения ИБ.

Эволюционные процессы наследования, адаптации и развития непосредственно связаны с формированием и пополнением базы знаний иерархии СЗИ, информация в которой представляется в виде информационных полей нейронных сетей, т.е. в процессе обучения и последующей эксплуатации системы защиты формируются и постоянно корректируются распределенные избыточные информационные поля иммунного и рецепторного уровней защиты, в которых происходит накопление опыта корпоративной сети.

Аналогия в эволюционных процессах. В биосистемах функции защиты реализуются через:

— *внутренние механизмы оперативной реакции* на угрозы и дестабилизирующие воздействия, распределенные по уровням *иерархии* СЗИ;

— *долговременные процессы* накопления жизненного опыта, носящие эволюционный характер.

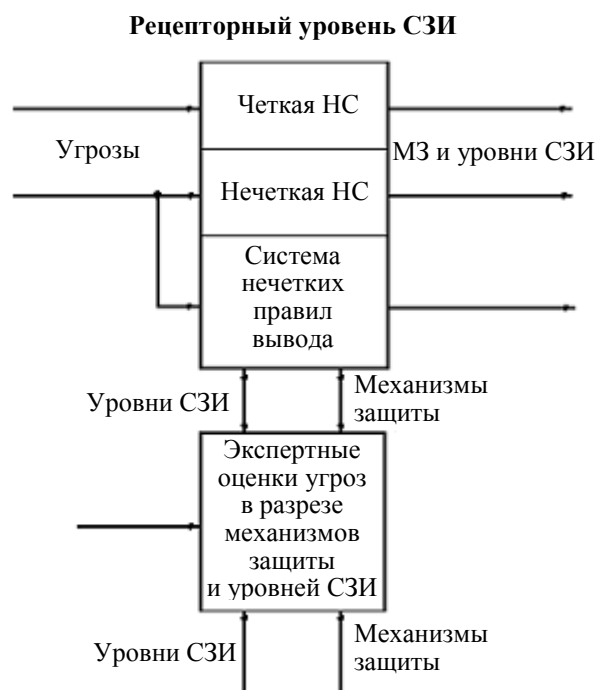
Аналогия телекоммуникационных систем с биосистемами в эволюционных процессах основана на реализации в корпоративных сетях механизмов наследования, развития, адаптации и отбора, свойственных биосистемам. Известные интеллектуальные СЗИ, как правило, реализуют только механизмы оперативной реакции и нейтрализации угроз, практически не уделяя внимания координирующей роли, которую играет нервная система — верхний уровень иерархии защиты биологических систем в реализации эволюционного процесса накопления жизненного опыта системы (*долговременного запоминания системной информации*). В биосистемах имеют место процессы постепенной адаптации иерархической системы защиты.

Таким образом, в корпоративной сети необходимо наличие иерархического уровня накопления жизненного опыта по нейтрализации атак, представленного в форме *структурированных информационно-полей*, удобных для наследования в последующих реализациях СЗИ.

Биосистемная аналогия в представлении информации в форме структурированного информационного поля НС позволяет решить комплекс задач повышения информационной безопасности корпоративной сети за счет распределенного избыточного представления информации, избыточного пространственного программирования и реализации информационных процессов. Биосистемная аналогия в *программировании* реализуется путем формирования и коррекции распределенных избыточных информационных полей НС, что обеспечивает

- универсальный характер описания интеллектуальных механизмов защиты (МЗ) корпоративной сети в виде информационных полей;
- автоматическую коррекцию информационных полей НС адаптивной системы защиты при изменении поля угроз или условий эксплуатации;
- наследование жизненного опыта по нейтрализации атак путем переноса (копирования) информационных полей системы в последующие модификации и родственные корпоративные сети.

Модель адаптивной защиты информации. По аналогии с биосистемой модель адаптивной системы защиты информации должна содержать взаимосвязанные иммунный и рецепторный (см. рисунок) уровни иерархической защиты.



На каждом из иерархических уровней решаются задачи *кластеризации* и *классификации* входных векторов: иммунный уровень исходя из нечеткого вектора признаков атак формирует нечеткий выходной вектор угроз ИБ корпоративной сети, а рецепторный уровень исходя из нечеткого вектора угроз — выходные векторы достоверности активности механизмов защиты и уровней СЗИ. В организации каждого из иерархических уровней защиты использована иерархия применяемых интеллектуальных средств. *Системы экспертных оценок*, обобщающие опыт специалистов конкретных прикладных областей (прежде всего, информационной безопасности), относятся к начальному уровню защиты.

Адаптируемые экспертные оценки служат исходным материалом, в соответствии с которым составляются *системы нечетких правил*

вывода, описывающие порядок формирования классификационных заключений исходя из нечетких входных посылок.

Системам нечетких правил вывода однозначно соответствуют структуры специализированных нейро-нечетких сетей, система межнейронных связей которых (образует информационное поле нейро-нечеткого классификатора) доступна для проведения анализа результатов обучения и эксплуатации данного уровня иерархии СЗИ.

Четкий классификатор в виде *самообучающейся нейронной сети*, который, как было отмечено выше, решая задачу кластеризации входных векторов, реализует важный механизм автоматизации СЗИ — самоорганизацию иерархии уровней защиты корпоративной сети. Механизм самоорганизации относится к завершающемуся уровню защиты, используемому при *автоматическом расширении* исходной классификации, если вновь поступивший входной вектор (например, нечеткий вектор признаков атаки) не может быть отнесен ни к одному из существующих кластеров (например, соответствующих известным угрозам), т.е. на иммунном уровне СЗИ выявляются факты проявления в корпоративной сети новой угрозы. Наличие новой угрозы приводит к соответствующей коррекции системы нечетких правил вывода и к изменению структуры нечеткой НС. Последующие *обучение* и *анализ структуры* нейро-нечеткой сети вызывают расширение и коррекцию адаптируемых экспертных оценок.

Увеличение размерности выходного вектора иммунного уровня (в рассматриваемом случае — нечеткого вектора угроз) вызывает изменения в следующем, рецепторном, иерархическом уровне СЗИ (во всех его интеллектуальных подуровнях, начиная от системы адаптируемых экспертных оценок и заканчивая уровнем четкого нейросетевого классификатора).

Результаты происшедших в корпоративной сети изменений отражаются совокупностью *показателей информационной защищенности*.

Показатели информационной защищенности, в том числе и рейтинговые оценки корпоративной сети, формируются *инструментальными средствами* исходя из значений адаптируемых экспертных оценок и распределения используемых механизмов защиты по иерархии корпоративной сети.

Отмечено хорошее соответствие вышеназванных показателей информационной защищенности корпоративной сети известным из литературы оценкам, например рейтинговым оценкам по классам защищенности автоматизированных систем РД ФСТЭК. Параметры могут применяться при оценке защищенности по заданному для анализа подмножеству поля угроз, в частности: нарушения целостности, конфиденциальности, доступности информации.

Заключение. В технических системах, в частности в корпоративных сетях, оправдывает себя использование специфики организации биосистем, которые характеризуются иерархией средств жизнеобеспечения, эволюционными процессами и встроенными механизмами адаптивной памяти, иммунитета, защиты информации и избыточности.

Адаптивные механизмы памяти, позволяющие накапливать жизненный опыт, связаны с распределенными избыточными информационными полями нейронных комплексов нервной системы. Реализация адаптивных механизмов памяти в распределенных информационных полях нейронных сетей является основной предпосылкой эволюции корпоративных и глобальных сетей, т.е. придания им атрибутов наследования, адаптации, развития и отбора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коржов В. Автоматизация безопасности // Computerworld Россия. 2004. № 17—18. С. 53.
2. Нестерук Г. Ф., Осовецкий Л. Г., Харченко А. Ф. Информационная безопасность и интеллектуальные средства защиты информационных ресурсов. СПб: Изд-во СПбГУЭФ, 2003.
3. Negnevitsky M. Artificial intelligence: a guide to intelligent systems. Addison-Wesley, 2002.

Андрей Вячеславович Суханов
Геннадий Филиппович Нестерук

- Сведения об авторах*
- ЗАО „ЭВРИКА“, Санкт-Петербург, E-mail: avsuhanov@eureca.ru
 - НФ ФГУП НИИ „ВЕКТОР“, Санкт-Петербург,
E-mail: nest_g_p@yahoo.com

Рекомендована кафедрой
безопасных информационных
технологий

Поступила в редакцию
13.05.08 г.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-50

Д. С. КАБАНОВ, Б. А. КРАШЕНИННИКОВ

УПРАВЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЕЙ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассмотрена задача оптимального управления траекторией движения автомобиля в горизонтальной плоскости. Решение сформировано с использованием алгоритма последовательной оптимизации по иерархии целевых функционалов. Представлены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: автомобиль, оптимизация управления, динамика.

Разработка алгоритмов управления динамикой автомобиля в процессе движения является важной научно-технической задачей, направленной на повышение безопасности. Ввиду сложности вычислений применить классические целевые функционалы в данном случае затруднительно. Использование критерия А. А. Красовского приводит к компромиссному результату по терминальным показателям точности [1]. При необходимости повышения требований к углу поворота траектории в конечный момент времени целесообразно использовать алгоритм последовательной оптимизации по иерархии критериев качества [2—4], который можно рассматривать как управление по критерию А. А. Красовского с заданным ограничением терминального типа.

Динамика автомобиля может быть описана следующей системой уравнений [5, 6]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{y} &= -\frac{k_{y1} + k_{y2}}{mv} v_y - \left(v + \frac{k_{y1} a - k_{y2} b}{mv} \right) \omega_z + \frac{k_{y1}}{m} \theta, \\ \dot{\omega}_z &= -\frac{k_{y1} a - k_{y2} b}{mabv} v_y - \frac{k_{y1} a^2 + k_{y2} b^2}{mabv} \omega_z + \frac{k_{y1}}{mb} \theta, \\ \dot{y} &= v_y + v_x \psi, \quad \dot{\psi} = \omega_z - v_x k_r, \quad \dot{x} = v_x, \quad \dot{\theta} = u_\theta, \quad \dot{t}_f = u_t, \quad \dot{v}_x = u_v, \\ k_r &= \sqrt{\frac{(x'^2 + y'^2)(x''^2 + y''^2) - (x'x'' + y'y'')^2}{(x'^2 + y'^2)^3}}, \\ y' &= \frac{y_1 - y_0}{\Delta t}; \quad y'' = \frac{y_2 - 2y_1 + y_0}{(\Delta t)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где v_x и v_y — продольная и боковая составляющие скорости, $v^2 = v_x^2 + v_y^2$; x и y — продольная и боковая дальность; ω_z — проекция абсолютной угловой скорости на вертикальную

ось (угловая скорость рыскания); m — масса автомобиля; ψ — угол поворота, a и b — расстояние от центра тяжести до переднего и заднего мостов; k_{y_1} и k_{y_2} — коэффициенты сопротивления уводу шин передней и задней осей; k_r — кривизна средней линии траектории, θ — угол поворота передних колес; u_θ — управление углом поворота колес; u_t — управление интервалом оптимизации, u_v — управление скоростью; t_f — момент окончания процесса оптимизации.

В соответствии с алгоритмом последовательной оптимизации рассмотрим иерархию из двух целевых функционалов (критериев качества) в виде

$$I_1 = (\psi_f - \psi_g)^2,$$

$$I_2 = V_g(x, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} Q(x, t) dt + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (u^T k^{-2} u + u_0^T k^{-2} u_0) dt,$$

$$V_g = \frac{1}{2} \rho_1 (x_f - x_g)^2 + \frac{1}{2} \rho_2 (y_f - y_g)^2,$$

$$u = (u_\theta, u_t, u_v)^T, \quad k^2 = \text{diag} (k_\theta^2, k_t^2, k_v^2),$$

$$Q = Q_S = \begin{cases} \frac{1}{2} \Delta^T \beta \Delta, & |\Delta x| < 4 \text{ и } |\Delta y| < 1, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$\Delta = (\Delta x, \Delta y)^T, \quad \beta = \text{diag} (\beta_1, \beta_2).$$

Здесь x_g, y_g — заданное значение переменных x, y в момент времени t_f ; $x_f = x(t_f)$, $y_f = y(t_f)$; $\Delta x = x - x_c$, $\Delta y = y - y_c$, x_c, y_c — координаты центра масс другого автомобиля; $k_\theta^2, k_t^2, k_v^2, \rho_1, \rho_2$ — заданные коэффициенты; Q_S — штрафная функция с заданными параметрами β_1 и β_2 , соответствующими штрафным координатам x и y (при попадании координат автомобиля x и y в запретную область движения: $x_c \pm 4, y_c \pm 1$) и характеризующими строгость границ запретной зоны движения в виде прямоугольника, определяемой движением другого автомобиля.

В качестве управления рассматривается сумма значений управлений углом поворота передних колес u_1 и u_2 , минимизирующих критерии I_1 и I_2 соответственно $u_\theta = u_1 + u_2$, а также управления величиной интервала оптимизации t_f и продольной составляющей скорости v_x .

Гамильтониан задачи имеет вид

$$H = p_v \dot{v}_y + p_\omega \dot{\omega}_z + p_y \dot{y} + p_\psi \dot{\psi} + p_x \dot{x} + p_\theta u_\theta + p_t u_t + p_v u_v + Q + \frac{1}{2} (u^T k^{-2} u + u_0^T k^{-2} u_0).$$

Согласно алгоритму последовательной оптимизации [2], управление формируется в виде

$$u_1 = \frac{\theta - \theta_1}{\Delta t}, \quad u_2 = -k_\theta^2 p_\theta,$$

$$u_t = -k_t^2 p_t, \quad p_t = -H_m(x, p, t_f); \quad H_m = H|_{u=u_0=0},$$

$$u_v = -k_v^2 p_v,$$

где для вычисления u_1 используется итерационная процедура подстройки свободного параметра θ прогнозирующей модели (системы (1) при $\dot{\theta} = 0$, $\dot{i}_f = 0$, $\dot{v}_x = 0$) из условия минимума критерия I_1 .

Необходимые для вычисления управлений сопряженные переменные определялись из решения уравнений подстроенной таким образом прогнозирующей модели и уравнений

$$\begin{aligned} \dot{p}_v &= -\frac{\partial H}{\partial v_y} = p_v \left[\frac{k_{y_1} + k_{y_2}}{m} \frac{v - v_y (v_y/v)}{v^2} + \omega_z \left(\frac{v_y}{v} - \frac{k_{y_1} a - k_{y_2} b}{mv^3} v_y \right) \right] + \\ &+ p_\omega \left[\frac{k_{y_1} a - k_{y_2} b}{mab} \frac{v - (v_y^2/v)}{v^2} - \omega_z \frac{k_{y_1} a^2 + k_{y_2} b^2}{mab} \frac{v_y}{v^3} \right] - p_y, \\ \dot{p}_\omega &= -\frac{\partial H}{\partial \omega_z} = p_{v_y} \left(v + \frac{k_{y_1} a - k_{y_2} b}{mv} \right) + p_\omega \frac{k_{y_1} a^2 + k_{y_2} b^2}{mabv} - p_\psi, \\ \dot{p}_y &= -\frac{\partial H}{\partial y} = -\frac{\partial Q_S}{\partial y}, \quad \dot{p}_\psi = -\frac{\partial H}{\partial \Psi} = -p_y v_x, \quad \dot{p}_x = -\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\partial Q_S}{\partial x}, \\ \dot{p}_\theta &= -\frac{\partial H}{\partial \theta} = -p_{v_y} \frac{k_{y_1}}{m} - p_\omega \frac{k_{y_1}}{mb}, \\ P_{v_x} &= -\frac{\partial H}{\partial v_x} = -p_{v_y} \left[\frac{k_{y_1} + k_{y_2}}{mv^3} v_x v_y + \omega_z \left(\frac{v_x}{v} - \frac{k_{y_1} a - k_{y_2} b}{mv^3} v_x \right) \right] - \\ &- p_\omega \left[\frac{k_{y_1} a - k_{y_2} b}{mabv^3} v_x v_y + \frac{k_{y_1} a^2 + k_{y_2} b^2}{mabv^3} v_x \omega_z \right] - p_y \Psi + p_\psi k_r - p_x, \\ p_y(t_f) &= \rho_2 (y_f - y_g), \quad p_x(t_f) = \rho_1 (x_f - x_g). \end{aligned}$$

Расчеты выполнены для следующих параметров $\rho_1 = 0,01$; $\rho_2 = 0,8$; $k_\theta^2 = 0,0001$; $Q_S = 0$; $k_v^2 = 0,003$; $k_t^2 = 0,1$; $t_f(t_0) = 15$ с; $v_x(t_0) = 16,7$ м/с; $x_c(t_0) = 65$ м; $\dot{x}_c(t) = 11,13$ м/с = const; $y_c(t) = 2$ м = const; $x_g = 250$ м; $y_g = 1$ м. При значениях $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = 0$ первый автомобиль производит маневр, пропуская вперед себя второй автомобиль ($y(t_g) = 1,002$ м). При этом скорость первого автомобиля снижается до 14,26 м/с.

При задании начального значения координаты второго автомобиля $x_c(t_0) = 45$ м при тех же параметрах и наличии функции штрафа с коэффициентами $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = 6$ происходит объезд запретной зоны путем маневра с увеличением скорости первого автомобиля.

Исследование показало, что использование алгоритма последовательной оптимизации позволяет решить задачу объезда препятствия в виде другого движущегося автомобиля, что повышает безопасность движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987.
2. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб: Изд-во СПбГУ, 1997.
3. Кабанов С. А., Крашенинников Б. А., Якушев Б. Э. Оптимальное управление траекторией движения автомобиля с самоорганизацией модели // Мат. Всерос. науч.-технич. конф. „Моделирование и обработка информации в технических системах“. Рыбинск: РГТА, 2004. С. 72—75.

4. Кабанов Д. С., Крашенинников Б. А. Оптимальное управление траекторией движения автомобиля с объездом препятствий // Тез. докл. 10-й междунар. конф. „Системный анализ, управление и навигация“. М.: Изд-во МАИ, 2005. С. 53.
5. Динамика системы „дорога—шина—автомобиль—водитель“ / Под ред. А. А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 1976.
6. Литвинов Л. С., Фаробин Я. Е. Автомобиль: теория эксплуатационных свойств. М.: Машиностроение, 1980.

Сведения об авторах**Дмитрий Сергеевич Кабанов**— Московский авиационный институт (государственный технический университет)
E-mail: kabanov@sk11424.spb.edu**Борис Александрович Крашенинников**— Балтийский государственный технический университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург,
E-mail: kabanov@sk11424.spb.eduРекомендована кафедрой
системы обработки информации
и управленияПоступила в редакцию
07.12.07 г.

А. В. ТИМОФЕЕВ, О. А. ДЕРИН

АНАЛИЗ СЛОЖНЫХ МУЛЬТИИЗОБРАЖЕНИЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Рассматривается метод синтеза систем распознавания мультиизображений в режиме реального времени с помощью нейросетевых технологий как наиболее ориентированных на анализ большого объема изображений и высокую способность адаптации к фоновым и мешающим отражениям, к недетерминированности обнаруживаемых объектов.

Ключевые слова: распознавание изображений, нейронные сети, режим реального времени.

Введение. Задача автоматического распознавания сложных стерео- и мультиизображений в режиме реального времени в настоящее время актуальна в медицине, робототехнике, мультимедиа-приложениях и системах обеспечения безопасности. Например, автоматизированные системы анализа мультиизображений позволяют сократить усилия персонала служб безопасности, затрачиваемые на контроль всей охраняемой территории, находящейся в поле зрения сотен телекамер видеонаблюдения, и сконцентрировать их на наиболее уязвимых участках и подозрительных объектах. Рассматриваемые в настоящей статье методы позволяют генерировать нейросетевые решения, анализирующие окружающее пространство, выделяющие и классифицирующие окружающие объекты.

Анализ мультиизображений (изображений с высоким разрешением разнесенных во времени и/или пространстве) позволяет определять статические и динамические параметры объектов (размеры, координаты, скорость, траектории движения) и надежно выделять подозрительные объекты в „сцене“.

Выделение, сопровождение и классификация недетерминированных объектов в реальной обстановке с перекрытием движущихся объектов „препятствиями“ в условиях изменяющегося фона и условий освещенности при наличии помех является актуальной задачей [1, 2]. Известные ее решения основаны алгоритмических методах [1—3] и требуют знания конкретных параметров обнаруживаемых объектов. Нейросетевые решения этой задачи требуют структурирования слоев нейросети и упорядочения процесса обучения и самоорганизации [4, 5]. Однако правила такого структурирования являются эвристическими (см., например, правила, описанные в [5]), т.е. они зависят от интуиции исследователя и не гарантируют положительного результата.

Одним из наиболее ориентированных на распознавание образов и анализ изображений в реальном масштабе времени классом нейросетей являются многослойные сети прямого пространства (МСПР) благодаря высокой степени распараллеливания вычислений в них и сходству их архитектуры с конвейерными графическими процессорами. МСПР имеют широкие функциональные возможности за счет разделения процесса обработки на отдельные

этапы, выполняемые поочередно нейронами их слоев. Однако универсализм этих сетей чрезвычайно усложняет аппаратную реализацию и обучение системы и затрудняет ее реальное применение.

В настоящей статье рассмотрен метод снижения сложности МСПР путем отказа от проектирования нейросети как „черного ящика“ за счет структурирования слоев нейросети и упорядочения процесса обучения [2, 5]. Предложенный подход базируется на разработанной ранее концепции иерархических нейросетей [4, 6] и включает в себя их структурирование на основе диаграмм моделирования (ДМ) и предобучения отдельных нейронных подсетей.

Основные принципы декомпозиции глобальной нейросети. Каждый слой МСПР состоит из нейронов одного типа. Однако скрытые слои состоят из нелинейных нейронов, а выходной слой — из линейных, что позволяет обучать их, используя алгоритм обратного распространения ошибки (back propagation) [5]. Особенностью алгоритма обучения является то, что коррекция весовых коэффициентов нейронов проводится послойно — от выходного слоя к входному. В результате этого понятными для человека (исследователя) являются только входные и выходные сигналы МСПР, в то время как сигналы, которые вычисляются в скрытых слоях, не могут быть однозначно истолкованы с точки зрения выполняемой задачи и являются для человека в полном смысле скрытыми, т.е. скрытыми являются правила (нейрознания), возникшие в ходе обучения скрытых слоев. Непонимание таких правил ведет к избыточности как количества нейронов, необходимых для реализации каждого скрытого слоя, так и к сложности обучения МСПР. Часто это связано с тем, что для обеспечения корректности обобщения нейросети необходимо значительно увеличивать объем (мощность) обучающей выборки. При этом и количество нейронов в каждом слое, и объем обучающей выборки являются эвристическими параметрами, достаточно произвольно назначаемыми каждым исследователем в силу своего опыта и интуиции. Это обстоятельство превращает разработку нейросетевых приложений в своеобразное искусство [5], а также приводит к избыточности аппаратных и временных ресурсов при синтезе.

Эффективным средством преодоления этих проблем является отказ от проектирования нейросети как „черного ящика“ за счет метода декомпозиции глобальной нейросети на иерархическую систему локальных нейросетей (подсетей). Этот метод формализует процедуру снижения сложности нейросети, существенно сокращает число эвристических правил и совместим с существующими технологиями синтеза систем (в том числе не нейросетевых) [6]. Он реализуется с помощью современных языков моделирования (UML или ему подобных: IDEF, SADT, ARIS, ABC, ФСА, BPEL, BPMN), применяемых в средах проектирования (СП) для описания модели создаваемого устройства. СП (например, Rational Rose) визуализируют синтезируемую систему в виде диаграмм моделирования, описывающих с высоким уровнем абстракции основные этапы обработки сигналов. Авторами разработана формальная методика использования этих ДМ при разбиении МСПР на структуру подсетей (названная „предобучением“), за счет чего формализуются блоки (подсистемы) и связи между ними в виде обобщенных сигналов (например, уровень ложных тревог), описание которых понятно исследователю. Благодаря этому МСПР разбивается разработчиком на иерархию подсистем на основе имеющейся у него информации об объекте и условиях распознавания. При стандартном методе обучения задача декомпозиции на отдельные нейроны перекладывается на формальные алгоритмы обучения, нейросеть должна в ходе обучения извлечь информацию об объекте и условиях распознавания („изобрести велосипед“) из обучающей выборки. Очевидно, что для достаточно сложной задачи анализа изображений такой подход неприемлем — либо полученное обобщение будет крайне поверхностным, либо процесс обучения недопустимо затянется.

Как видно из рис. 1, в результате декомпозиции глобальная нейросеть разбивается на локальные подсети, обменивающиеся друг с другом обобщенными сигналами, заданными ДМ.

Описание этих обобщенных сигналов понятно исследователю, т.е. имеет физический смысл в контексте выполняемой задачи, и для них можно задать желаемый отклик исходя из конкретной ДМ. Следовательно, нейроны, формирующие эти обобщенные сигналы, больше не являются скрытыми (каковыми они были до декомпозиции) и могут рассматриваться как выходной слой нейронов подсети. В результате предложенной декомпозиции локальные подсети могут рассматриваться не только как часть глобальной нейросети, но и как независимые МСПР. Поскольку каждая из локальных подсетей формирует выходной сигнал, для которого известен желаемый отклик, она может обучаться отдельно и независимо от системы в целом, что резко ускоряет процесс обучения.

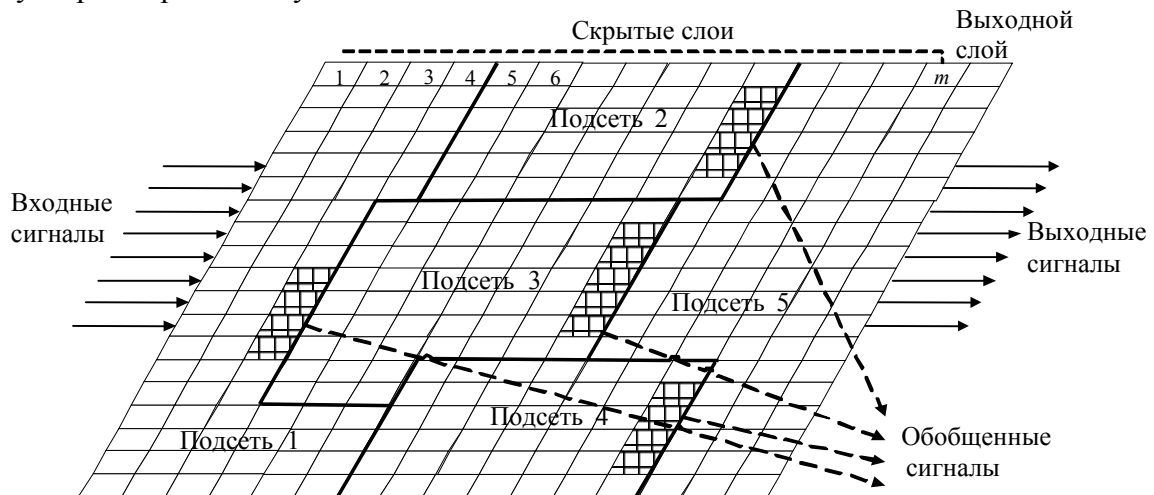


Рис. 1

При этом часть нейронов, формирующих выходные сигналы локальных подсетей, становятся выходными (на рис. 1 они заштрихованы), остальные остаются скрытыми. Основное различие скрытых и выходных нейронов в том, что работа скрытых нейронов в общем случае не может быть сопоставлена с какими-либо физическими закономерностями решаемой задачи, т.е. их выходные сигналы трудноинтерпретируемы, т.е. не имеют ясного физического смысла в контексте задачи распознавания. В то же время сигналы выходных нейронов являются обобщенными сигналами диаграммы, поэтому исследователь может не только понимать, но и назначать их.

Трехмерная структура иерархических нейросетей. Введем понятие когнитивности как характеристики нейронов, определяющей уровень доступности их выходных сигналов для исследования и понимания и, следовательно, возможности формирования для них желаемого отклика. До введения этого понятия МСПР можно было рассматривать как двумерную одноуровневую систему. Нейроны организованы в последовательные слои, каждый последующий слой параллельно работающим нейронам, более удаленный от входных сигналов и первого слоя, выполняет очередной этап обработки и его выходные сигналы обладают все большей и большей степенью обобщения входных сигналов.

На основе понятия когнитивности можно ввести разбиение МСПР на отдельные уровни, где каждый нейрон принадлежит не только определенному слою, но и определенному уровню когнитивности. Все скрытые нейроны обладают минимальной когнитивностью и принадлежат скрытому уровню. Все выходные нейроны обладают максимальной когнитивностью и принадлежат верхнему уровню МСПР, называемому ее интерфейсом. Особенностью этого интерфейса является возможность исследования и понимания человеком всех сигналов, которыми обмениваются нейроны, принадлежащие данному слою. За счет предобучения интерфейс МСПР является однозначным отображением диаграммы на нейросетевой контекст и поэтому может быть формализован.

Приведем основные характеристики интерфейса МСПР: интерфейс формально связан взаимно однозначным соответствием с диаграммой модели на языке моделирования; его сигналы являются обобщенными, они исследуемы и понятны исследователю, имеют физический смысл в контексте решаемой задачи; желаемый отклик для этих сигналов известен или может быть задан исходя из диаграммы. Важно отметить, что разработчик может произвольно изменять интерфейс с целью варьирования характеристик сети без переобучения локальных подсетей (полного или частичного), в том числе с помощью введения глобальных обратных связей. Сигналы интерфейса могут использоваться для анализа адекватности обобщения нейросети и диагностики ее работоспособности.

Благодаря формальной методике предобучения резко ускоряется создание МСПР за счет декомпозиции на базе ДМ, созданных специализированными СП, независимого обучения каждой локальной подсети и анализа адекватности МСПР с помощью обобщенных сигналов ее интерфейса.

Примеры практического внедрения метода. Одна из важнейших практических реализаций предлагаемого метода представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из сенсоров — телекамер, радио и ИК-средств наблюдения, расположенных в зонах контроля, и нейросетевых вычислителей, обрабатывающих сигналы сенсоров, обнаруживающих и оценивающих уровень оценки информативности наблюдаемых объектов для решения поставленной целевой задачи. Например, для систем безопасности информативной является оценка уровня террористической угрозы наблюдаемых объектов. При превышении порогового уровня такой оценки информация и изображение подозрительного объекта передаются оператору, который принимает решение — игнорировать оценку или принять адекватные меры (закрыть проезд, вызвать группу быстрого реагирования и т.п.). В автоматическом режиме комплекс может принять необходимые меры самостоятельно.

В последнее время разработаны, изготовлены и прошли испытания для различных приложений следующие комплексы.

1. Программно-аппаратный комплекс трехмерного зрения, обеспечивающий автоматическое обнаружение окружающих предметов и обход препятствий подвижной платформой.

Этот комплекс анализирует серию изображений, разлагает 3D-сцену на объекты за счет стереозрения (рис. 2), отделяет движущиеся объекты от неподвижных, с помощью движущихся объектов ориентируется в пространстве, затем сопровождает и классифицирует неподвижные объекты. При движении платформы, на которой установлена данная система, за счет явления зрительного параллакса определяются расстояние до окружающих неподвижных объектов и их размеры, строится (планируется) траектория обхода препятствий с целью достижения заданной точки. При этом система может преследовать классифицированный движущийся объект (траектория „погони“). Пример результата обработки входной информации приведен на рис. 2. Анализ проведен по группе мультиизображений, снятых камерой при прохождении платформой расстояния в 2 метра.

2. Программно-аппаратный комплекс автоматического обнаружения подозрительных лиц и предметов в целях антитеррористической защиты людей в публичных местах.

Этот комплекс предназначен для обнаружения подозрительных лиц и предметов на охраняемой территории, оборудованной многокамерной системой видеонаблюдения, и привлечения к ним внимания оператора, контроля за его действиями и т.п. Объекты, выделенные на изображениях всех телекамер, ранжируются по вероятности угрозы (ВУ), вычисленной логико-аксиоматическими алгоритмами исходя из размеров, положения, траектории движения этих объектов. Объекты, имеющие наиболее высокие показатели ВУ, поочередно выдаются на экран рабочего места оператора. Результат обработки и анализа мультиизображений представлен на рис. 3.

3. Программно-аппаратный комплекс контроля подъездных путей стратегических объектов.

Этот комплекс анализирует движение транспортных средств на подъездном пути по данным видеокамер с двух или нескольких точек обзора, ИК и радиосредств. По этим данным автоматически обнаруживаются и классифицируются объекты на подъездном пути. Путем сравнения результатов анализа с базой знаний системы и производится их разделение на классы: „свой“, „чужой“ или „неизвестный“. По результатам распознавания принимается решение об открытии или закрытии проезда с помощью шлагбаума и блокиратора, а также информируется оператор контрольно-пропускного поста.

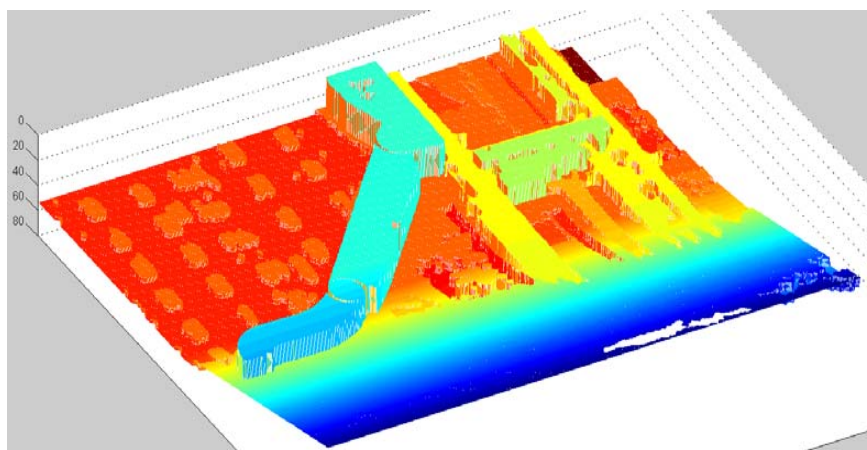


Рис. 2



Рис. 3

В статье рассмотрены основные положения синтеза систем распознавания мультиизображений в режиме реального времени с помощью применения нейросетевых технологий, предложен метод декомпозиции глобальной нейросети на локальные подсети на основе

использования диаграмм моделирования и процедур предобучения. Приведены результаты практического применения указанного метода.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №06-08-01612а и инновационным НИОКР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Perry S. W., Wong H.-S., Guan L. Adaptive image processing a computational intelligence perspective // SPIE Press Book. 2003. 270 p.
2. Seul M., O'Gorman L., Sammon M. J. Practical algorithms for image analysis. Description, examples and code. Cambridge University Press, 2000. 295 p.
3. Bow S.-T. Pattern recognition and image preprocessing. NY: M. Dekker, 2002. 698 с.
4. Timofeev A. V., Andreev V., Gulenko I. E., Derin O. A., Litvinov M. V. Design and implementation of multi-agent man-machine interface on the base of virtual reality models // 9th Int. Conf. SPEECOM'2004. St.Petersburg, 2004. P. 670—675.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / Пер. с англ. М.: Издательский дом „Вильямс“, 2006. 1104 с.
6. Timofeev A. V. Parallel Structures and Self-Organization of Heterogeneous Polynomial Neural Networks for Pattern Recognition and Diagnostics of States // Pattern Recognition and Image Analysis. 2007. Vol. 17, N 1. P. 163—169.

Сведения об авторах

Адилъ Васильевич Тимофеев

— Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,
E-mail: tav@iiias.spb.su

Олег Александрович Дерин

— Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,
E-mail: derinoa@mail.ru

Рекомендована институтом

Поступила в редакцию
06.05.08 г.

УДК 681.34

И. В. КОВАЛЕВ, О. И. ЗАВЬЯЛОВА, А. Н. ЛАЙКОВ

ФОРМИРОВАНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Предлагается применять мультиверсионную методологию реализации программного обеспечения с целью повышения отказоустойчивости систем управления. Представлен метод многоатрибутивного принятия решений при формировании избыточного программного обеспечения.

Ключевые слова: мультиверсионное программное обеспечение, избыточность, отказоустойчивость, системы управления, многокритериальное принятие решений.

Введение. Развитие современных систем управления характеризуется повышением сложности входящего в их состав программного обеспечения, которое реализует функции обработки данных и выдачи соответствующих управляющих воздействий объектам управления. Связано это с тем, что объекты и сами системы управления могут быть распределены в пространстве, обладать избыточностью основных элементов и подсистем, в процессе управления могут использоваться сложные расчеты данных большого объема.

Повышение уровня сложности программных средств систем управления требует увеличения количества контролируемых параметров (атрибутов), характеризующих процессы функционирования.

Системы управления в таких критичных областях, как авиационная, ракетно-космическая техника, атомная промышленность, химическое производство, сложные системы электроснабжения, должны обладать высоким уровнем надежности.

Исследования последних лет показывают, что функционирование систем управления существенно зависит от надежности их программного обеспечения [1]. Применяя метод избыточного проектирования и реализации программных средств, можно не только обеспечить заданный уровень надежности, но и гарантировать отказоустойчивость систем данного класса.

Одним из перспективных подходов к созданию отказоустойчивого программного обеспечения является мультиверсионное программирование [2]. Предполагается, что в пакет программ включается несколько компонент, дублирующих друг друга по своему целевому назначению. Это позволяет предупредить случайные сбои, причем функционирование программного обеспечения застраховано и от сбоев, вызванных ошибками, допущенными при проектировании и разработке.

Основное преимущество мультиверсионного программного обеспечения состоит в том, что отказ системы может произойти только в том случае, если откажет существенное число программных модулей. Вероятность отказа системы обратно пропорциональна числу ее модулей. Следовательно, чем больше модулей, тем выше вероятность корректного функционирования мультиверсионного программного обеспечения и всей системы управления в целом.

Однако повышение надежности программного обеспечения с использованием избыточности требует дополнительных ресурсов. Поэтому основной вопрос, встающий перед проектировщиком, заключается в минимизации затрат и использовании ресурсов при введении избыточных модулей.

Проблема выбора компонент программного обеспечения системы из множества вариантов, как правило, оказывается многоатрибутивной, так как наряду с повышением надежности работы системы необходимо решать ряд других задач, таких как снижение финансовых затрат на разработку, внедрение и модификацию системы, повышение быстродействия процессора.

Эта задача может быть решена путем принятия решений при многих критериях, ориентирующихся на задачи с дискретным пространством решений. К настоящему времени разработано большое число моделей и методов многоатрибутивного принятия решений, учитывающих различные уровни информации о предпочтениях эксперта. Эффективность работы этих методов подтверждается многолетним опытом их применения в различных областях, где встает задача выбора лучшего варианта из ряда предложенных.

Метод многоатрибутивного принятия решений. Формирование программного обеспечения систем управления, состоящего из избыточного набора программных модулей, позволяет выделить ряд характеристик, или атрибутов, этих модулей для возможности оптимального выбора.

Для решения задачи формирования оптимального состава избыточного программного обеспечения предлагается многоатрибутивный метод, основанный на вычислении максимального приближения к идеальному решению.

Предлагаемый метод учитывает наилучший и наихудший варианты решения. С помощью метода можно оценить m альтернатив, представляющих собой способы формирования избыточного программного обеспечения, каждому из которых соответствует n атрибутов, при этом выполняется следующая последовательность шагов.

Шаг 1. Нормализация матрицы решения. На этом шаге атрибуты, имеющие различные измерения, преобразуются в безразмерные атрибуты, что позволит в дальнейшем их сравнивать. Элемент r_{ij} нормализованной матрицы R вычисляется как

$$r_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2},$$

где x_{ij} — элементы исходной матрицы решений.

Шаг 2. Построение взвешенной нормализованной матрицы решения. Для нормализованной матрицы решения задаются весовые параметры (веса) w_i , $i = \overline{1, n}$, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, после чего каждый столбец матрицы R умножается на соответствующий весовой коэффициент.

Шаг 3. Определение идеального и идеального негативного решения. Определим две искусственно сформированные альтернативы A^* и A^- , являющиеся наиболее предпочтительной (идеальное решение) и наименее предпочтительной (идеальное негативное) альтернативами соответственно:

$$A^* = \{(\max_i v_{ij} | j \in J), (\min_i v_{ij} | j \in J) | i = 1, 2, \dots, m\} = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_j^*, \dots, v_n^*\},$$

$$A^- = \{(\min_i v_{ij} | j \in J), (\max_i v_{ij} | j \in J) | i = 1, 2, \dots, m\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\},$$

где $J = \{j = 1, 2, \dots, n | j \text{ — атрибуты, связанные с критерием „выгода“}\}$; $J = \{j = 1, 2, \dots, n | j \text{ — атрибуты, связанные с критерием „стоимость“}\}$.

Шаг 4. Вычисление степени удаленности. „Расстояние“ каждой альтернативы от наилучшего и наихудшего варианта вычисляется как

$$D_{i^*} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}, \quad i = \overline{1, m},$$

$$D_{i^-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Шаг 5. Вычисление относительной близости альтернативы A_i к A^* может быть осуществлено следующим образом:

$$C_{i^*} = D_{i^-} / (D_{i^*} + D_{i^-}), \quad 0 < C_{i^*} < 1, \quad i = \overline{1, m}.$$

Очевидно, что $C_{i^*} = 1$, если $A_i = A^*$, и $C_{i^*} = 0$, если $A_i = A^-$. Альтернатива A_i тем ближе к A^* , чем C_{i^*} ближе к единице.

Шаг 6. Ранжирование порядка предпочтений. Набор вариантов A_i теперь может быть ранжирован в соответствии со значениями C_{i^*} . Наилучшему решению будет соответствовать наибольшее значение C_{i^*} .

Выбор весовых коэффициентов при многоатрибутивном принятии решений. При выборе оптимального состава избыточного программного обеспечения, согласно предлагаемому методу многоатрибутивного принятия решений, требуется назначать весовые коэффициенты атрибутам, соответствующие их важности. Для определения веса возможен подход, при котором ранжируются атрибуты по важности, а затем ранги преобразуются в весовые коэффициенты [3]:

$$\tilde{w}_i = 2^{1-s_i} s_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

$$\tilde{w}_i = 1 - (s_i - 1) / n, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где $i = \overline{1, n}$ — номер атрибута; $s_i = \overline{1, n}$ — ранг i -го атрибута.

Согласно выражению (1) задается наибольшая значимость атрибутов высокого ранга ($s_i = 1, 2$) (рис. 1). Формула (2) задает линейное снижение весовых коэффициентов (рис. 2).

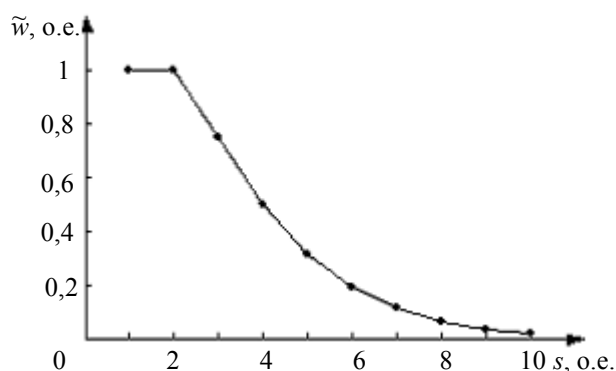


Рис. 1

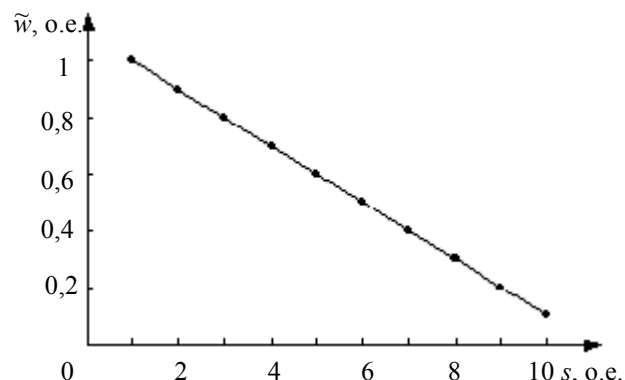


Рис. 2

Для перехода к w_i , удовлетворяющим условию нормировки $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, необходимо следующее преобразование:

$$w_i = \tilde{w}_i / \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

Заключение. Большое количество модулей избыточного программного обеспечения систем управления, а также ограничения по стоимости и другим параметрам ставят перед проектировщиком задачу принятия решений по формированию программного обеспечения с учетом ряда критериев. Выбрать лучший вариант программного обеспечения из всего множества возможных реализаций позволяют методы многоатрибутивного принятия решений.

Предложенный в настоящей статье многоатрибутивный метод был реализован в рамках системы поддержки принятия решений, которая использовалась при формировании структурно сложного программного обеспечения космического комплекса связи „Гонец-М“, при создании информационно-управляющего блока мобильного измерительного комплекса диагностики и мониторинга ядерных объектов и сооружений на Горно-химическом комбинате (Железнодорожск) [4, 5], а также модернизации информационно-управляющей системы Отделения федерального казначейства по Красноярску [6, 7].

Полученный уровень отказоустойчивости систем управления свидетельствует о целесообразности применения метода избыточности программного обеспечения при разработке и реализации критичных по надежности систем в различных областях науки и производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поздняков Д. А., Титовский И. С. Краткий обзор методов повышения качества программных средств систем управления // Вестник НИИ СУВПТ. Вып. 12. Красноярск: НИИ СУВПТ, 2003. С. 57—60.
2. Аниконов А. В., Слободин М. Ю., Царев Р. Ю. Программно-аппаратное обеспечение отказо- и катастрофоустойчивых систем управления и обработки информации. М.: Макс-пресс, 2006.
3. Брахман Т. Р. Многокритериальность и выбор в технике. М.: Радио и связь, 1984.
4. Царев Р. Ю. Система поддержки принятия решений при формировании мультиверсионного программного обеспечения // Программные продукты и системы. 2007. № 1. С. 57—59.
5. Программная система „MultiForm v1.0“ (Система многоатрибутивного формирования мультиверсионных программных средств) / И. В. Ковалев, Р. Ю. Царев, М. Ю. Слободин, А. А. Усольцев. М.: ВНИИЦ, 2004. № 50200400275.
6. Ковалев И. В., Семенько Т. И., Царев Р. Ю. Методология оценки и повышения надежности программно-информационных технологий и структур. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005.

7. Программная система «NV-DMSS v1.0» (Система поддержки принятия решений при создании мультиверсионной структуры программного обеспечения) / *И. В. Ковалев, Р. Ю. Царев, Т. И. Семенько, С. Н. Ежеманская*. М.: ВНИИЦ, 2004. №50200401373.

Сведения об авторах

- Игорь Владимирович Ковалев*** — Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнева, Красноярск, E-mail: kovalev.fsu@mail.ru
- Ольга Игоревна Завьялова*** — Сибирский федеральный университет, Красноярск, E-mail: zav.olga888@mail.ru
- Алексей Николаевич Лайков*** — Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнева, Красноярск

Рекомендована кафедрой
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.317

А. А. УСОЛЬЦЕВ, Д. В. ЛУКИЧЁВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО СПРАВОЧНЫМ ДАННЫМ

Предложена методика определения параметров схемы замещения асинхронного короткозамкнутого двигателя, обеспечивающая соответствие расчетных координат механической характеристики справочным данным.

Ключевые слова: модель асинхронного короткозамкнутого двигателя, методика определения, параметры модели.

Стремительное развитие вычислительной техники в последние десятилетия привело к тому, что математическое моделирование электромагнитных и электромеханических процессов с помощью различных программных средств обрело статус инженерной методики. В то же время в справочных изданиях отсутствуют данные, необходимые для построения моделей электрических машин, так как эта литература ориентирована на совершенно иные задачи и методы решения. Особенно актуальна эта проблема для асинхронных машин, поскольку именно они в последнее время вытесняют другие типы двигателей из традиционных для них областей приводов среднего и высокого качества, разработка которых без моделирования процессов принципиально невозможна. При этом в технической литературе параметры асинхронных двигателей (АД) встречаются либо в виде совокупности данных (без указания метода их определения) для ограниченного списка машин [1], либо в виде не всегда обоснованных, а потому приводящих к существенным погрешностям, формул для вычисления искомых параметров [2]. Кроме того, справочные данные часто противоречивы, т.е. приводимые в них электрические, механические и энергетические параметры не всегда согласуются друг с другом, поэтому расчет с использованием смешанного исходного набора также приводит к недостоверным результатам. Целью настоящей статьи является разработка методики определения параметров схемы замещения АД, обеспечивающей сходимость результатов расчета к справочным параметрам механической характеристики (МХ).

В справочной литературе по асинхронным двигателям всегда приводятся значения следующих параметров, соответствующие номинальному режиму работы:

- мощность $P_{\text{ном}}$, Вт;
- линейное или фазное напряжение питания $U_{\text{ном}}$, В;
- фазный ток $I_{\text{ном}}$, А;
- скорость вращения n , об/мин или скольжение $s_{\text{ном}}$;
- коэффициент мощности $\cos\varphi$;
- кратность максимального момента $\lambda = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$.

По этим данным с приемлемой для инженерной практики точностью можно определить параметры схемы замещения (рис. 1, а).

Практика моделирования электромагнитных и электромеханических процессов в системах привода с АД показывает, что параметры схемы замещения, приведенные в справочных данных [1, 2], не позволяют получить МХ, проходящей через точки, определяемые этими данными. В то же время для пользователя АД она представляет основной интерес, поскольку определяет характер механических процессов в приводе. Поэтому в основу методики расчета положим уравнение МХ АД в форме Клосса

$$\frac{M_{\text{ном}}}{M_{\text{max}}} = \frac{1}{\lambda} = \frac{2(1 + as_{\text{max}})}{s_{\text{ном}}/s_{\text{max}} + s_{\text{max}}/s_{\text{ном}} + 2as_{\text{max}}}$$

В этом выражении неизвестны два параметра: $a = r_1/c_1r_2'$ и критическое скольжение s_{max} . Задавшись некоторым значением a , можно найти критическое скольжение

$$s_{\text{max}} = \frac{s_{\text{ном}}}{A} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - A} \right), \tag{1}$$

где $A = 1 - 2as_{\text{ном}}(\lambda - 1)$, т.е. значение a определяет ординату точки опрокидывания, а абсциссу этой точки определяет значение λ (рис. 2. Здесь 1 — $a = 0,2$; 2 — 1,5; 3 — 3,2; рис. 2, a — для $P_{\text{ном}} = 60$ Вт, b — для 30 кВт). Увеличение a приводит к возрастанию критического скольжения, однако при этом все МХ проходят через точку номинального режима, заданную справочными данными, и практически совпадают друг с другом при скольжении меньше номинального. (Максимальное расхождение характеристик соответствует половине номинального скольжения и при $a = 0,2-3,2$ составляет около 10 % для АД мощностью 60 Вт и менее 1 % — у машин мощностью более 3 кВт.) В то же время коэффициент a определяет соотношение между важнейшими параметрами схемы замещения АД и тем самым влияет на все остальные параметры.

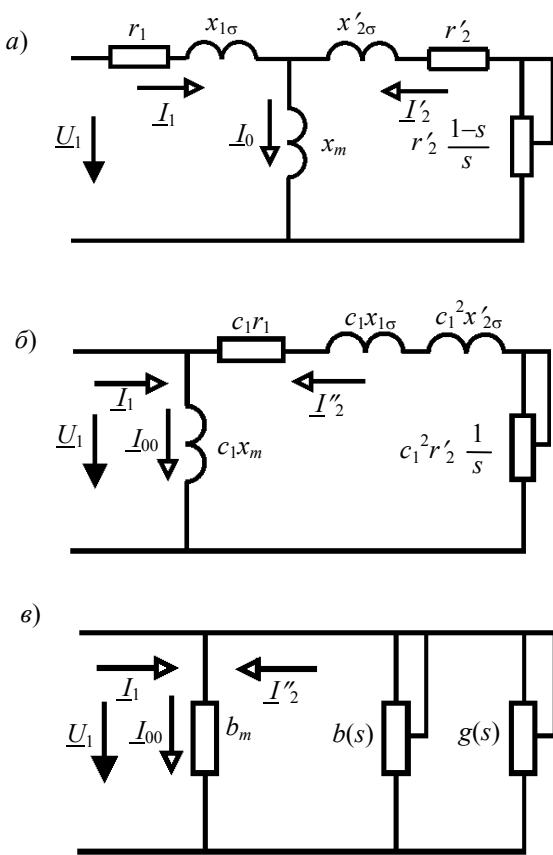


Рис. 1

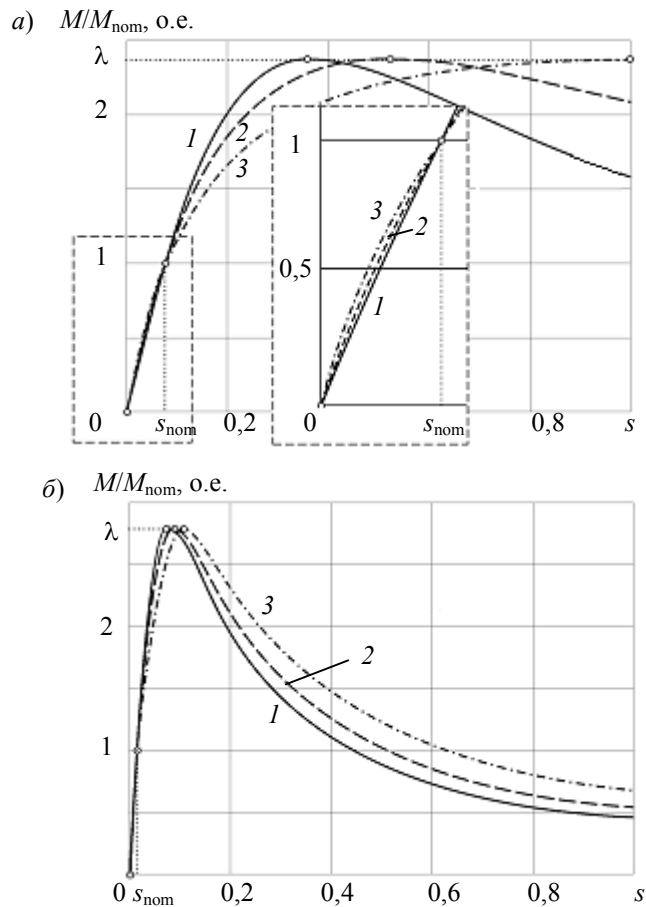


Рис. 2

Входящий в a коэффициент преобразования схемы замещения

$$c_1 = \left| 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_m} \right| \approx 1 + x_{1\sigma} / x_m \quad (2)$$

зависит от мощности и находится в диапазоне $1,02 < c_1 < 1,2$. Верхняя граница значений соответствует мощности АД в несколько десятков ватт, а нижняя — в несколько десятков и сотен киловатт.

Из выражения для критического скольжения можно определить величину

$$\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + c_1 x'_{2\sigma})^2} = \frac{c_1 r'_2}{s_{\max}} = \frac{r_1}{as_{\max}}$$

и подставить ее в уравнение максимального момента АД в режиме двигателя, тогда

$$M_{\max} = \lambda M_{\text{ном}} = \frac{B}{r_1 \left(1 + \frac{1}{as_{\max}} \right)},$$

где $B = \frac{m_1 U_1^2}{2\Omega_1 c_1}$; $M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\Omega_1 (1 - s_{\text{ном}})}$ — номинальный вращающий момент АД с числом пар полюсов z_p магнитного поля, если $\Omega_1 = 2\pi f_1 / z_p$ — скорость идеального холостого хода, а m_1 и U_1 — число фаз и фазное напряжение питания статора.

Отсюда можно определить все параметры схемы замещения, кроме индуктивного сопротивления основного магнитного потока

$$r_1 = \frac{B}{\lambda M_{\text{ном}} \left(1 + \frac{1}{as_{\max}} \right)}; \quad r'_2 = \frac{r_1}{c_1 a}; \quad (3)$$

$$x_k = x_{1\sigma} + c_1 x'_{2\sigma} = \frac{r_1}{as_{\max}} \sqrt{1 - (as_{\max})^2}.$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания x_k можно разделить на сопротивление потоков рассеяния статора и ротора $x_{1\sigma}$ и $x'_{2\sigma}$, руководствуясь известными из практики соотношениями (обычно это делают простым делением на 2 [2—4]). Однако на основании данных [1] лучше использовать соотношение $x'_{2\sigma} \approx c_1 x_{1\sigma}$, тогда

$$x_{1\sigma} = \frac{x_k}{1 + c_1^2}; \quad x'_{2\sigma} = \frac{x_k - x_{1\sigma}}{c_1} = \frac{c_1 x_k}{1 + c_1^2}. \quad (4)$$

Такое распределение существенно отличается от приближенного равенства $x'_{2\sigma} \approx x_{1\sigma}$ только при малых мощностях АД.

Последним подлежащим определению параметром является индуктивное сопротивление цепи намагничивания x_m . Чтобы при решении этой задачи не использовать каких-либо допущений, преобразуем последовательное соединение главной цепи схемы (рис. 1, б) в параллельное, выделив активную, $g(s)$, и реактивную, $b(s)$, составляющие комплексной проводимости (рис. 1, в)

$$g(s) = \frac{r_1 + c_1 r_2' / s}{c_1 \left[(r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + x_k^2 \right]}; \quad b(s) = \frac{x_k}{c_1 \left[(r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + x_k^2 \right]}. \quad (5)$$

Значение x_m слабо влияет на электромеханические процессы и входит в уравнение механической характеристики АД только посредством коэффициента c_1 . В то же время проводимость ветви намагничивания $1/x_m$ в режимах, близких к номинальному, соизмерима с реактивной проводимостью главной цепи $b(s)$ и существенно влияет на энергетические параметры. Поэтому ее целесообразно определять из баланса реактивной мощности

$$Q_1 = Q_k + Q_m = U_1 I_{\text{ном}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi},$$

где Q_k, Q_m — реактивная мощность, расходуемая на формирование полей рассеяния статора и ротора и основного магнитного поля соответственно. После преобразования главной цепи мощность потоков рассеяния и основного потока может быть представлена через одинаковое для всех ветвей фазное напряжение U_1 как $Q_k = U_1^2 b(s_n)$ и $Q_m = U_1^2 b_m = U_1^2 / (c_1 x_m)$. Подставив эти выражения в уравнение баланса мощности, получим

$$x_m = \frac{1}{c_1 \left[I_{\text{ном}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} / U_1 - b(s_{\text{ном}}) \right]} = \frac{1}{I_{\text{ном}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} / U_1 - b(s_{\text{ном}})} - x_{1\sigma}. \quad (6)$$

Таким образом, из шести исходных параметров получены все искомые в виде функций коэффициента a , изменяющегося в пределах $0 < a < 1/s_{\text{max}}$. (Ограничение для выбора a вводится из условия получения вещественного значения x_k в выражении (3).) Следовательно, задача сводится к определению этого коэффициента, но по параметрам механической характеристики значение a можно однозначно определить, только если известно критическое скольжение. Однако значение s_{max} в справочной литературе не приводится, поэтому в расчете нужно создать какой-либо цикл с вариацией a и последующим выбором его оптимального значения. В качестве условия оптимизации более всего подходит сходимость расчетного значения тока статора в номинальном режиме $I'_{\text{ном}}$ к справочному значению $I_{\text{ном}}$, поскольку в случае их согласования будет обеспечено полное соответствие электрических и механических параметров. Некоторая сложность в расчете возникает из-за того, что коэффициент c_1 можно вычислить только после определения искомого параметра, и следовательно, требуется создание итерационного цикла с прерыванием по условию сходимости к установившемуся значению c_1 . Кроме того, заранее неизвестны диапазон изменения и характер функции отклонения $\delta_I = (I'_{\text{ном}} - I_{\text{ном}}) / I_{\text{ном}} = f(a)$. Известно только, что при малых значениях a она отрицательна и для машин мощностью менее 1 кВт не изменяет своего знака, но имеет минимум. Для машин большей мощности функция $\delta_I = f(a)$ в диапазоне $0 < a < 1/s_{\text{max}}$ изменяет знак.

Поэтому для расчета был предложен алгоритм с двумя циклами типа „while“, приведенный на рис. 3. Внутренний цикл обеспечивает сходимость к установившемуся значению c_1 при $a = \text{const}$ и прерывается по условию $c_{1n} - c_{1(n-1)} \leq \Delta$. Прерывание наружного цикла может быть обусловлено

— выходом a за предел $a > 1/s_{\text{max}}$, что приводит к появлению мнимой составляющей в параметрах;

— обнаружением минимума функции отклонения $\delta_I = f(a)$;

— обнаружением смены знака функции $\delta_I = f(a)$.

Первое условие прерывания означает отсутствие признаков, обеспечивающих минимальную погрешность отклонения тока от номинального значения. В этом случае следует выбрать иной критерий оптимизации, но в расчетах по предлагаемой методике такая ситуация не возникла. Два других условия прерывания обеспечивают оптимальный выбор параметров АД.

Программа расчета по алгоритму рис. 3 легко реализуется в современных математических пакетах, например, MathCad или MathLab.

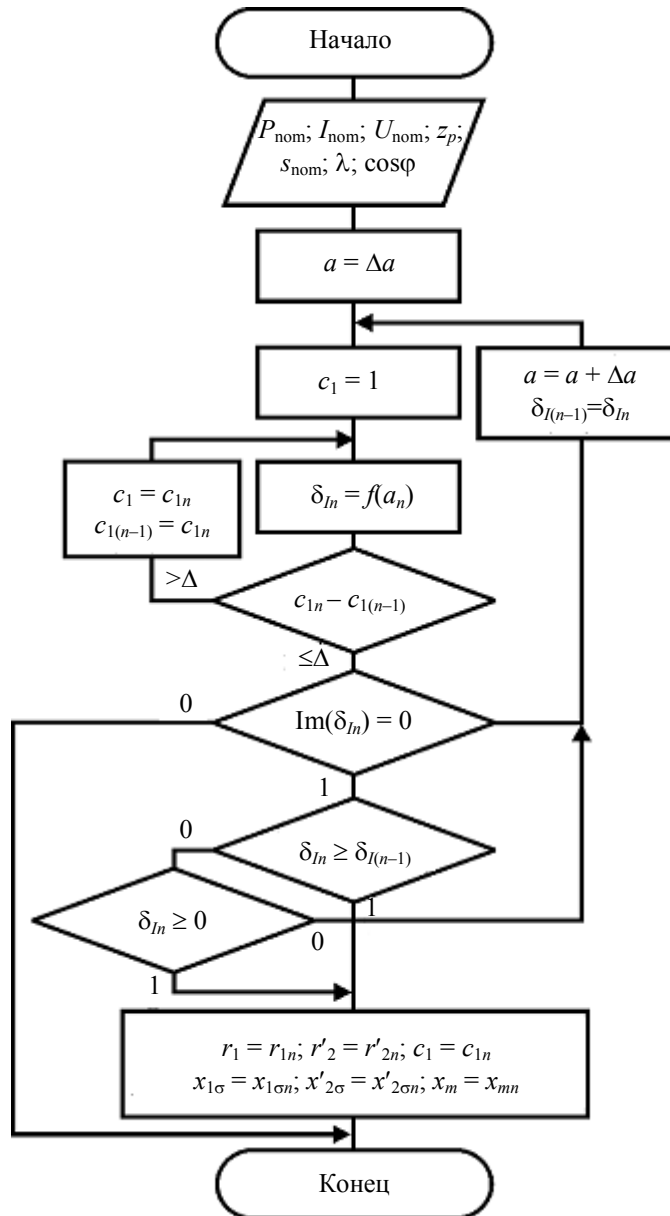


Рис. 3

Для оценки эффективности рассмотренной методики сопоставим полученные с ее помощью параметры схемы замещения АД с параметрами, полученными по методике [2], а также параметры, приведенные в [1, с. 302]. Причем сравнивать будем не сами параметры, так как истинное значение их неизвестно, а величины, получаемые из них расчетным путем и обычно приводимые в справочных данных. В качестве данных для сравнения выберем приведенные в [1]: максимальный и номинальный вращающий момент, номинальный ток и кратность пускового тока, а также коэффициенты мощности и полезного действия (рис. 4, 1 — по данным [1], 2 — по данным [2], 3 — предлагаемая методика). Расчет

токов и энергетических параметров будем проводить с помощью схемы (рис. 1, в), которая позволяет получить эти значения простейшим способом, не принимая каких-либо допущений.

Из анализа данных рис. 4 можно сделать следующие выводы.

1. Предлагаемая методика расчета параметров АД обеспечивает для всех машин полное соответствие координат характерных точек МХ справочным (исходным) данным, а также полное соответствие справочным значениям номинального тока, коэффициента мощности и КПД для двигателей мощностью выше 1 кВт. Для двигателей меньшей мощности возникает рассогласование со справочными данными, которое не может быть устранено подбором коэффициента a .

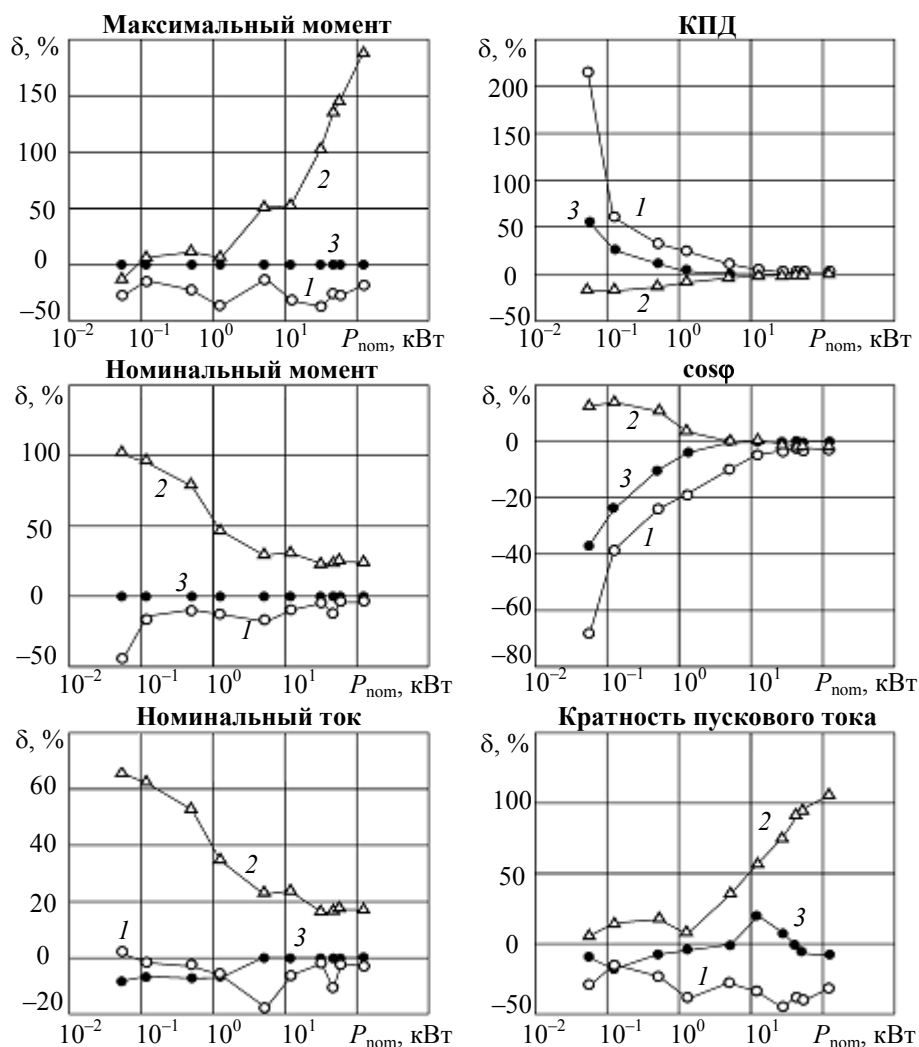


Рис. 4

2. У двигателей мощностью менее 1 кВт возникает отклонение расчетного номинального тока от справочного значения, не превышающее 10 %, что можно считать вполне допустимым, если учесть, что по ГОСТ 28173 (МЭК 60034-1) допуск на справочное значение пускового тока составляет +20 %, а номинального скольжения — ± 30 %. Причем ГОСТ устанавливает увеличенные в 1,5 раза допуски именно для машин мощностью менее 1 кВт.

3. Отклонения пускового тока от справочных значений в предлагаемой методике имеют случайный знакопеременный характер и не превышают 20 %. Существенные отклонения от справочных данных наблюдаются также при расчете пускового момента. Для АД мощностью более 1 кВт его значения занижены в 1,5—2 раза. Такое рассогласование можно объяснить несоответствием расчетной математической модели (рис. 1) реальной машине, для которой

приводятся справочные данные и в которой значительную роль играет явление вытеснения тока в стержнях ротора при пуске.

4. При расчете энергетических параметров (КПД и $\cos\varphi$) АД мощностью менее 1 кВт наилучшее приближение к справочным значениям получается по данным методики [2]. Это вполне объяснимо, поскольку в ней все параметры схемы замещения определяются по энергетическим соотношениям. Однако для машин мощностью выше 1 кВт предлагаемая методика обеспечивает наилучший результат, так как ее отклонения не превышают 0,5 %.

Таким образом, разработанная методика определения параметров схемы замещения АД позволяет получить данные, существенно лучше согласующиеся со справочными значениями, а для МХ она обеспечивает наилучшее приближение на рабочем участке с нулевой погрешностью в точках номинального режима и опрокидывания. Вне рабочего участка эта методика, как и другие методики, использующие схему замещения рис. 1, приводит к значительной погрешности, в особенности в определении пускового момента (см. рис. 2). Следует заметить, что в [4, с. 170] рассогласование справочного и расчетного пускового момента устраняется простым принятием справочного значения, что создает необъяснимый разрыв МХ в области режима короткого замыкания.

Рассмотренная методика по сути является методикой интерполяции МХ по двум точкам, заданным справочными данными. Поэтому она успешно может использоваться и в задачах идентификации параметров схемы замещения по известным координатам МХ, полученным на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: Уч. для вузов по спец. „Электро-механика“. М.: Высш. шк., 1994. 318 с.
2. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. СПб: КОРОНА-принт, 2003. 256 с.
3. Вольдек А. И. Электрические машины: Уч. для студентов высш. техн. учебн. заведений. Л.: Энергия, 1974. 840 с.
4. Кацман М. М. Электрические машины: Уч. для уч-ся техникумов. М.: Высш. шк., 1990. 463 с.

Сведения об авторах

- Александр Анатольевич Усольцев** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
E-mail: uaa@nwgsm.ru
- Дмитрий Вячеславович Лукичёв** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
E-mail: ludimit@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
электротехники и прецизионных
электромеханических систем

Поступила в редакцию
23.01.08 г.

И. Ю. ЖИГАНОВ

РАЗВИТИЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРУБ

Рассматриваются основные направления развития телевизионных устройств измерения геометрических параметров труб, структурные схемы и методы аппаратной реализации, позволяющие исключить влияние взаимного расположения телекамеры и объекта на результат измерений. Использование современных методов обработки изображений позволяет повысить точность и стабильность исследуемых устройств. Результаты экспериментальных исследований показали возможность достижения требуемой точности.

Ключевые слова: геометрические параметры трубы, дистанционное измерение, телекамера, погрешность обработки изображения.

В настоящее время измерение геометрических параметров труб (ГПТ) производится в основном вручную инструментальными методами с помощью шаблонов и измерительных инструментов. Телевизионные методы измерения ГПТ, предложенные в работах [1—6], не получили широкого распространения в связи с рядом недостатков, в частности, зависимости результатов измерений от взаимного расположения телекамеры и объекта контроля. Автором предложены бесконтактные телевизионные методы и устройства измерения ГПТ [1], которые имеют очевидные преимущества и вследствие развития телевизионной и компьютерной техники в настоящее время становятся вполне дешевыми и доступными. Использование волоконной оптики, калибровочных каналов и современных методов обработки изображений позволяет повысить точность и стабильность исследуемых устройств.

Телекамера позволяет спроецировать изображение трубы или ее элементов на фотоматрицу, ввести его в компьютер или специализированный микропроцессор и в дальнейшем математически обработать. Метод эффективен при определении формы профиля, толщины стенки, изгиба трубы и ее длины. Чувствительность современных телекамер такова, что позволяет обходиться без дополнительного освещения, используя только естественный свет. Простейшая установка для определения ГПТ содержит телекамеру, расположенную на определенном расстоянии от контролируемого объекта, выход которой через устройство ввода изображения подсоединен ко входу компьютера. Несмотря на конструктивную простоту возможности этой схемы далеко не исчерпаны и ее развитие в первую очередь связано с алгоритмами обработки видеосигнала. Введенное в компьютер изображение может обрабатываться по специальным программам, в результате определяется внешний и внутренний диаметры трубы, толщина стенки, отклонение от требуемой формы, площадь, момент инерции профиля, вычисляются максимальные отклонения от паспортных характеристик, выдается заключение о соответствии данной трубы ГОСТу. Отметим, что профиль торца может быть круглым или фасонным и компьютер должен проводить анализ параметров труб на соответствие требованиям. При наличии индивидуальной маркировки труб компьютер также может вести автоматическое протоколирование результатов измерений.

Рассмотрим алгоритмы вычислений некоторых геометрических параметров круглых труб. Процесс формирования изображения на матрице камеры для случая ее идеального торцевого расположения проиллюстрирован на рис. 1, где b — расстояние от камеры до торца трубы, L — длина, R_1 — внутренний радиус, R_2 — внешний радиус, d — толщина стенки трубы, β — половина угла обзора телекамеры, r — радиус проекции выходного отверстия противоположного торца трубы, 1 — ТВ-камера, 2 — оптическая система, 3 — ПЗС-матрица.

На поверхности фотоматрицы формируется изображение, размеры которого зависят от максимального угла захвата телекамеры и расстояния от ее торца до торца трубы. Коэффициент преобразования реальных размеров трубы в размер изображения на матрице телекамеры определяется параметрами оптической системы. Изображение всех реальных параметров трубы на поверхности матрицы будет иметь следующие размеры: $R'_1 = KR_1$, $R'_2 = KR_2$, $d' = Kd$, $r' = Kr$, где K — коэффициент преобразования. Если известен коэффициент преобразования, по изображению, формируемому телекамерой, можно определить реальные размеры трубы. При этом по изображению противоположного торца трубы можно измерять не только внешний, внутренний радиусы, толщину стенки, но и длину трубы, если она прямая и внутренний радиус известен. Размер проекции противоположного торца трубы определяется телесным углом, по которому проектируется дальнейе отверстие трубы, зависит от длины и на основе законов подобия вычисляется по формуле

$$r' = \frac{R'_1 b}{L + b}. \tag{1}$$

Отсюда длину трубы можно определить по формуле

$$L = \frac{b(R'_1 - r')}{r'} = \frac{b(R_1 - r)}{r}, \tag{2}$$

если известна длина, то можно определить внутренний радиус трубы:

$$R_1 = \frac{L + b}{b} r = \frac{r'(L + b)}{Kb}. \tag{3}$$

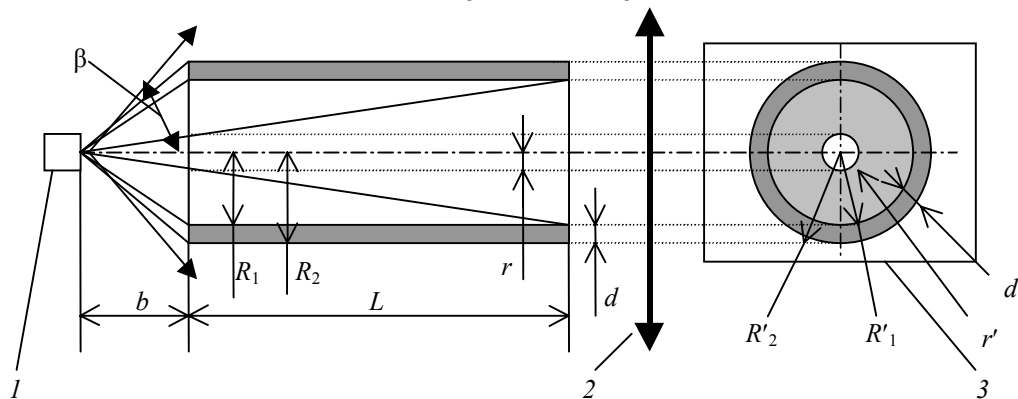


Рис. 1

Основной трудностью при таком методе измерения является сохранение фиксированного расстояния b между камерой и торцом трубы. Для этого требуется специальное устройство, которое бы фиксировало и центрировало телекамеру относительно торца. Компьютерную обработку результатов затрудняют посторонние объекты, которые попадают в угол обзора телекамеры.

Если необходимо измерить только внутренний радиус и длину, то телекамеру можно расположить и центрировать по торцу трубы. В этом случае размер изображения противоположного торца трубы будет определяться по формуле:

$$r' = K \frac{R_1^2}{L \operatorname{tg} \beta}. \tag{4}$$

При известной длине можно определять внутренний радиус или при известном радиусе можно определять длину трубы. В общем случае если известно расстояние от камеры до торца трубы, на который сфокусирована оптика, требуемые размеры определим по формулам:

$$R'_1 = K \frac{R_1^2}{b \operatorname{tg} \beta}, \quad R'_2 = K \frac{R_2^2}{b \operatorname{tg} \beta}, \quad d' = R'_1 - R'_2. \tag{5}$$

Обработка изображения может проводиться программным и аппаратным способами. При *программной* обработке, которая выполняется на компьютере, последовательность действий может быть следующей.

1. Фильтрация изображения (выделение контуров по уровню серого, так как торец, внутренняя область и фон освещены по-разному).

2. Для каждого выделенного уровня серого определение общего количества пикселей (элементов фотоматрицы) заданной яркости, что будет соответствовать площади измеряемой фигуры.

3. Соотнесение полученного числа с измеряемым радиусом (диаметром) через формулу площади круга или кольца в зависимости от конкретного режима съемки изображения.

4. Определение длины по формулам (2)—(5), если радиус известен.

5. Анализ формы торца трубы по специальным алгоритмам.

Возможно применение процесса калибровки на эталонной трубе. Метод позволяет также проводить контроль одновременно нескольких труб, попадающих в зону захвата объектива телекамеры. Математическую модель можно ограничить законами геометрической оптики с обязательным учетом искажений объектива и дискретности фотоматрицы, которые могут быть учтены через поправочные коэффициенты, определяющие конкретные условия измерений и характеристики применяемой элементной базы.

Недостатком телевизионного метода контроля ГПТ, использующего одну телекамеру, является зависимость результата измерений от ориентации камеры относительно оптической оси и расстояния от камеры до трубы. Избавиться от этого недостатка можно, если контроль производить одновременно несколькими телекамерами, разнесенными друг от друга на фиксированные расстояния.

Схема телевизионного устройства контроля с двумя телекамерами приведена на рис. 2 (*a* — схема формирования изображения фигуры на экранах телекамер, *б* — совмещенное на одном экране изображение). Устройство состоит из двух одинаковых телекамер 1 и 2, разделенных фиксированным расстоянием l , выходы которых через устройство ввода 3 соединены с компьютером 4, 5 — граница телесного угла обзора телекамеры, *б* — объект, 7 и 8 — экран первой и второй камеры соответственно.

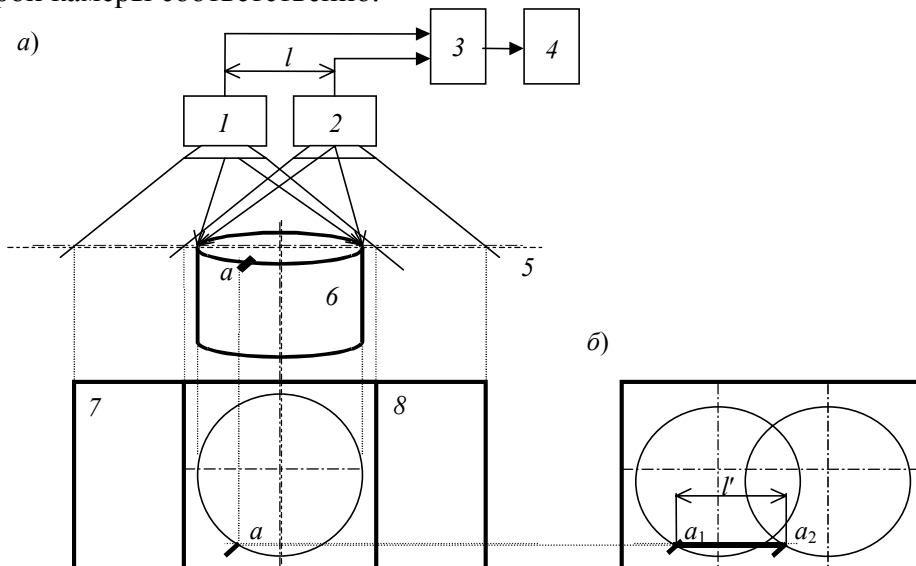


Рис. 2

Суть работы устройства состоит в том, что на измеряемом объекте делается произвольная метка (точка a , рис. 2, *a*), которая с помощью смещенных в пространстве телекамер будет проектироваться на точки a_1 и a_2 экрана видеоконтрольного устройства. При совмещении изображений от двух телекамер на одном видеоконтрольном устройстве точки a_1 и a_2 будут

разнесены в плоскости экрана на расстояние l' (рис. 2, б). Таким образом, независимо от расстояния от камеры до объекта и смещения оптической оси телекамер от центра фигуры, измерив на экране длину отрезка l' и соотнеся ее с реальным размером l , всегда можно определить размер пиксела экрана (масштаб) $M = l/l'$. Далее, подсчитав число пикселей, соответствующих изображению контролируемой фигуры на одном из экранов и умножив результат на цену деления, можно определить реальные (R) геометрические размеры изделия, т.е. $R = MR'$, где R' — размер изделия на экране. Таким образом независимо от взаимного расположения объекта и телекамеры в устройстве автоматически вычисляется цена деления экрана. При этом, если камерой захватывается все изображение объекта, устройство обработки можно запрограммировать не только на измерение каких-то размеров, но и на анализ формы, вычисление центра тяжести, момента сопротивления и других параметров, определяемых геометрией объекта контроля.

Применение трех или четырех камер, разнесенных во взаимно перпендикулярных направлениях, позволяет вычислять размер одного пиксела по двум координатным осям, что позволит повысить точность измерений.

На рис. 3 показана схема телевизионной установки, основанная на пространственном сканировании объекта измерений путем поворота телекамеры на фиксированные углы. По принципу работы устройство аналогично прибору, представленному на рис. 2, а, но конструктивно отличается от него тем, что вместо двух телекамер используется одна, которая поворачивается по отношению к объекту измерения на фиксированные углы α с помощью соответствующего устройства управления 1 (остальные обозначения соответствуют рис. 2). На основе данных о прогнозируемом искажении размеров и формы объекта можно вычислить реальные геометрические параметры измеряемой трубы и исключить при этом влияние перекосов и изменения расстояния до объекта. Очевидно, что чем больше фиксированных углов съемки, тем более точны результаты измерений.

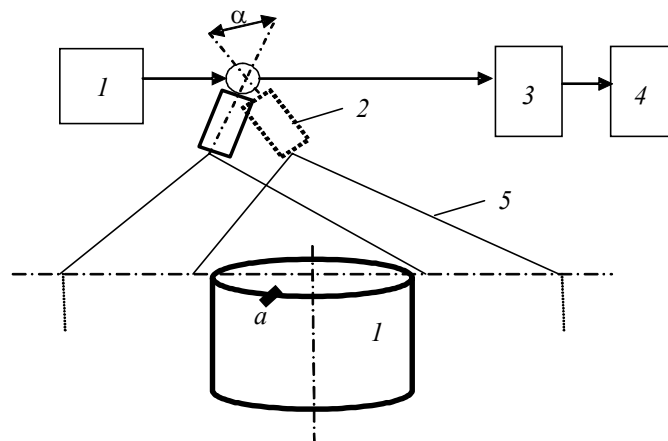


Рис. 3

Универсальным оптическим датчиком служит телекамера. Для задач контроля ГПТ достаточно изображения черно-белых телекамер, которые можно условно разделить на модели со средним (380—420) и высоким (550—570 ТВ-линий) разрешением.

Для систем контроля ГПТ целесообразно применять поворотные телекамеры с дистанционно управляемым углом поворота. Управление в таких камерах осуществляется по протоколу ASCII либо RS-422. Телекамеры имеют высокочувствительную 1/3" ПЗС-матрицу superHAD с разрешением 752×582 пикселей в стандарте PAL, автоматический баланс, регулировку усиления и γ -коррекцию, благодаря чему формируется качественное изображение при освещенности до 3 люкс. Погрешность установки в заданное положение составляет 1° , что при определенных условиях обеспечивает высокую точность измерения ГПТ.

Для экспериментального исследования телевизионных методов измерений ГПТ создана установка, включающая телекамеру Video Blaster WebCam Plus со встроенной платой ввода изображения, собственным программным обеспечением и компьютер класса Р-III. Целью исследований было изучение особенностей формирования изображения профиля трубы в зависимости от расстояния до объекта, перекосов камеры в различных плоскостях, изучение искажений изображений. В результате экспериментально показано, что при перекосах камеры в пределах $\gamma = \pm 5^\circ$ погрешность измерения размера не превышает 1 %. Удельное изменение размера при смещении объекта от оптической оси составляет $\epsilon_x = 0,000\ 47$, $\epsilon_y = 0,000\ 22\ \text{мм}^{-1}$, при этом эллиптичность, вычисленная как отношение размеров по осям, составляет $\epsilon_z = 0,975$. Удельная погрешность при изменении расстояния до трубы: $\epsilon = 0,003\ \text{мм}^{-1}$.

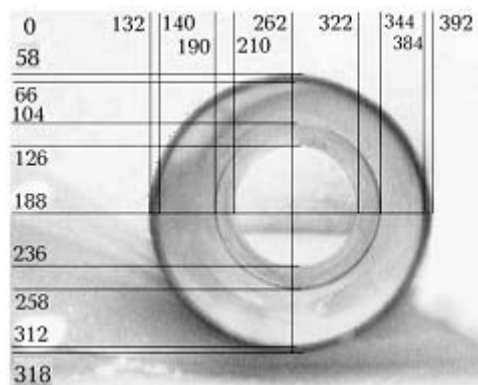


Рис. 4

На рис. 4 показана возможность измерения внешнего ($D = 40\ \text{мм}$), внутреннего ($d = 39,3\ \text{мм}$) диаметра, толщины стенки и длины трубы ($L = 160\ \text{мм}$) по размеру изображения противоположного отверстия. Цена одного пиксела ($0,162\ \text{мм}$) для данного расстояния определена предварительной калибровкой установки. Результаты измерений, полученные после обработки изображения: $D = 42,1\ \text{мм}$, $d = 39,6\ \text{мм}$, толщина стенки $1,26\ \text{мм}$, $L = 156\ \text{мм}$, что удовлетворяет требованиям ГОСТ.

Экспериментальные исследования телевизионных методов измерений ГПТ показали их приемлемую точность, эффективность и широкие возможности получения измерительной информации. Результаты получены при использовании средних по разрешающей способности оптики, телекамеры, компьютера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ободан В. Я. Автоматический контроль размеров сечения сортового проката и труб. М.: Металлургия, 1985. 96 с.
2. Ободан В. Я., Скрипченко А. И., Сологуб Б. В. Телевизионный автоматический микропроцессорный измеритель габаритных размеров сечения труб и проката // Сталь. 1989. № 6. С. 58—61.
3. Ободан В. Я. Контроль объема заготовок круглого сечения оптоэлектронным способом // Изв. вузов. Приборостроение. 1997. Т. 40, № 2. С. 40—43.
4. Радиотехнические и телевизионные средства сбора и обработки информации / Под ред. К. Е. Румянцев. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 162 с.
5. Балабаев С. Л., Румянцев К. Е. Телевизионный датчик контроля изделий металлургического производства // Информационные технологии в науке и образовании. Сб. науч. тр. Вып. 28. Шахты, 1998. С. 24—28.
6. Жиганов И. Ю. Бесконтактные устройства измерения геометрических параметров труб. М.: Межвуз. книга, 2004. 220 с.

Сведения об авторе

Игорь Юрьевич Жиганов

— Самарский государственный аэрокосмический университет им. С. П. Королева, E-mail: aps@ssau.ru

Рекомендована кафедрой
электротехники

Поступила в редакцию
06.08.07 г.

Ю. И. НЕРОНОВ

МОДУЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ЯМР-ТОМОГРАФОМ

Описан модуль ввода—вывода, используемый для получения изображений на ЯМР-томографе. Программа управления, написанная на языке C++, обеспечивает через интерфейс формирование запускающих импульсов резонансной частоты, подачу импульсных градиентов магнитного поля, реализует суммирование ЯМР-сигналов и последовательное обращение к фурье-преобразованию с выводом изображений на монитор для оценки их качества. Программа обеспечивает последовательное суммирование томограмм для снижения шумового фона и повышения контраста изображений.

Ключевые слова: ЯМР-томография, модуль ввода—вывода.

Для управления ЯМР-томографом был изготовлен модуль ввода—вывода для аналоговых и цифровых сигналов и разработано программное обеспечение, что позволило расширить возможности ЯМР-томографа, предназначенного для учебных и научно-исследовательских целей [1, 2]. Причем авторами была поставлена цель разработать модуль с использованием минимального числа доступных интегральных микросхем. ЯМР-томографом управляют с помощью персонального компьютера PENTIUM II (процессор INTEL CELERON с частотой 800 МГц), который был выбран из-за наличия шины ISA. В компьютерах последних выпусков не используются шины ISA, а имеющиеся в них шины PCI требуют для организации ввода—вывода внешних сигналов специальных процессорных устройств и программного обеспечения, специализированного под выбранный процессор.

Исследования на ЯМР-томографе живых тканей требуют множества вариантов импульсных последовательностей для накопления изображений с разным контрастом. Шина ISA позволяет реализовать накопление изображений с любым вариантом импульсных последовательностей. При этом, если используется язык программирования C++, возможна быстрая корректировка программного обеспечения.

Для регистрации внешних сигналов была использована стандартная звуковая карта Sound Blaster Creative Labs VIBRA 16C, версия DSP 4.13. Эта карта имеет два независимых линейных входа и усилитель с регулируемым коэффициентом усиления. При ее использовании обеспечивается оцифровка двух входных сигналов с частотой выборки 44 кГц при разрядности 16 бит на выборку. Материнская плата ПК имеет мост VIA Tech VT82C686 PCI-ISA с одной шиной ISA, в которой размещена звуковая карта. Передача данных из буфера платы в оперативную память осуществляется как прямым чтением из регистров, так и в режиме прямого доступа в память.

Вторая плата управления (вывода) была изготовлена автором и включает дешифратор адреса, программируемые порты ввода—вывода, цифро-аналоговые преобразователи, операционные усилители и усилители тока. Причем интегральные микросхемы этой платы питаются от шины ISA. Сама плата расположена в корпусе персонального компьютера Pentium II и закреплена с помощью четырех стоек непосредственно на звуковой карте Sound Blaster VIBRA 16C. В итоге для подключения данного устройства ввода—вывода к ПК потребовалась лишь одна шина.

Схема дешифратора адреса (рис. 1) собрана на основе преобразователя двоичного кода 3×8 в 8-разрядный унитарный код с использованием микросхемы КР1533ИД7. Эта микросхема содержит входную логику. Предварительная дешифровка адреса реализована на основе двух схем 3И-НЕ микросхемы КР1533ЛА4. Третья схема 3И-НЕ этой микросхемы

использована для сброса в исходное состояние интерфейсов КМ1821ВВ55 при включении компьютера. Обмен данными производится по 8-разрядной буферизированной шине. Для усиления по мощности сигналов шины данных при чтении и записи использован 8-разрядный двунаправленный драйвер с тремя состояниями КР1533АП6. К выходу микросхемы КР1533ИД7 можно подключить до 8 интерфейсов КМ1821ВВ55 (программируемый 3-регистровый 8-разрядный цифровой порт ввода—вывода данных). В модуле использованы адреса от 300h до 31Fh, на рис. 1 показано соединение лишь для одной такой микросхемы (КМ1821ВВ55) с использованием адресов 31Ch—31Fh.

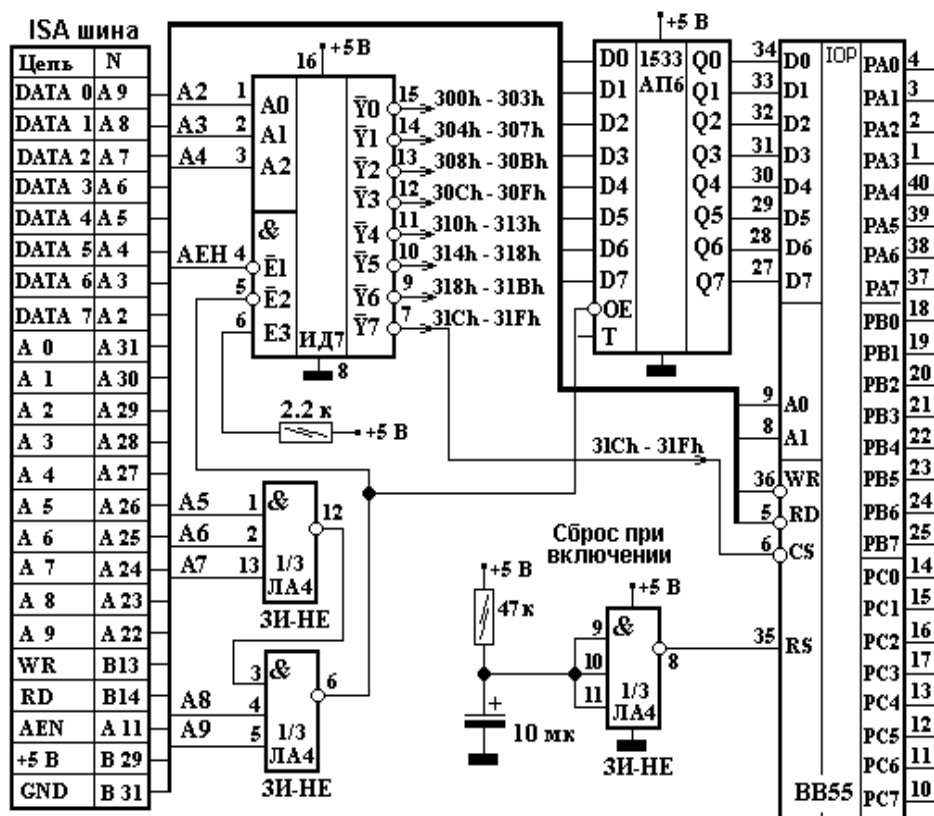


Рис. 1

Обращение к необходимому устройству на плате и реализация его функций осуществляются с участием сигналов управления шины: IOR (команда чтения из устройства), IOW (команда записи в устройство) и AEN. Сигнал AEN используется для отключения процессора и других устройств от канала для проведения цикла ПДП. Когда сигнал AEN активен (высокий), контроллер ПДП использует шину адреса, шину данных, а также линии чтения и записи (см., например: Кулешов С. В. ISA шина IBM компьютера. 2000. <<http://exos.fromru.com>>).

Управление ЯМР-томографом заключается в последовательной подаче импульсов тока в катушки G_x , G_y , G_z , что обеспечивает кодирование исследуемого пространства по трем направлениям. Для этого используется схема преобразования программных цифровых последовательностей в импульсы тока (рис. 2).

В качестве ЦАП была использована 10-разрядная микросхема ЦАП К572ПА1. Два операционных усилителя микросхемы КР574УД2Б использовались для преобразования однополярного выходного аналогового сигнала ЦАП в двухполярный выходной, поскольку кодирование пространства обеспечивается периодическим уменьшением тока с изменением знака. В качестве усилителя тока использована микросхема L2724, которая позволяет обеспечивать на выходе ток ± 1 А при работе в непрерывном режиме. Для создания импульсных градиентов

по другим направлениям были использованы аналогичные ЦАП, подключенные к другим выходам КМ1821ВВ55.

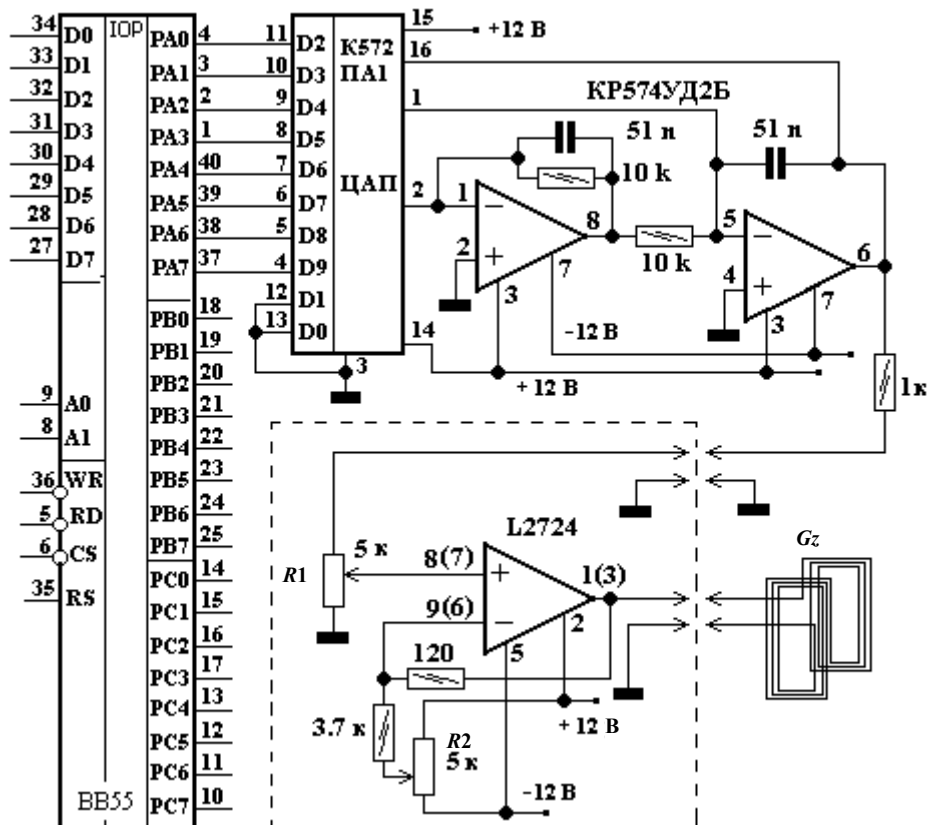


Рис. 2

С помощью резистора $R1$ устанавливают масштаб томографического изображения для одного из трех направлений области исследования. Резистор $R2$ используется для компенсации соответствующего линейного статического градиента магнитного поля, которое обычно присутствует в магнитной системе томографа.

В устройстве реализована схема управления током для изменения величины индукции магнитного поля, что позволяет обеспечивать резонансные условия при температурном дрейфе индукции при накоплении томограмм в памяти ПК. При накоплении томограмм необходимы импульсы запуска радиочастотных резонансных импульсов. Представленная схема (рис. 2) в этом случае также приемлема, поскольку радиочастотные импульсы формируются с помощью периодически открываемых диодных ключей, управляемых импульсами тока.

При запуске программы на шину адреса последовательно выставляется один из адресов устройства, после чего на шину данных выводится значение, передаваемое в порт при операции записи. При этом устройство должно распознавать адрес с помощью дешифратора и выдавать на выход с шины данных установленное в программе значение. Чтобы исключить операцию ввода—вывода из порта при совпадении адреса во время проведения операции прямого доступа в память (например, при обращении к дискам), проверяется состояние сигнала AEN. При обращении ПК к томографу сигнал AEN должен иметь (рис. 1) низкий логический уровень. Отметим, что в устройстве можно применять микросхемы ТТЛ и ТТЛШ серий 555, 1533, 1556 и 556. Возможно также использовать микросхемы серии 580, например КР580ВВ55. Из импортных микросхем можно использовать 74ALS и 74LS.

Выходы шины ISA имеют нагрузочную способность для подключения 2—3 входов микросхем серии 555, при большем их количестве необходимо применять буферные элементы (типа 580ВА86, 580ВА87, 555АП6 и другие). Дешифратор адреса (рис. 1) позволяет применять

до 8 микросхем типа КМ1821ВВ55. Поскольку к каждому интерфейсу КМ1821ВВ55 можно подключить три АЦП, то описываемый модуль ввода—вывода позволяет управлять током на 24 выходах.

Блок-схема разработанного томографа была представлена ранее в работах [1, 2]. После модернизации и использования процессора с частотой 800 МГц скорость двойного фурье-преобразования для формирования изображений увеличилась более чем в два раза.

На рис. 3 представлен вид экрана монитора ПК, на котором можно запускать и контролировать процесс накопления томографических изображений.

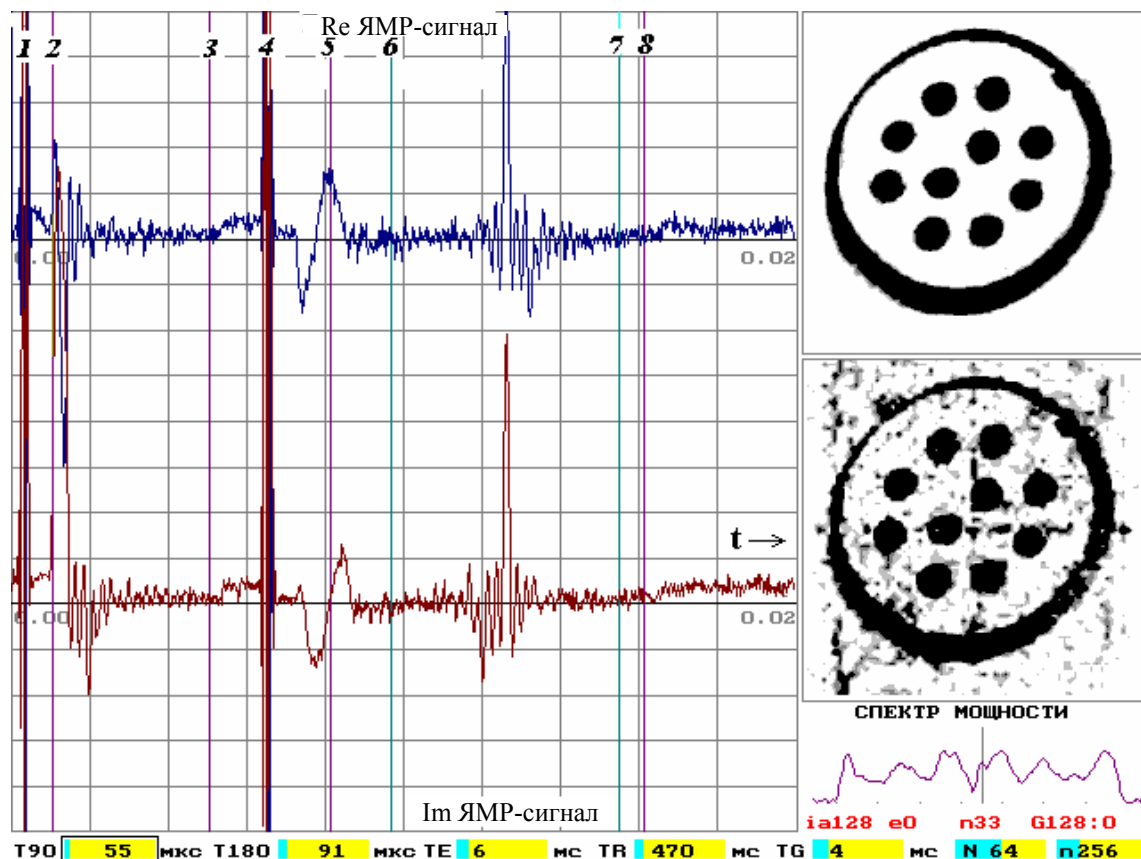


Рис. 3

При запуске процесса накопления изображения на экран монитора выводятся результаты оцифровки: две составляющих ЯМР-сигнала (действительные и мнимые части). Верхними цифрами (рис. 3) показаны следующие последовательные операции: 1 — подача на образец 90-градусного импульса резонансного возбуждения; 2 — подключение градиентного импульса фазового кодирования; 3 — снятие импульса фазового кодирования; 4 — подача на образец 180-градусного импульса возбуждения; 5 — подключение градиентного импульса частотного кодирования; 6 — начало выборки числового материала (строк для заполнения действительных и мнимых матриц); 7 — завершение выборки числового материала; 8 — снятие градиентного импульса частотного кодирования. Третий градиентный импульс, используемый для выделения толщины слоя, включается в момент времени 3 и снимается в момент времени 5. Нижняя строка цифр используется оператором для корректировки параметров импульсной последовательности.

После каждой серии импульсов возбуждения ЯМР-сигнала и его кодировки импульсными градиентами запускается программа фурье-преобразования, и полученный спектр мощности высвечивается в правой нижней части монитора.

После накопления строк всей матрицы появляется томограмма исследуемого объекта. Как правило, используется матрица размером 64×64. На рис. 3 представлены томограммы,

которые накоплены при размещении в центре магнитной системы шайбы из капралона с десятью отверстиями. Шайба помещена в цилиндрический сосуд, заполненный водой. Вода окружает деталь и заполняет десять отверстий шайбы, темный тон указывает на наличие в зоне регистрации источников ЯМР-сигнала от протонов воды. Нижнее изображение шайбы содержит шумовой фон, поскольку является результатом накопления одной томограммы за 30 с. Результат последовательного суммирования нескольких изображений представлен в верхней части рис. 3. По достижении удовлетворительного качества изображения оператор останавливает процедуру накопления сигналов.

В целом модуль управления является достаточно универсальным и может использоваться для автоматизации устройств начиная от учебных лабораторных стендов до сложных научно-исследовательских комплексов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 05.08.01304.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В. К., Неронов Ю. И., Иванов В. А. Мини-ЯМР-томограф кафедры измерительных технологий и компьютерной томографии // Науч.-технич. вестн. СПбГУ ИТМО. 2001. № 3. С. 201—204.
2. Неронов Ю. И., Иванов В. К. Разработка мини ЯМР томографа для учебных и научно-исследовательских целей // Научное приборостроение. 2006. Т. 16, № 2. С. 51—56.
3. Руководство по архитектуре ИРМ РС АТ / Ж. К. Голенкова, А. В. Заболоцкий, М. Л. Мархасин и др. / Под. ред. М. Л. Мархасина. Минск: ООО „Консул“, 1992. 949 с.

Сведения об авторе

Юрий Ильич Неронов — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, E-mail: yineronov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
24.05.07 г.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535

С. А. АЛЕКСЕЕВ, С. А. КОНОНОВ, К. Г. СЕКАРИН, В. А. ТРОФИМОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО КОНТРАСТА

Рассмотрена возможность построения изображения объекта на основе поляризационного контраста с подстилающей средой (фоном). Для обоснования сделанного предположения выполнены измерения параметра поляризации света, отраженного от нитроэмалевого покрытия, позволившие отработать методику измерений и рассмотреть различие поляризационных характеристик образцов и естественных покрытий. Установленные различия могут быть использованы для повышения вероятности обнаружения объектов с нитроэмалевыми покрытиями на фоне подстилающей среды.

Ключевые слова: поляризация, отражательная способность, матрица рассеяния света, степень поляризации, поляризационный контраст, вероятность обнаружения объекта.

Введение. В практике приборостроения часто возникает необходимость решения двух противоположных задач: обнаружения объекта на фоне окружающей среды и маскировки объекта для снижения вероятности его обнаружения.

Такие задачи могут возникать, например, в системах неразрушающего контроля качества, требующих выделения неоднородности физико-технических параметров изделия, либо в системах обнаружения и локации, предназначенных для распознавания объектов (цели) на фоне естественной среды (пашни, подлеска, травы и т.д.). В подавляющем большинстве известных устройств положен принцип измерения мощности сигнала, определяемой свойствами отражающей поверхности объекта и фона, на котором этот объект находится [1]. Вследствие возможного сходства отражательной способности искусственных и естественных объектов выделение цели (неоднородности) на фоне подстилающей среды (на общем фоне) либо соизмеримых с ней естественных образований может быть затруднено. Такого рода ситуация определяет необходимость поиска дополнительных параметров сигнала, одним из которых может служить поляризация отраженного излучения.

Действительно, если рассматривать различные наиболее часто используемые способы описания векторных характеристик световой волны, то можно заметить, что энергетическая характеристика — интенсивность — является лишь одним из параметров, отображающих полную характеристику поляризации [2]. Дополнив информацию об объекте, основанную на энергетических характеристиках, векторными характеристиками световой волны, можно существенно увеличить вероятность обнаружения (сокрытия) объекта.

Постановка задачи. Характеристики света, отраженного шероховатой поверхностью, определяются матрицами рассеяния объекта и фона. Элементы этих матриц являются функ-

цией длины волны падающего излучения, углов падения и отражения, состояния поляризации падающей волны и физических характеристик отражающей поверхности, таких как форма, шероховатость, однородность и т.п. [3]. Различающиеся между собой матрицы рассеяния объекта и подстилающей среды могут определять различие состояния поляризации в отраженных ими лучах при одинаковой поляризации падающих. При локации диффузно-отражающей поверхности отраженный сигнал частично поляризован. Степень поляризации сигналов, отраженных фоном и объектом, может быть различной. Этот факт целесообразно использовать при построении оптических систем выделения изображения объектов на фоне подстилающей среды на основе поляризационного контраста. Кроме того, может быть использована полезная информация о характеристиках отражающих поверхностей, содержащаяся в полностью поляризованной составляющей отраженного излучения.

При обнаружении объекта мощность сигнала, равная разности мощностей излучений, отраженных объектом и фоном $\Delta P = P_o - P_\phi$, достигает такого порогового значения, при котором на индикаторе с заданной вероятностью фиксируется лишь наличие в области обзора объекта. На практике пользуются не абсолютным, а относительным ее значением ΔP — так называемым пороговым контрастом при нулевой пространственной частоте

$$k = \frac{P_o - P_\phi}{P_\phi}. \quad (1)$$

Подобное определение контраста может быть применено не только для интенсивности света, но и для каждого параметра поляризации в отдельности

$$k = \frac{S_{io} - S_{i\phi}}{S_{i\phi}}, \quad (2)$$

где S_i — параметры вектора Стокса ($i = 1, 2, 3, 4$).

Матрица рассеяния является одной из важнейших и наиболее общих характеристик объекта, определяющих состояние поляризации в отраженном пучке, однако конкретный вид ее известен лишь в немногих случаях.

Процесс обнаружения, как правило, строится по принципу сравнения информации, поступающей от наблюдаемого объекта, с информацией, хранящейся в памяти системы обнаружения. Для калибровки системы обнаружения, основанной на анализе энергетических характеристик сигнала, были выполнены долгосрочные измерения альbedo различных естественных образований. При этом тщательно исследовалась зависимость процессов рассеяния естественного света от различных факторов, таких как склонение естественных источников освещения, их характер, время года, параметры объектов и т.п. Подобная информация, связанная с поляризационными свойствами объектов, практически отсутствует. В этой связи представляют интерес измерения, позволяющие поместить в память распознающих систем информацию о поляризационных свойствах объектов, подлежащих обнаружению.

Одним из искусственных объектов, подлежащих обнаружению, может быть поверхность с лакокрасочным покрытием (различного рода гражданская и военная техника, жилые и производственные постройки и т.п., расположенные на естественном фоне).

Экспериментальные исследования. Для определения контраста в соответствии с (2) необходимы априорные сведения о поляризационных характеристиках объекта и фона, причем достаточным условием является отличие по одному из параметров. Для проверки предположений и отработки методики измерений были исследованы поляризационные свойства образцов, представляющих собой дюралевые пластины (прокат), покрытые нитрозмалевым покрытием, выполненным по технологии естественного высыхания.

Исследования были выполнены на поляриметре, позволяющем осуществлять измерения по схеме нулевого метода [4]. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки (здесь

1 — лазер, 2 — четвертьволновая пластинка, 3 — поляризатор, 4 — модулятор фарадея, 5 — образец, 6 — анализатор, 7 — фотоприемник, 8 — узкополосный усилитель, 9 — осциллограф, 10 — звуковой генератор).

Состояние поляризации света в падающем пучке определяется тем, что в качестве излучателя используется газовый лазер с анизотропным активным элементом. Особенностью такого излучателя является высокая степень линейной поляризации генерируемого излучения. Установленная на пути такой световой волны четвертьволновая пластинка позволяет с помощью изменения ее азимута задаваться различными формами поляризации.

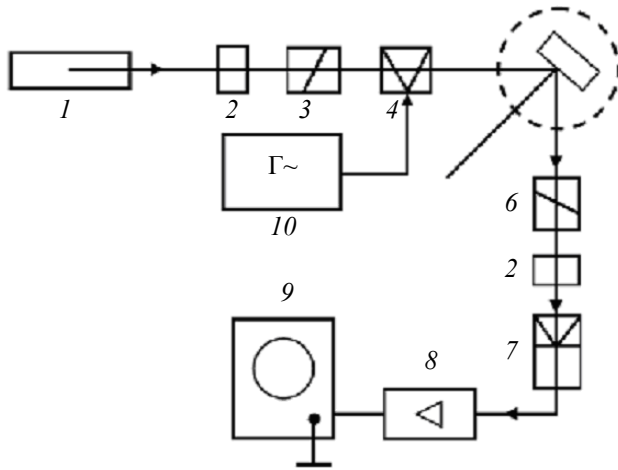


Рис. 1

После того как таким образом сформировано циркулярно-поляризованное излучение и на его пути линейный поляризатор, возникает возможность формировать в падающем луче различные формы линейно поляризованного излучения, отличающиеся значениями азимутов. Для анализа отраженного от исследуемого образца излучения используется гониометр с установленными на алидаде анализатором, четвертьволновой пластинкой и поляризационно-

нечувствительным фотоприемником. Анализатор может быть установлен с четырьмя значениями азимута $0, \pi/2$ и $\pi/4, -\pi/4$, фазовая пластинка может быть выведена из схемы измерений либо установлена с азимутами 0 и $\pi/2$. Нулевое положение элементов схемы определяется с помощью модулятора Фарадея и резонансного усилителя по известной методике наблюдения в составе регистрируемого фототока наличия или отсутствия первой гармоники [4].

Матрица рассеяния рассматриваемых образцов может быть представлена в виде

$$M = \begin{vmatrix} 1 & m_{12} & 0 & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{44} \end{vmatrix}, \quad \begin{aligned} \tilde{m}_{ij} &= \frac{m_{ij}}{m_{11}}, \\ m_{21} &= m_{12}. \end{aligned} \quad (3)$$

Экспериментально выявленная зависимость элементов матрицы рассеяния от угла наблюдения, представленная в таблице для двух образцов, позволяет определить характер изменения отдельных параметров Стокса при отражении света с различными типами и формами поляризации в соответствии со следующим правилом:

$$S_1 = I_x + I_y, \quad S_2 = I_x - I_y, \quad S_3 = I_{\pi/4} - I_{-\pi/4}, \quad S_4 = I'_{\pi/4} - I'_{-\pi/4},$$

где I_i — интенсивность пучка света, прошедшего определенным образом ориентированные поляризационные элементы при выведенной из оптической схемы фазовой пластинке, I'_i — при введенной [5].

θ, \dots°	m_{12}		m_{22}		m_{33}		m_{44}	
	1	2	1	2	1	2	1	2
-25	0,04	0,05	0,2	0,25	-0,18	-0,16	-0,1	-0,01
0	-0,05	-0,05	0,25	0,29	-0,2	-0,22	-0,11	-0,09
25	-0,37	-0,33	0,5	0,51	-0,16	-0,17	0	-0,09
56	-0,36	-0,48	0,72	0,77	0,09	0,12	0,11	0,14
72	0,06	0	0,6	0,59	0,1	-0,06	0,12	-0,04

Для исследования выбирались наиболее распространенные нитроэмалевые защитные покрытия, выполненные при различных температурных режимах.

На рис. 2 представлен пример рассчитанной зависимости изменения второго параметра Стокса S_2 от угла наблюдения θ при отражении света от образца № 1 для различных состояний поляризации света в падающем пучке: 1 — горизонтальная линейная $\{1,1,0,0\}$, 2 — линейная с азимутом $\pi/4$ $\{1,0,1,0\}$, 3 — циркулярно-поляризованное излучение $\{1,0,0,1\}$.

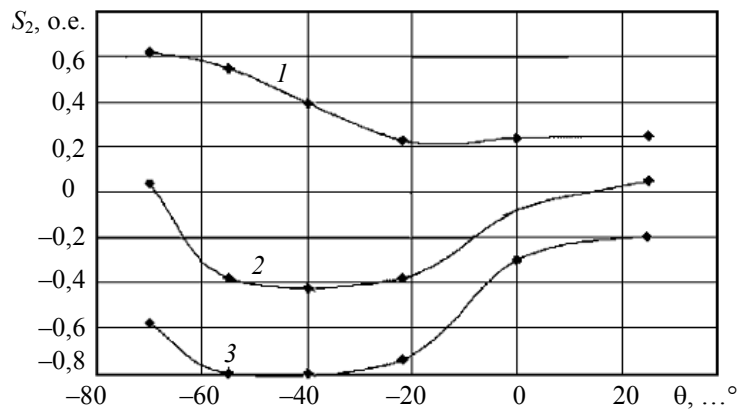


Рис. 2

Результаты демонстрируют ярко выраженную зависимость поляризационных характеристик полностью поляризованной компоненты отраженного света от угла наблюдения, при этом различие в поведении изменения отдельных параметров особо заметно в диапазоне 40—50°. К сожалению, использовать это различие для повышения достоверности обнаружения объекта не всегда возможно. Действительно, свойства отражающих поверхностей часто таковы, что доля полностью поляризованной компоненты после отражения даже полностью поляризованного света становится ничтожной. В этом случае особую важность может иметь такая поляризационная характеристика, как степень поляризации света. Пример расчета зависимости степени поляризации (K) света, отраженного исследуемыми образцами, от угла падения, в сравнении с данными работы [6] представлен на рис. 3. (Поляризация падающего света: a — линейная; азимут $\pi/4$, b — естественная, $\lambda = 520$ нм, угол падения 70° . 1 — образец № 1; 2 — 2; 3 — земля; 4 — пустыня; 5 — речной песок.)

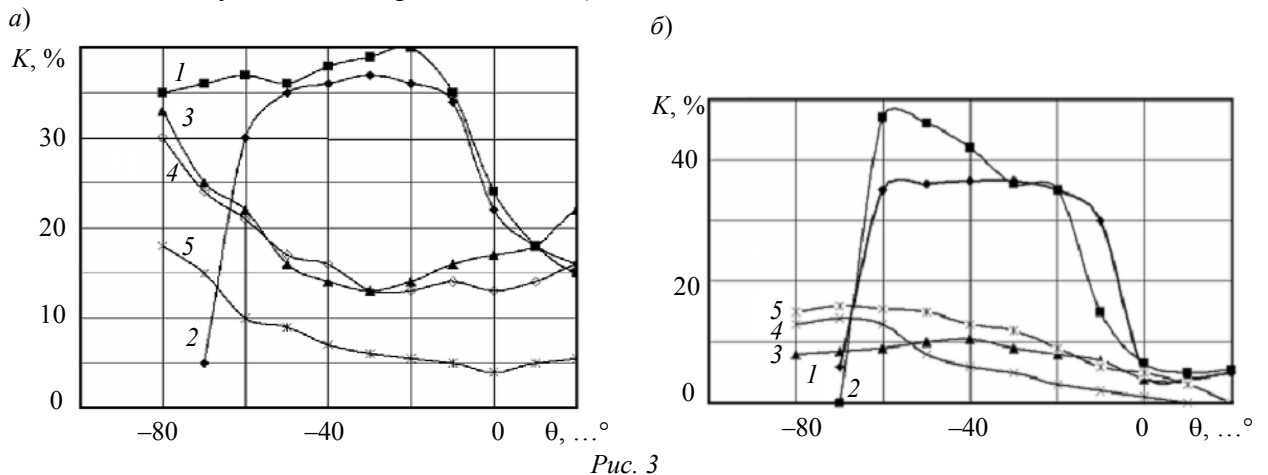


Рис. 3

Для широкой области углов наблюдения было выявлено заметное различие степени поляризации света, отраженного от естественных объектов и исследуемых образцов. В среднем эти различия составляют 30 % для диапазона углов в 45° , при этом значение контраста порядка 2,5—3, что, безусловно, позволяет использовать этот фактор в целях повышения вероятности обнаружения.

Рассмотрена возможность построения изображения объекта на основе поляризационного контраста с подстилающей средой (фоном). Для обоснования сделанного предположения выполнены измерения параметра поляризации света, отраженного от нитроэмалевого покрытия,

позволившие обработать методику измерений и рассмотреть различие поляризационных характеристик образцов и естественных покрытий. Установленные различия могут быть использованы для повышения вероятности обнаружения объектов с нитроэмалевыми покрытиями на фоне подстилающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волохатюк В. А. Вопросы оптической локации. М.: Сов. радио, 1971.
2. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.
3. Орлов В. М. Элементы теории светорассеивания и оптическая локация. Новосибирск: Наука, 1982.
4. Гориков М. М. Эллипсометрия. М.: Сов. радио, 1974. 200 с.
5. Дитчберн Р. Физическая оптика. М.: Наука, 1965. 632 с.
6. Шутов А. М. Методы оптической спектрополяриметрии. М.: КомКнига, 2006. 232 с.

Сведения об авторах

- Сергей Андреевич Алексеев** — Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики, E-mail: asast@mail.ru
- Сергей Александрович Кононов** — Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики, E-mail: sergei_kononov@yahoo.com
- Константин Геннадьевич Секарин** — Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики
- Владимир Анатольевич Трофимов** — Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики, E-mail: troftu@mail.ru

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию
03.03.08 г.

В. Т. ПРОКОПЕНКО, И. А. ХРАМЦОВСКИЙ, В. С. ЗЕМЛЯНСКИЙ,
Ю. В. ЛИСИЦЫН, К. Г. СЕКАРИН

ЭЛЛИСОМЕТРИЯ ОПТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Рассмотрены методы эллисометрического анализа поляризационно-оптических свойств элементов оптоэлектроники в бесклеевых оптических соединениях. Представлены методы диагностики напряженно-деформированного состояния элементов и определения их оптических характеристик в зоне оптического контакта неоднородных поверхностных слоев.

Ключевые слова: эллисометрия, оптические соединения, элементы оптоэлектроники.

Важным моментом при создании и усовершенствовании оптико-электронных приборов различного функционального назначения, и в частности, для эндоскопов технического и медицинского назначения [1, 2], где используются оптические системы с градиентными и волоконно-оптическими элементами, является крепление оптических деталей. Это связано с тем, что качество изображения, передаваемое оптической системой, существенно зависит от способа соединения элементов в оптических узлах прибора [3—6]. В оптическом приборостроении применяют в основном два вида соединений элементов оптоэлектроники: разъемные и неразъемные, которые, в свою очередь, подразделяют на клеевые (оптический контакт, ОК) и бесклеевые (глубокий оптический контакт, ГОК).

Свойства и характеристики клеевых соединений были достаточно подробно изложены в ряде работ [5, 6], где отмечалось, что закрепление деталей в оптических узлах прибора посредством специальных оправ или применение клеевых соединений, не удовлетворяющих требованиям современного оптического приборостроения, может приводить к напряженно-деформированному состоянию элементов, появлению оптических аберраций и искажению цветопередачи при трансляции изображений оптическими узлами. Следует также отметить, что в ряде изделий оптоэлектроники, медицинской и лазерной техники недопустимо присутствие адгезионных (клеевых) слоев. В таких случаях применение бесклеевых соединений становится актуальным и технически необходимым.

Бесклеевые соединения часто описывают фрагментарно с учетом области их применения, особенностей оптического производства и используемых методов исследования их оптических характеристик [1—4], не учитывая при этом влияния поверхностного слоя (ПС) деталей, физико-химические свойства которого определяются технологией ее обработки и могут оказывать существенное влияние на качество самого оптического соединения (ОС) элементов оптоэлектроники и функциональные возможности оптического узла в целом.

Цель настоящей работы состоит в усовершенствовании поляризационных методов анализа напряженно-деформированного состояния элементов в их оптических соединениях и разработке эллисометрических методов технологического контроля качества оптического узла, учитывающего физико-химические свойства неоднородных поверхностных слоев элементов, предназначенных для создания бесклеевых соединений.

Успешное применение эллисометрических методов технологического контроля качества оптических соединений элементов оптоэлектроники связано с решением целого ряда взаимосвязанных задач, в том числе: выбора метода математического моделирования напряженно-деформированного и физико-химического состояния многослойной системы „однородная подложка (ОП₁)—неоднородный слой (ПС₁)—зона оптического контакта (ЗОК)

поверхности элементов (I, II)—неоднородный слой (ПС₂)—однородная подложка (ОП₂)“ и методики определения ее поляризационно-оптических характеристик, которые, в общем случае, должны решаться в рамках теории эллипсометрии неоднородных анизотропных оптических систем [7—10]. На рис. 1 представлены схемы анализа напряженно-деформированного состояния и поляризационно-оптических характеристик оптических соединений элементов оптоэлектроники методами просветной (а), отражательной (б) эллипсометрии и методом секционирования (в).

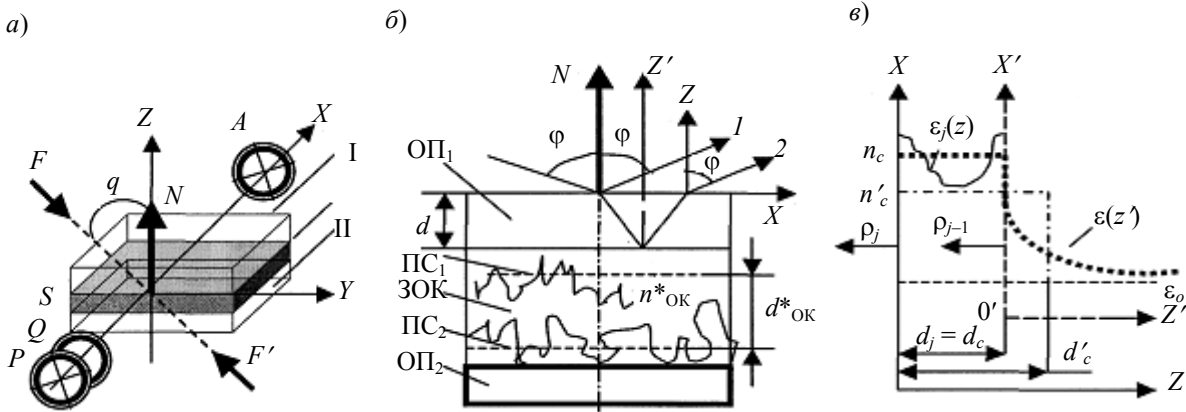


Рис. 1

В интерференционных методах технологического контроля напряженно-деформированного состояния прозрачного изотропного диэлектрика, как правило, используется упрощенная модель плоскопараллельной пластинки одноосного кристалла, оптическая ось которого перпендикулярна световому пучку света и находится в плоскости ее параллельных поверхностей [11]. В пределах границ применимости теории упругой деформации и напряженного состояния оптической детали изменение показателя преломления $\Delta n(\sigma)$ для одноосного „растяжения“ или „сжатия“ в первом приближении будет пропорционально величине напряжения σ [11]:

$$n - n_{pN} = \Delta n_{pN} = \pm C_1 \sigma, \quad n - n_{sN} = \Delta n_{sN} = \pm C_2 \sigma, \quad (1)$$

где n — показатель преломления силикатного стекла; n_{pN} , n_{sN} — показатели преломления для поляризованного света с электромагнитными колебаниями, параллельными (p) и перпендикулярными (s) направлению действия напряжений; C_2 и C_1 — фотоупругие постоянные стекла для тех же направлений электромагнитных колебаний. В теории упругой деформации детали напряжения „сжатия“ принято считать отрицательными, а напряжения „растяжения“ — положительными.

Метод эллипсометрии обладает высокой чувствительностью к изменению двулучепреломления $\Delta n = n_{pN} - n_{sN}$, вызванного напряженно-деформированным состоянием детали в оптическом узле и позволяет определить направление воздействия напряжений q (или механической нагрузки F) в области зоны ОС деталей (рис. 1, а). Для прозрачных изотропных диэлектриков, находящихся в напряженно-деформированном состоянии, измерение основных эллипсометрических параметров — азимута линейной восстановленной поляризации Ψ и разности фаз Δ между p - и s -компонентами светового пучка — можно проводить как в прошедшем, так и в отраженном световом пучке. Наибольшей точности измерения поляризационных параметров можно достичь при использовании метода „нулевой“ (компенсационной) эллипсометрии, суть которого состоит в том, что азимуты поляризующих элементов прибора (поляризатора P , компенсатора Q , анализатора A) фиксируются в момент „гашения“ светового пучка, прошедшего оптическую схему прибора и объект измерения S (рис. 1, а). Тогда поляризационные характеристики объекта S можно определить в результате решения нелинейного уравнения [7]:

$$-\operatorname{tg}A_1 = \rho_s [\rho_c + \operatorname{tg}Q_1 \operatorname{tg}P_1] [\rho_c \operatorname{tg}Q_1 - \operatorname{tg}P_1]^{-1}, \quad (2)$$

$$A_1 = A - q, \quad Q_1 = Q - q, \quad P_1 = Q - P, \quad \rho_s = \left| \frac{T_s^{(p)}}{T_s^{(s)}} \right| \exp i\delta_s, \quad \rho_c = \left| \frac{T_c^{(p)}}{T_c^{(s)}} \right| \exp i\delta_c. \quad (3)$$

Здесь $T_c^{(p,s)}$, $T_s^{(p,s)}$ и δ_c , δ_s — коэффициенты пропускания и разность фаз между p - и s -поляризацией светового пучка соответственно для компенсатора Q и объекта S ; q — ориентация главной плоскости падения светового пучка в анизотропной оптической системе [10], где значение угла q определяет направление действия сил F „растяжения“ или „сжатия“ относительно нормали N к поверхности элементов в оптическом соединении (рис. 1, a , линия FF). Из условия равенства нулю мнимой части уравнения (1), при азимуте ориентации осей компенсатора относительно плоскости падения светового пучка (плоскость XOZ) $Q = \pm\pi/4$ и значении $\rho_c = i$, основные эллипсометрические параметры объекта исследования (δ_s , q) при нормальном падении светового пучка вдоль зоны ОС деталей определяются соотношениями:

$$q = (0,5 \operatorname{tg}[-\cos 2A(\sin 2A + \sin 2P)^{-1}]); \quad \delta_s = \operatorname{arctg}[-(\operatorname{tg} 2P \cos 2q)^{-1}]. \quad (4)$$

Для модели напряженно-деформированного состояния изотропного прозрачного диэлектрика, представленной в виде плоскопараллельной пластинки одноосного кристалла, фазовый сдвиг определяется как $\delta_s = \delta_{s,0} + \delta_1$, где поправка δ_1 учитывает многократные отражения от поверхностей объекта исследования [8]. При малой величине Δn_{pN} и Δn_{sN} значение фазового параметра $\delta_{s,0} \gg \delta_1$, тогда для определения величины напряжений σ в оптическом соединении деталей можно использовать следующие соотношения:

$$\Delta n_{p,s} = n_{pN} - n_{sN} = \pm(C_1 - C_2)\sigma = B\sigma = \delta_{s,0} / (k_0 L), \quad k_0 = 2\pi / \lambda, \quad (5)$$

где B — оптический коэффициент напряжений; λ — длина волны излучения; L — длина объекта измерений S вдоль оси X (рис. 1, a).

Для оценки качества ОС элементов оптоэлектроники при различных технологических условиях их изготовления и оптического узла в целом определение поляризационно-оптических характеристик можно проводить двумя путями: методом секционирования и физико-математического моделирования структуры неоднородной системы, используя при этом модели „эффективной подложки“ или „эффективного слоя“ [8, 9]. В методе „эффективной подложки“ многослойная система ПС₁—ЗОК—ПС₂—ОП₂ (рис. 1, b , луч 2) описывается эффективным показателем преломления N_{OC}^* , который для анизотропной однородной подложки при $q \approx 0$ можно определить как $N_{OC}^* = \sqrt{n_{pN} n_{sN}}$. Критерием применимости данного способа моделирования оптической системы является условие [9]:

$$\Phi(N_{OC}^*) = (\rho_s + \cos 2\varphi_s)(R_s^{(s)} + R_s^{(p)} \cos 2\varphi_s)^{-1}, \quad \rho_s = R_s^{(p)} / R_s^{(s)} = \operatorname{tg}\Psi \exp(i\Delta), \quad (6)$$

где ρ_s , $R_s^{(p)}$, $R_s^{(s)}$ — эллипсометрическое отношение и коэффициенты отражения для p - и s -компоненты поляризованного света от оптического соединения; φ_s — угол падения светового пучка на оптическое соединение; Δ , Ψ — основные эллипсометрические параметры многослойной системы ПС₁—ЗОК—ПС₂—ОП₂. Для однородной изотропной подложки выполняется условие $|\Phi(N_{OC}^*)| = 1$ и отличие этого параметра для системы ПС₁—ЗОК—ПС₂—ОП₂ от единицы будет свидетельствовать о влиянии оптической неоднородности, анизотропии или шероховатости в ОС элементов. Экспериментальная ошибка измерения параметра, в пределах которой неоднородную отражающую систему можно заменить моделью „эффективной подложки“ — $\delta\Phi(N_{OC}^*) \sim 5 \cdot 10^{-4}$ [9].

В методе „эффективного слоя“ для системы ПС₁—ЗОК—ПС₂ вводятся эффективный показатель преломления $n^*_{\text{ОК}}$ и толщина $d^*_{\text{ОК}}$ неоднородной оптической системы (рис. 1, б). Физический смысл этих параметров состоит в том, что модель однородного слоя с параметрами $n^*_{\text{ОК}}$ и $d^*_{\text{ОК}}$ и оптическое соединение деталей по своим поляризационно-оптическим свойствам эквивалентны. В рамках этой модели ОК можно описывать анизотропные свойства оптического соединения деталей, используя при этом методы эллипсометрических измерений элементов нормированной матрицы отражения $M=(\rho_{pp}, \rho_{ps}, \rho_{sp})$ объекта S [10].

В общем случае эллипсометрические параметры элементов нормированной матрицы отражения $\rho_{pp}, \rho_{ps}, \rho_{sp}$ будут отличаться от измеренных значений $\rho^{\text{изм}}$ (рис. 1, б, луч 2) за счет преломления светового пучка на границах раздела „внешняя среда—ОП₁“ и „ОП₁—внешняя среда“ на величину эллипсометрического отношения $\rho^{(T)=T^{(p)}/T^{(s)}}$. При малой величине анизотропии однородной подложки ОП₁ ($\Delta n(p,s) \ll 10^{-6}$) и измеренном значении коэффициента эллиптичности отраженного светового пучка от однородной подложки ОП₁ (рис. 1, б, луч 1) эллипсометрические соотношения для нахождения параметров $\rho_{pp}, \rho_{ps}, \rho_{sp}$ имеют вид:

$$\rho_{pp}(\rho^{(T)})^2 = \rho_{pp}^{\text{изм}}, \quad \rho_{ps}\rho^{(T)} = \rho_{ps}^{\text{изм}}, \quad \rho_{sp}\rho^{(T)} = \rho_{sp}^{\text{изм}}, \quad (7)$$

$$\text{tg}\Psi^{(T)} = \left(\frac{n_o(U_o^{(s)} + U_B^{(s)})}{n_B U_o^{(s)} + n_o^2 \cos\varphi} \right), \quad \Delta^{(T)} = \pm 4\chi \frac{n_B(n_o^2 - n_B^2) \sin^2\varphi}{\sqrt{n_B^2 + n_o^2} (n_o^2 \cos^2\varphi + n_B U_o^{(s)})}, \quad (8)$$

$$U_B^{(s)} = \sqrt{\varepsilon_B} \cos\varphi, \quad U_o^{(s)} = (\varepsilon_o - \varepsilon_B \sin^2\varphi)^{1/2}, \quad (9)$$

где n_B, n_o — показатель преломления внешней среды и однородной подложки; φ — угол падения светового пучка; χ — эллиптичность светового пучка, отраженного от ОП₁ при угле Брюстера $\varphi_B = \arctg(n_o/n_B)$ (при изменении угла падения светового пучка $\varphi > \varphi_B$ значение $\Delta^{(T)} > 0$ и при $\varphi < \varphi_B$ — $\Delta^{(T)} < 0$ [10]). В том случае, когда главная плоскость анизотропной системы совпадает с плоскостью падения светового пучка, т.е. при $q \approx 0$, параметры $\rho_{ps} = \rho_{sp} = 0$, а эллипсометрическое отношение ρ_s , входящее в уравнение (2), определяется как

$$\rho_s = \rho_{pp} = R^{(p)} / R^{(s)} = \text{tg}\Psi \exp(i\Delta), \quad \text{tg}\Psi = \text{tg}\Psi^{\text{изм}} / (\text{tg}\Psi^{(T)})^2, \quad \Delta = \Delta^{\text{изм}} \mp \Delta^{(T)}. \quad (10)$$

Для детального анализа поляризационно-оптических свойств соединений элементов оптоэлектроники целесообразно использовать метод секционирования многослойной оптической системы (рис. 1, в), сущность которого состоит в том, что оптические параметры каждого j -го слоя в системе ПС₁—ЗОК—ПС₂—ОП₂ определяются по параметрам ρ_{j-1} и ρ_j , измеряемым в процессе синтеза многослойной оптической системы (например, до и после нанесения пленки (клеявого слоя) на однородную подложку с диэлектрической проницаемостью ε_o).

Уравнение эллипсометрии для неоднородной подложки, т.е. при наличии неоднородного ПС с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(z)$ в системе координат $X'Y'Z'$ (рис. 1, в), т.е. до нанесения неоднородного слоя с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_j(z)$ описывается выражением [12]:

$$\rho_{j-1} = \rho_o(1 + ik_o A_o \Phi_1(p)), \quad \rho_o = (\text{tg}^2\varphi U_B^{(s)} - U_o^{(s)})(\text{tg}^2\varphi U_B^{(s)} + U_o^{(s)})^{-1}, \quad (11)$$

$$\Phi_1(p) = \int_0^\infty (\varepsilon(z') - \varepsilon_o)(\varepsilon(z') - \varepsilon_B) \varepsilon^{-1}(z') \exp(-i2k_o U_o^{(s)} z') dz', \quad (12)$$

$$A_o = 2\varepsilon_o \text{tg}^2\varphi U_B^{(s)} \left([\text{tg}^4\varphi (U_B^{(s)})^2 - (U_o^{(s)})^2] (\varepsilon_o - \varepsilon_B) \right)^{-1}. \quad (13)$$

Уравнение эллипсометрии для отражающей системы „неоднородный слой—неоднородная подложка“ в системе координат XYZ (рис. 1, ϵ) можно записать как

$$\rho_j = \rho_0 [1 + ik_0 A_0 (\Phi_j(p) + \Phi_2(p))], \quad (14)$$

$$\Phi_2(p) = \int_{d_j}^{\infty} (\epsilon(z) - \epsilon_0)(\epsilon(z) - \epsilon_B) \epsilon^{-1}(z) \exp(-i2k_0 U_0^{(s)} z) dz, \quad (15)$$

где

$$\Phi_j(p) = \int_0^{d_j} (\epsilon_j(z) - \epsilon_0)(\epsilon_j(z) - \epsilon_B) \epsilon_j^{-1}(z) \exp(-i2k_0 U_0^{(s)} z) dz.$$

Поскольку по осям Z и Z' координаты связаны соотношением $z' = z - d_j$, то используя замену переменной в уравнении (16) и учитывая при этом, что вид оптического профиля $\epsilon(z)$ неоднородной подложки в системах координат $X'Y'Z'$ и XYZ не изменяется, получим тождество

$$\Phi_1(p) = \Phi_2(p) \exp(i2k_0 U_0^{(s)} d_j). \quad (16)$$

Тогда из формул (11)—(16) после несложных математических преобразований можно получить уравнение эллипсометрии для многослойной системы:

$$\Phi_j(p) = (ik_0 A_0 \rho_0)^{-1} [(\rho_j - \rho_0) - (\rho_{j-1} - \rho_0) \exp(i2k_0 U_0^{(s)} d_j)]. \quad (17)$$

Полученное уравнение непосредственно связывает оптические характеристики j -го слоя с эллипсометрическими параметрами ρ_j и ρ_{j-1} , и для его решения не требуется априорной информации о виде оптического профиля ПС $\epsilon(z)$. Однако при анализе многослойной системы в качестве модели неоднородного ПС использовался профиль показателя преломления $n(z)$, описываемый зависимостью

$$n(z) = [n_0^2 + (n_q^2 - n_0^2) F(qz)]^{1/2}, \quad (18)$$

$$F(qz) = F_1(q_1 z) F_2(q_2 z), \quad F_1(q_1 z) = (1 - q_1 z), \quad F_2(q_2 z) = \exp(-q_2 z). \quad (19)$$

Здесь n_0 — показатель преломления стекла; n_q — показатель преломления ПС при $z = 0$, где z — координата оптической оси, направленной в глубь ПС; q_1, q_2 — характеристические параметры ПС, где при $q_1 = 0$ зависимость $n(z)$ является экспоненциальной, а при $q_2 = 0$ — линейной. В общем случае функция $n(z)$ имеет экстремум, значение которого при $q_1 = q_2 = q$ определяется как $n_{\max, \min} = [n_0 - (n(0) - n_0)/e^2]$ при характеристической толщине $d_q = 2/q$. Численный эксперимент при $q_1 = 0$ показал, что отсутствие влияния неоднородного ПС на измеряемые параметры Ψ_j и Δ_j приводит к значениям n_c' и d_c' системы „неоднородный слой—неоднородная подложка“, отличным от истинных значений параметров слоя n_c и d_c (рис. 1, ϵ). На рис. 2 представлены ошибки в расчете показателя преломления δn (a) и относительной толщины $\delta d/d_c$ (b) однородного слоя, находящегося на неоднородной подложке кварцевого стекла, приведена схема измерений характеристик оптического соединения (ϵ) элементов из стекла К8 (см. таблицу) (a, b — при оптическом контрасте $\delta n = n_c - n_q$: 1 — $2 \cdot 10^{-3}$; 2 — $8 \cdot 10^{-3}$; 3 — $12 \cdot 10^{-3}$; 4 — $16 \cdot 10^{-3}$). При этом, если оптический контраст $\delta n = n_c - n_q$, т.е. различие между показателем преломления слоя n_c и ПС подложки n_q , мал, то основная ошибка расчета параметров слоя будет возникать при определении толщины $\delta d = (d_c' - d_c)/d_c$ (рис. 2, b). При относительно большом оптическом контрасте δn возникает ошибка расчета показателя преломления $\delta n = n_c' - n_c$ (рис. 2, a). Применение метода секционирования, основанного на уравнении эллипсометрии (18), позволяет избежать методической ошибки при расчете оптических параметров однородного слоя n_c и d_c , находящегося на неоднородной подложке с профилем $\epsilon(z)$.

Зона ОС (рис. 2, в)	Элемент ОС	Угол измерения φ, \dots°	Поляризационные параметры		Оптические параметры	
			Δ, \dots°	Ψ, \dots°	n	$d, \text{мкм}$
1	ПС ₁	50	179,17	10,09	1,5211	0,197
		60	1,05	5,14	1,5192	0,183
2	I (ПС ₂)	50	180,17	10,13	1,5181	0,096
		50	185,18	11,05	1,0342 (1,0601)	0,190 (0,229)
2	II (ПС ₂)	60	1,55	5,16	1,5058	0,064
		60	9,53	6,18	0,9785 (0,9661)	0,235 (0,225)
3	II (ПС ₁)	60	1,21	5,13	1,4975	0,064
		60	358,53	12,30	1,4024 (1,4–1,43)*	0,131 (40–60Å)*

Примечание: В скобках указаны значения n и d без учета параметров ПС₂; * — данные [4]; для II (ПС₁, ПС₂) значения n и d приведены для модели неоднородного ПС до получения ОС, где $n=n_q$ и $d=d_q$, для I (ПС₁, ПС₂) — для модели однородного ПС.

В таблице приведены поляризационно-оптические параметры в различных зонах оптических узлов элементов (рис. 2, в, луч 1—3), полученных из стекла К8 ($n_0=1,51466$), где до получения ОК деталей пучком ионов Ag^+ сделана выборка материала, глубина $d_{в2}$ которой контролировалась методом интерферометрии ($d_{и} \approx 0,3\text{—}0,4\lambda$) на приборе МИИ-4 с погрешностью $S_d \leq 0,03$ мкм. Оптические узлы отличаются физико-химическим состоянием поверхности элемента II в зоне выборки материала (рис. 2, в, луч 2), т.е. наблюдается изменение состояния поляризации отраженного светового пучка: для I характерна левоэллиптическая поляризация ($\pi < \Delta(\varphi) < 2\pi$), а для II — правоэллиптическая ($0 < \Delta(\varphi) < \pi$).

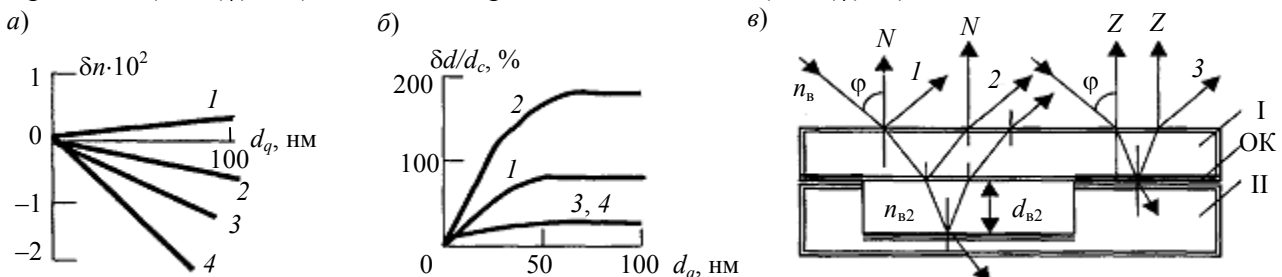


Рис. 2

Поляризационные параметры Δ и Ψ измерялись на приборе ЛЭФ-3М при $\lambda=0,6328$ мкм, где погрешность измерения азимутов поляризующих элементов составила $S_{P,A}=1'$, а установки угла падения светового пучка — $S_\varphi=0,5'$. Учет поляризационно-оптических свойств ПС₂ элемента II (уравнение (18)) приводит к уточнению значений параметров $n_{в2}$ и $d_{в2}$, где изменение глубины $d_{в2}$ находится в пределах ошибки измерения параметров Δ и Ψ , а $n_{в2} \rightarrow n_{в}$. В общем случае оптические параметры $n_{в2}$ и $d_{в2}$ выборки материала согласуются со значениями показателя внешней среды $n_{в2} \approx n_{в} = 1$ и толщиной $d_{в2} \approx d_{и}$, а значение показателя преломления в системе ПС₁—ЗОК—ПС₂—ОП₂ ($n_{ОК}=1,4024$) согласуется с данными [4].

На рис. 3 приведен оптический профиль ОС элементов (I, II) (а) и изменение профиля ПС при ионно-химической обработке стекла К8 в плазме CF_3Cl (хладон-13) (б) (а — для элементов II (ПС₁, ПС₂) с оптическими параметрами n_q и d_q (см. таблицу); б — при энергии пучка $E=1$ кэВ (1, 2) и 2 эВ (3, 4): кривая 1, 3 — высота снятого слоя $h=0,24$; 2, 4 — $h=1$ мкм).

Детальный анализ поляризационно-оптических свойств ОС показывает, что полученные значения параметров — показатель преломления $n_{ОК}^*$ и толщина $d_{ОК}^*$ — дают информацию не только о ЗОК толщиной $d_{ЗОК} \sim 30\text{—}60$ Å и показателем преломления $n_{ОК} \sim 1,4\text{—}1,43$ [4], но и сильно градиентной области ПС элементов, прилегающей к области непосредственного оптического контакта поверхности деталей 1 и 2 (рис. 3, а). Поэтому параметры $n_{ОК}^*$ и $d_{ОК}^*$

можно использовать как количественную оценку так называемого „обобщенного критерия качества“ оптических соединений элементов оптоэлектроники, поскольку их значения определяют характеристики ОС в целом, т.е. с учетом физико-химических и оптических свойств ПС элементов, находящихся в оптическом контакте. Отметим, что для получения ОК деталей необходимо иметь в приповерхностной области ультрамикropористую структуру кремнезема, которую можно получить не только жидкостным химическим травлением силикатного стекла, но и ионно-химической обработкой поверхности элементов оптоэлектроники в плазме CF_3Cl (рис. 3, б).

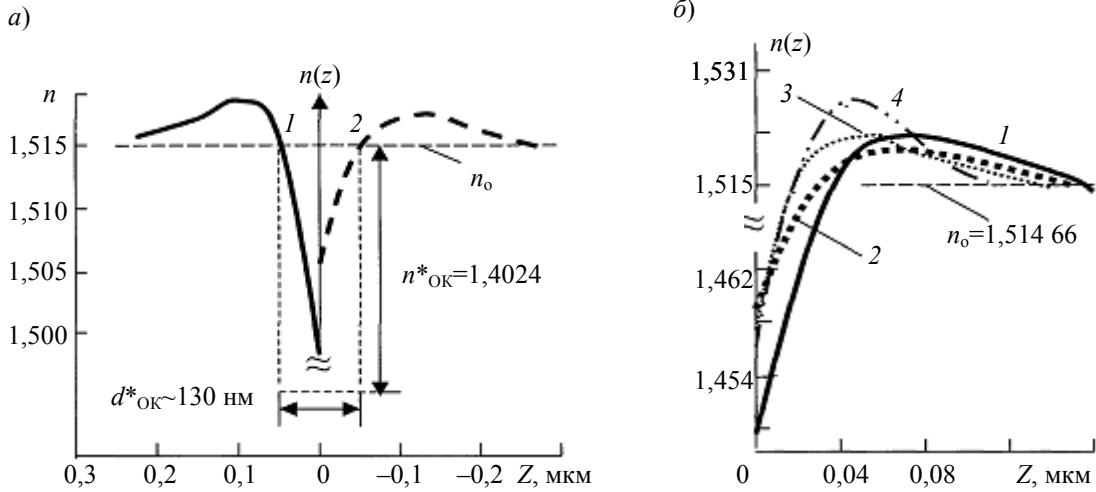


Рис. 3

Распределение величины напряжений $\sigma(y)$ в зоне оптического соединения деталей, выполненных из стекла К8, осуществлялось путем сканирования вдоль оси Y (рис. 1, а) световым пучком диаметром $D \sim 1$ мм приповерхностной области ОК. Естественно, что в этом случае оценивается напряженно-деформированное состояние в ОК одной из деталей. Однако по характеру изменения величины напряжений $\sigma(y)$ вдоль оптического соединения деталей можно качественно судить о технологических особенностях его получения и прогнозировать функциональные возможности оптического узла в целом.

В частности, на рис. 4 показаны два типа соединений оптических элементов, полученных методом ОК и различающихся характером напряженно-деформированного состояния.

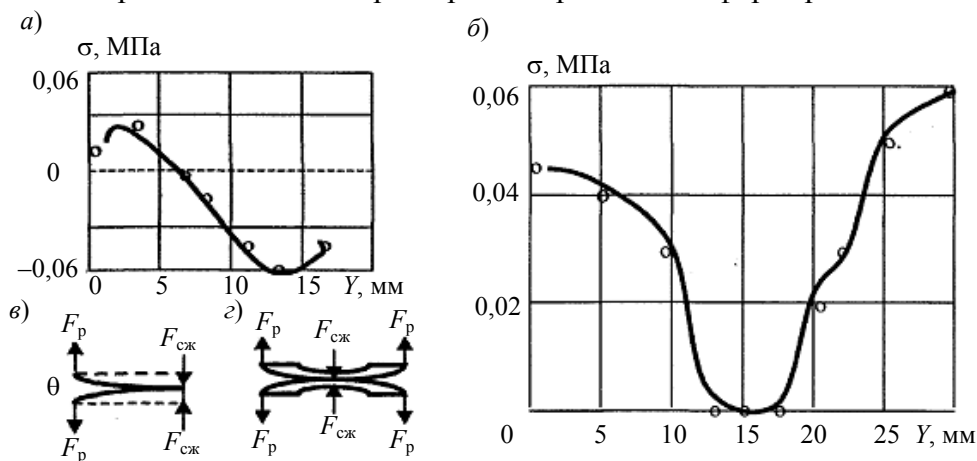


Рис. 4

Если в первом случае (рис. 4, а) характерным является, что на одном краю ОС деталей наблюдаются напряжения „сжатия“ ($\sigma < 0$), а на другом краю — напряжения „растяжения“ ($\sigma > 0$), то для другого ОС элементов в центральной зоне наблюдаются напряжения „сжатия“ ($\sigma \leq 0$), а концах — напряжения „растяжения“ ($\sigma > 0$) (рис. 4, б). В последнем случае такое изменение $\sigma(y)$ может иметь место при сопряжении двух поверхностей деталей, имеющих отклонение от

плоскостности ($N, \Delta N$), характерное для выпуклой поверхности деталей (рис. 4, *з*), где после релаксации исходного напряженно-деформированного состояния элементов, возникающего при получении ОС путем сжимающих силовых нагрузок $F_{сж}$, упругие внутренние напряжения приведут к появлению растягивающих оптическое соединение сил F_p . Знакопеременный характер изменения $\sigma(y)$ можно отнести к ОС деталей, поверхности которых имеют клиновидность θ (рис. 4, *в*). Естественно, что напряженно-деформированное состояние оптических соединений будет определяться не только микрогеометрией поверхности деталей, но и физико-химическим состоянием ПС, которое оценивается по поляризационно-оптическим параметрам, определяемым в соответствии с представленной методикой эллипсометрического анализа многослойной системы.

Таким образом, для введенных оптических характеристик зоны контакта поверхности элементов оптоэлектроники несложно установить корреляционные связи между технологическими режимами обработки поверхности деталей и физико-химическими свойствами ПС элементов, используемых для их оптического соединения. Это позволяет по предложенной методике эллипсометрического анализа оптических свойств ОС и его параметрам давать объективную оценку технологии изготовления оптического узла многоэлементной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архипова Л. Н., Ивашевский С. Н., Караетян Г. О.* и др. Градиентная оптика для медицинских эндоскопов // Оптич. журн. 1994. № 12. С. 51—54.
2. *Васильева В. И., Петровский Г. Т., Черных В. Д., Ягмуров В. Х.* Гибкие регулярные элементы для эндоскопии // Оптич. журн. 1994. № 12. С. 55—57.
3. *Обреимов И. В., Трехов Е. С.* Оптический контакт полированных стеклянных поверхностей // ЖЭТФ. 1957. Т. 32, вып. 2. С. 185—192.
4. *Абаев М. И., Лисицын Ю. В., Путилин Э. С.* Исследование зоны оптического контакта стеклянных поверхностей методом эллипсометрии // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 4, вып. 24. С. 1505—1507.
5. *Герасимов С. Ю., Компалова Л. А., Торбин И. Д.* Прозрачность оптических клеев // ОМП. 1987. № 9. С. 40—44.
6. *Левинок В. Е.* Влияние условий полимеризации однокомпонентного оптического клея на свойства склеивающего слоя // ОМП. 1980. № 6. С. 24—26.
7. *Горшков М. М.* Эллипсометрия. М.: Сов. радио. 1974. 200 с.
8. Эллипсометрия — метод исследования поверхности / Под ред. *А. В. Ржанова*. Новосибирск: Наука, 1983. 180 с.
9. Эллипсометрия: теория, методы, приложение / Под ред. *А. В. Ржанова и Л. А. Ильина*. Новосибирск: Наука, 1987. 192 с.
10. *Филиппов В. В., Тронин А. Ю., Константинов А. Ф.* Эллипсометрия анизотропных сред // Физическая кристаллография. М., 1992. С. 254—289.
11. *Березина Е. Е.* Фотоупругие постоянные оптических стекол // Оптич. журн. 1994. № 7. С. 38—39.
12. *Пшеницын В. И., Храмовский И. А., Крылова Н. А., Подсекаев А. В., Туркбоев А.* Эллипсометрия отражающей системы неоднородный слой—неоднородная подложка // Методы прикладной математики в транспортных системах / Под ред. *Ю. М. Кулибанова*. СПб, 2000. Вып. 3. С. 32—37.

Сведения об авторах

- Виктор Трофимович Прокопенко** — Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики, сл. тел. (812) 595-41-26
- Игорь Анатольевич Храмовский** — Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики
- Владимир Сергеевич Землянский** — Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики

- Юрий Васильевич Лисицын** — Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики
- Константин Геннадьевич Секарин** — Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию
23.03.06 г.

УДК 535.548.0

А. В. СЮЙ, Н. А. КРАВЦОВА, В. И. СТРОГАНОВ, В. В. КРИШТОП

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЛИПСА ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Показаны простота, наглядность и информативность параметрического метода построения эллипса поляризации излучения, прошедшего через систему кристаллических пластинок. При наличии большого числа кристаллических пластинок целесообразно пользоваться параметрическим методом для определения вида поляризации. С помощью двух и более кристаллических пластинок можно настраивать систему на любую длину волны для задания вида поляризации с требуемыми характеристиками путем поворота кристаллических пластинок относительно направления пропускания поляризатора.

Ключевые слова: эллипс поляризации, параметрический метод, кристаллическая пластинка, обыкновенный/необыкновенный луч, направление пропускания, показатель преломления.

Методы определения характеристик излучения, прошедшего через одну или две кристаллические пластинки, описаны в работах [1—10]. Вид поляризации света, прошедшего через фазовую пластинку, можно определить по сфере Пуанкаре [1, 2]. Но такой метод не позволяет получать значения таких характеристик поляризованного света, как эллиптичность и степень поляризации. Если используется монохроматический свет, то удобно пользоваться методом, предложенным Стоксом, так называемым вектором Стокса [1—6]. Но этот метод характеризуется большим числом элементов в матрице, а при увеличении числа оптических элементов в системе значительно усложняются расчеты. При наличии большого числа оптических элементов и использовании монохроматического излучения предпочтительнее пользоваться для расчетов матрицами Джонса, так как они менее громоздки и достаточно просты в вычислениях [1, 7]. Вышеперечисленные методы не обладают одновременно наглядностью (как в сфере Пуанкаре), простотой вычислений и точностью определения параметров поляризованного света, прошедшего через оптическую систему (как вектор Стокса и метод Джонса).

Рассмотрим возможность применения параметрических уравнений световой волны E для получения поляризационных характеристик излучения, прошедшего через систему кристаллических пластинок. Параметрический способ в некоторых случаях является более удобным и наглядным, по сравнению с другими [2, 3, 7], особенно когда рассматривается система, состоящая из большого числа пластинок.

Если пластинка одна, на выходе из нее за счет двулучепреломления возникают два луча (обыкновенный и необыкновенный), если две, то на выходе будет 4 луча; три — 8 лучей; четыре — 16 и т.д. Взаимодействие лучей на выходе из системы пластинок определяет вид поляризации прошедшего излучения. Если пользоваться тригонометрическими формулами для описания поляризации излучения, то уже в случае двух пластинок результирующее выражение становится громоздким [10]. Использование параметрических уравнений обеспечивает

простоту и наглядность вычислений и позволяет определять формы поляризации излучения, прошедшего через систему кристаллических пластинок.

Рассмотрим вычисления для одной кристаллической пластинки [8, 9]. Пластинка вырезана из одноосного кристалла параллельно оптической оси. Линейно поляризованный свет, вышедший из поляризатора, падает на пластинку перпендикулярно оптической оси, расположенной под углом α к направлению пропускания поляризатора.

За счет двулучепреломления световой луч в пластинке разбивается на два с взаимно ортогональными поляризациями (обыкновенный и необыкновенный).

Компоненты вектора напряженности электрического поля излучения, прошедшего через пластинку, изменяются по следующему закону:

$$E_1 = E^e \cos(\omega t + \delta_1), \quad (1)$$

$$E_2 = E^o \cos(\omega t + \delta_2), \quad (2)$$

где δ_1 и δ_2 — фаза для необыкновенного и обыкновенного лучей непосредственно у выходной грани пластинки ($E^e = E_0 \cos \alpha$; $E^o = E_0 \sin \alpha$).

Обозначив через $\delta = \delta_2 - \delta_1$ разность фаз для обыкновенного и необыкновенного лучей, получим

$$E_1 = E^e \cos \omega t = E_0 \cos \alpha \cos \omega t, \quad (3)$$

$$E_2 = E^o \cos(\omega t + \delta) = E_0 \sin \alpha \cos(\omega t + \delta). \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) являются параметрическими уравнениями эллипса поляризации для излучения, выходящего из пластинки. Положение конца вектора E на эллипсе поляризации в каждый момент времени задается точкой (E_1, E_2) в системе координат, связанной с главными осями пластинки (E_1 — направлен вдоль оптической оси ZZ , E_2 — по нормали XX к оптической оси). Для построения эллипса поляризации задаем значения параметра ωt , изменяющегося в пределах от 0 до 2π . Вычисления проводятся для заданного угла α . Наносим точки E_1 и E_2 в системе координат (Z, X) и получаем эллипс поляризации (рис. 1, где Π — направление пропускания поляризатора; ZZ — оптическая ось пластинки; α — угол поворота кристаллической пластинки относительно направления пропускания поляризатора; E_1 и E_2 — значения напряженности электрических полей для необыкновенного и обыкновенного лучей (отсчитываются в относительных единицах)).

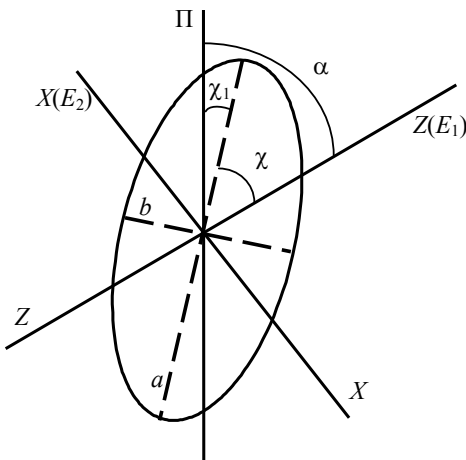


Рис. 1

Построенный таким образом эллипс поляризации позволяет определить эллиптичность γ через отношение его осей, угол наклона большой оси эллипса к оптической оси пластинки (азимут χ) или к направлению пропускания поляризатора (азимут χ_1), степень поляризации излучения P . Вычисления γ и P производится по формулам

$$\gamma = \arctg(b/a), \quad P = (1 - \operatorname{tg}^2 \gamma) / (1 + \operatorname{tg}^2 \gamma), \quad (5)$$

где a, b — большая и малая оси эллипса соответственно.

Азимут эллипса поляризации измеряется непосредственно по рисунку.

На рис. 2 показаны эллипсы поляризации, построенные с помощью параметрического метода, для одной фазовой пластинки при различных значениях α и разности фаз δ (a — $\delta = 90^\circ$; $\alpha = 30^\circ$; $\chi_1 = 33,7^\circ$; $P = 0,48$; $\gamma = 30,6^\circ$; b — $\delta = 45^\circ$; $\alpha = 30^\circ$; $\chi_1 = 4,6^\circ$; $P = 0,76$; $\gamma = 20,4^\circ$).

В случае двух пластинок на выходе из системы имеется четыре луча (рис. 3). Расположение векторов напряженности обыкновенной и необыкновенной волн в пластинках: $Z_1Z_1, X_1X_1, Z_2Z_2, X_2X_2$ — главные направления пластинок; α_1 — угол поворота второй пластинки относительно первой; E^e, E^o — векторы напряженности электрического поля необыкновенного и обыкновенного лучей за первой пластинкой; $E^{ee}, E^{eo}, E^{oe}, E^{oo}$ — векторы напряженности электрического поля необыкновенной и обыкновенной волн за второй пластинкой.

Параметрические уравнения колебаний, выходящих из системы волны, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E^{ee} \cos \omega t = E_0 \cos \alpha \cos \alpha_1 \cos \omega t, \\ E_2 &= E^{eo} \cos(\omega t + \delta_2) = E_0 \cos \alpha \sin \alpha_1 \cos(\omega t + \delta_2), \\ E_3 &= -E^{oe} \cos(\omega t + \delta_1) = -E_0 \sin \alpha \sin \alpha_1 \cos(\omega t + \delta_1), \\ E_4 &= E^{oo} \cos(\omega t + \delta_1 + \delta_2) = E_0 \sin \alpha \cos \alpha_1 \cos(\omega t + \delta_1 + \delta_2), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где ω — частота колебаний, δ_1, δ_2 — разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами в первой и второй пластинках соответственно

$$\delta_1 = 2\pi d_1 (n_1^o - n_1^e) / \lambda, \quad \delta_2 = 2\pi d_2 (n_2^o - n_2^e) / \lambda,$$

где d_1, d_2 — толщина пластинок, λ — длина волны; $n_1^o, n_1^e, n_2^o, n_2^e$ — показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волн первой и второй пластинок.

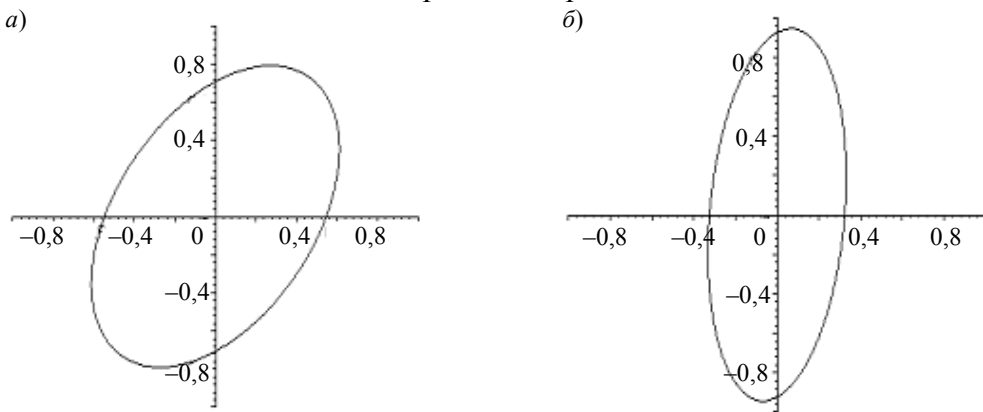


Рис. 2

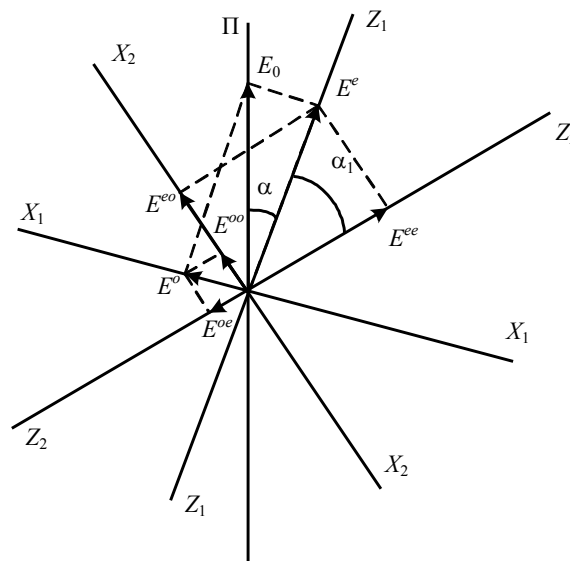


Рис. 3

Как и в случае с одной пластинкой, зададим значения параметра ωt , изменяющегося в пределах от 0 до 2π , $\alpha, \alpha_1, \delta_1, \delta_2$ и вычислим значения E_1, E_2, E_3, E_4 . Алгебраически сложив $E_1,$

E_3 и E_2 , E_4 , по полученным точкам можно построить кривую — эллипс поляризации в системе координат (Z_2 , X_2).

На рис. 4 показаны эллипсы поляризации излучения, выходящего из системы, построенные для двух пластинок параметрическим способом (a — $\alpha = 45^\circ$; $\alpha_1 = 30^\circ$; $\delta_1 = 30^\circ$; $\delta_2 = 135^\circ$; b — $\alpha = 60^\circ$; $\alpha_1 = 60^\circ$; $\delta_1 = 180^\circ$; $\delta_2 = 250^\circ$). Значения векторов E на графиках приведены в относительных единицах.

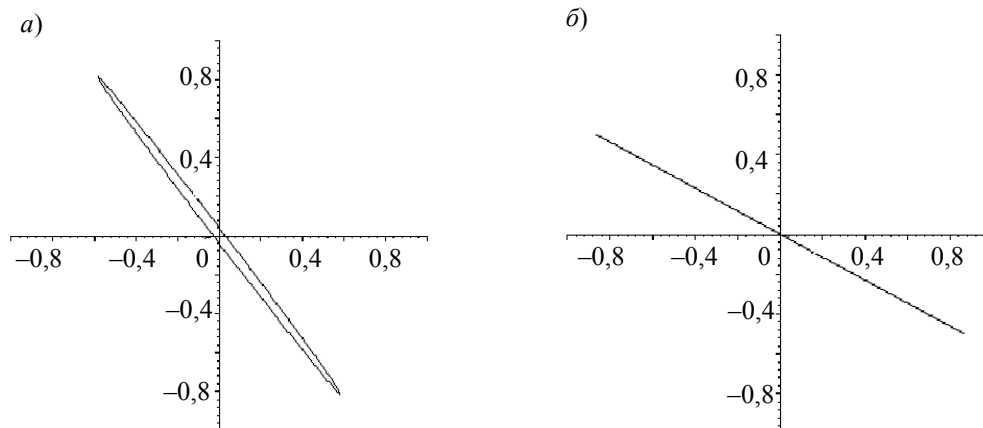


Рис. 4

Используя две и более кристаллические пластинки произвольной толщины, можно путем поворота пластинок относительно направления пропускания поляризатора настраивать систему на любую длину волны для задания любого вида поляризации излучения.

Математические расчеты и построение эллипсов поляризации проводились с помощью математического пакета „Maple-9“.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шерклифф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965. 254 с.
2. Гречушников Б. Н., Вислобоков А. И., Евдищенко Е. А. и др. Составные фазовые пластинки // Кристаллография. 1993. Т. 38, № 2. С. 55—69.
3. Абен Х. К. К теории составной пластинки в четверть волны // Опт. и спектр. 1962. Т. 13, № 5. С. 746—750.
4. Хасанов Т. Определение параметров фазосдвигающих пластинок // Кристаллография. 1992. Т. 37, № 4. С. 1041—1043.
5. Абен Х. К. Об одном подходе к измерению разности фаз при помощи фазовых пластинок // Опт. и спектр. 1963. Т. 14, № 2. С. 240—246.
6. Абен Х. К. Некоторые задачи суперпозиции двух двупреломляющих пластинок // Опт. и спектр. 1963. Т. 15, № 5. С. 682—689.
7. Гольцер И. В., Дарит М. Я., Зельдович Б. Я., Кундикова Н. Д. Оптически активный аналог четвертьволновой пластинки // Квантовая электроника. 1993. Т. 20, № 9. С. 916—918.
8. Сюй А.В., Кравцова Н.А., Строганов В.И. и др. Поляризационный метод управления спектром пропускания плоскопараллельной кристаллической пластинки // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 12. С. 53—55.
9. Строганов В. И., Андреев П. С., Кузнецов Д. А. и др. Оптические элементы из анизотропных кристаллов для фотоники и информационной оптики // Сб. науч. тр. „Научная сессия МИФИ—2007“. М., 2007. Т. 15. С. 82—84.
10. Сюй А. В., Кравцова Н. А., Строганов В. И., Криштон В. В. Ориентационная зависимость пропускания системы поляризатор—кристалл—кристалл—анализатор // Оптич. журн. 2007. Т. 74, № 7. С. 33—36.

Сведения об авторах

Александр Вячеславович Сюй

— Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, E-mail: alsyuy271@mail.ru

- Наталья Анатольевна Кравцова** — Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, E-mail: fizika@festu.khv.ru
- Владимир Иванович Строганов** — Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, E-mail: fizika@festu.khv.ru
- Виктор Владимирович Криштон** — Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, E-mail: fizika@festu.khv.ru

Рекомендована кафедрой
физики

Поступила в редакцию
28. 08. 07 г.

УДК 681.3

В. М. ДЕМИДОВ, А. Ю. ПОЛЯКОВ

УМЕНЬШЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАЛЛАКСА НА ПОГРЕШНОСТЬ СТАБИЛИЗАЦИИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

Представлен метод пространственной стабилизации видеоизображения, уменьшающий влияние параллакса, основанный на использовании свободных коэффициентов, характеризующих расстояния до различных объектов сцены. Он достаточно устойчив к возмущениям, связанным с движением объектов и динамическими помехами. Построенный по этому методу алгоритм требует сравнительно небольших вычислительных затрат.

Ключевые слова: видеостабилизация, эффект параллакса, QR-разложение, преобразование Хаусхолдера.

Задача пространственной стабилизации видеоизображения, получаемого оптико-электронной системой (ОЭС), возникает часто при наличии вибраций. Одной из целей стабилизации является исключение высокочастотной составляющей смещений изображения при условии сохранения общего направления движения. В зависимости от характера движения камеры требуется применение различных методов стабилизации. Наиболее качественное изображение можно получить при механической стабилизации приемника излучения либо при оптической стабилизации (изображение относительно приемника). Оба подхода требуют соответствующих конструктивных решений, в том числе использования подвижных частей, что значительно усложняет конструкцию [1].

При наличии высокочастотной вибрации по частоте, превышающей частоту кадров, можно применять электронную стабилизацию, которая заключается в том, что изображение на матричном фотоприемнике накапливается (фиксируется) при одном и том же положении камеры [2]. При малых значениях скоростей движения критерием является практическое отсутствие смаза, который можно компенсировать методами цифровой обработки получаемого видеоизображения [3—8].

Алгоритмы цифровой стабилизации широко применяются в современных цифровых видеокамерах. Имеется ряд программных продуктов, предназначенных для нейтрализации „дрожания“ уже отснятого видеоматериала. Получили распространение отдельные устройства и интерфейсные платы к компьютеру, осуществляющие цифровую стабилизацию получаемого видеопотока в реальном масштабе времени. Недостатком применяемых современных алгоритмов цифровой стабилизации является то, что изображение рассматривается как полученное от „плоской“ сцены, т.е. без учета параллакса, возникающего при движении.

Движение ОЭС удобно представить следующими параметрами [3—6]:

- вращением вокруг оптической оси системы;
- вращением вокруг оси, перпендикулярной оптической оси системы;

- масштабированием;
- смещением вдоль оптической оси системы;
- смещением в плоскости, перпендикулярной оптической оси системы.

Компенсация последних двух видов движения требует при работе прибора динамического построения трехмерной модели сцены, что является довольно сложной задачей. Обычно предполагается, что объекты расположены приблизительно на одинаковом от камеры расстоянии. В этом случае задача упрощается: смещение вдоль оптической оси рассматривают как масштабирование, а смещение в плоскости, перпендикулярной оптической оси, — как вращение вокруг оси, перпендикулярной оптической оси. Однако наличие эффекта параллакса на получаемом изображении приводит к ошибочному определению смещения, поворота и масштабирования при сопоставлении двух кадров видеоизображения.

Решение данной проблемы предлагается в [7]. Каждый кадр видеоизображения представляется как совокупность участков прямоугольной формы (зон), для которых находятся соответствующие им (похожие) зоны на соседнем кадре [5, 8]. Для каждой зоны вычисляется смещение. Неинформативные зоны с однотонным изображением исключаются из рассмотрения. Обычно на основе полученного множества векторов смещения определяются параметры масштабирования, поворота и смещения для целого кадра [5, 8]. Общее преобразование координат имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} su' &= u \cos \alpha + v \sin \alpha - T_u, \\ sv' &= -u \sin \alpha + v \cos \alpha - T_v, \end{aligned} \right\}$$

где u' , v' и v , u — начальные и последующие координаты изображения, s — коэффициент, соответствующий масштабированию, T_u и T_v — коэффициенты, определяющие смещение, α — угол поворота. При малых значениях α можно упростить систему, перейдя к системе линейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} su' &= u + \alpha v - T_u, \\ sv' &= -\alpha u + v - T_v. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Авторами работы [7] предлагается определить наиболее подверженный параллаксу параметр и для каждой из зон оценить его отдельно. При таком подходе каждая зона характеризуется своим независимым расстоянием, что уменьшает ошибку в определении остальных параметров.

Угол поворота α при любых преобразованиях будет общим для всех точек изображения и на него не будет влиять эффект параллакса. В результате для преобразования (1) можно построить три модели движения ОЭС:

- вдоль оптической оси

$$\left. \begin{aligned} s_i u'_i &= u_i + \alpha v_i - T_u, \\ s_i v'_i &= v_i - \alpha u_i - T_v; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

- перпендикулярно оптической оси, по оси u изображения

$$\left. \begin{aligned} s u'_i &= u_i + \alpha v_i - T_{ui}, \\ s v'_i &= v_i - \alpha u_i - T_v; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

- перпендикулярно оптической оси, по оси v изображения

$$\left. \begin{aligned} s u'_i &= u_i + \alpha v_i - T_u, \\ s v'_i &= v_i - \alpha u_i - T_{vi}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь под индексом i понимается номер зоны, параметры без индекса в выбранной модели являются общими. Параметры, определяющие масштаб s и смещение T_u и T_v для моделей движения (2)—(4) соответственно, являются частными для каждой зоны. Следует обратить внима-

ние, что в этих моделях имеются не четыре неизвестных, как в системе (1), а три общих и по одной для каждой рассматриваемой зоны (на практике может достигать нескольких сотен).

Системы (2)—(4) не имеют точного решения, однако можно найти такие значения параметров, при которых система линейных уравнений, представленная в виде

$$Ax = b,$$

дает наименьшую невязку

$$\|Ax - b\| \rightarrow \min.$$

Такой результат дает QR -разложение [9], выполнение преобразования Хаусхолдера для системы такой размерности требует значительных вычислительных затрат.

Нами предлагается рассматривать частные параметры, входящие в уравнения (2)—(4), свободными и не использовать их при вычислениях. Значение общего параметра по направлению движения можно вычислять не путем усреднения значений соответствующих параметров этих зон, а из уравнения (1) при условии, что все остальные общие параметры найдены. Это позволяет не только сократить объем вычислений, но и повысить достоверность определения параметра по направлению движения. Нами был разработан и реализован алгоритм QR -разложения [10], в котором используются особенности разреженности матрицы, описывающей уравнения (2)—(4). Вычислительная сложность алгоритма значительно уменьшается, как и накапливающаяся погрешность вычисления.

Особенность предложенного метода заключается в исключении из рассмотрения одного из параметров, наиболее подверженного искажениям в результате параллакса (масштабирование либо одно из смещений). Блочный подход, используемый при анализе видеоизображения, позволяет повысить устойчивость к возмущениям, связанным с параллаксом, а также с движением объекта и возникновением динамических помех. Проблема, связанная со значительным увеличением размерности системы линейных уравнений, решается путем применения специализированного QR -разложения. Данный алгоритм стабилизации реализован на DSP-процессоре TMS 6200 для тепловизионного видеоизображения формата 320×240 в реальном масштабе времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ellison B., Archer C., Worley S. Opto-mechanical Design for Real-time Image Processing „It's not only software“ // SPIE Proc. 2006. Vol. 6206. P. 620 629(1—12).
2. Грязин Г. Н. Системы прикладного телевидения: Учеб. пос. для вузов. СПб: Политехника, 2000.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
4. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003.
5. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: Бином, 2006.
6. Миргородский А. Ю. Метод оценки масштабирования, поворота и сдвига сцены с использованием объектов бинаризованных изображений // Электросвязь. 2006. № 4. С. 46—47.
7. Zhigang Zhu, Guangyou Xu, Yudong Yang, Jesse S. Jin. Camera Stabilization Based on 2.5D Motion Estimation and Inertial Motion Filtering // IEEE Int. Conf. on Intelligent Vehicles. 1998. P. 329.
8. Солдатов С. А., Стрельников К. Н., Ватолин Д. С. Быстрое и надежное определение глобального движения в видеопоследовательностях // Мат. 16-й Междунар. конф. по компьютерной графике и ее приложениям. Новосибирск: Ин-т вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 2006. С. 430—437.
9. Mertins A. Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications. NY: John Wiley & Sons Ltd, 1999.
10. Демидов В. М., Поляков А. Ю. Алгоритм пространственной стабилизации изображения с использованием свободных коэффициентов // Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений / Под ред. В. В. Тарасова и Ю. Г. Якушенкова. М.: ЦНИИ „Циклон“, 2007. Вып. 2. С. 264—272.

Сведения об авторах

- Владимир Михайлович Демидов** — Московский государственный университет геодезии и картографии,
E-mail: demidovvova@yandex.ru
- Александр Юрьевич Поляков** — Московский государственный университет геодезии и картографии,
E-mail: apolyakov1985@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
06.08.07 г.

УДК 535.317

В. А. ЗВЕРЕВ, Г. Э. РОМАНОВА

КОМПЕНСАТОРЫ ДЛЯ НЕСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗЕРКАЛЬНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

Рассмотрен расчет линзовых компенсаторов для несферических поверхностей высшего порядка в четырехзеркальной схеме телескопа с диаметром главного сферического зеркала 10 м. Несферические поверхности необходимо контролировать интерференционным методом с использованием компенсаторов. Компенсаторы к двум первым несферическим поверхностям можно построить по видоизмененной схеме Оффнера, а для сплюснутого сфероида можно использовать компенсатор, состоящий из мениска с несферической поверхностью и плоскопараллельной пластины.

Ключевые слова: компенсатор, несферические поверхности, компенсатор Оффнера.

При изготовлении несферических поверхностей неизбежно встает вопрос об их контроле. Наиболее точным методом, который дает качественную и количественную оценку, является интерференционный метод, предполагающий использование компенсаторов. Рассмотрим последовательность расчета компенсатора Оффнера, предложенного для параболических поверхностей [1]. Как показали расчеты реальных систем, схему компенсатора Оффнера можно применять не только для параболических, но и для гиперболических поверхностей, а также для поверхностей высшего порядка.

На рис. 1 приведена схема компенсатора Оффнера, который представляет собой две линзы, одна из которых устанавливается вблизи каустики лучей, отраженных от контролируемого зеркала. В точку A устанавливается источник, A' — его изображение, C_0 — центр кривизны поверхности при вершине.

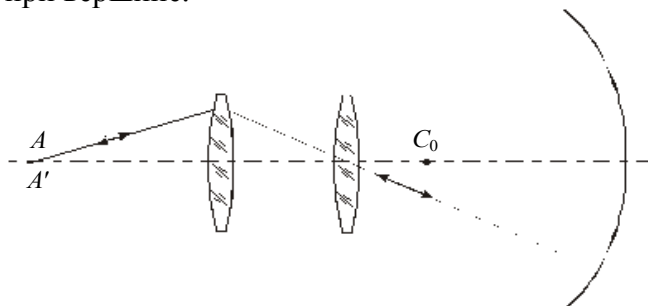


Рис. 1

Рассмотрим последовательность расчета компенсатора Оффнера. На рис. 2 показана отдельная поверхность, где C — центр кривизны, соответствующей точке на поверхности с координатами y, z , CN — нормаль к поверхности в точке с координатами y, z .

Линза, которую необходимо использовать в качестве компенсатора, должна обладать сферической aberrацией $\Delta s' = CC_0$, т.е. компенсировать разброс нормалей несферической поверхности; при этом задний апертурный угол линзы должен быть равен σ' . Линза с aberrацией $\Delta s'$ компенсирует aberrацию на краю зрачка зеркальной поверхности, но для некоторой зоны зрачка aberrации значительны, поскольку зависимости сферической aberrации отдельной линзы и параболической поверхности имеют различный характер. Поэтому необходимо использовать дополнительную линзу, которая служит для согласования характера зависимости aberrаций.

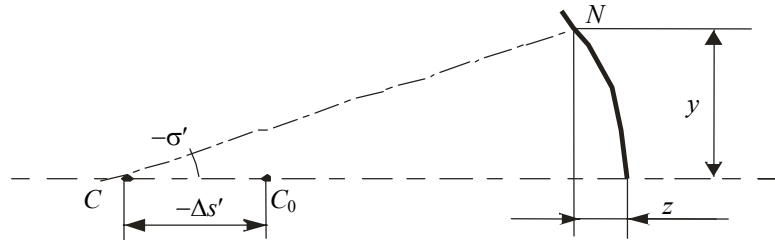


Рис. 2

Для несферической поверхности, эквидистантной к параболоиду, порядок расчета компенсатора будет аналогичным, поскольку нормали к поверхности и к ее эквидистанте совпадают.

Была рассчитана схема четырехзеркального телескопа, полученная сочетанием афокальной двухзеркальной системы и объектива типа Грегори с промежуточным изображением. Рассмотрим последовательно расчет компенсаторов к зеркальным поверхностям.

Расчет компенсатора ко второй поверхности. В схеме телескопа с диаметром главного зеркала 10 м, построенного на основе афокальной двухзеркальной системы, вторая поверхность является несферической, эквидистантной к параболоиду. Радиус кривизны этой поверхности при вершине $r_2 = -7500^*$ мм, тогда:

$$x^2 + y^2 = 2r_2^*z + 3,999\,779z^2 + 0,002\,653z^3 + 0,335\,144 \cdot 10^{-5}z^4 + 0,365\,802 \cdot 10^{-8}z^5,$$

т.е. эта поверхность является гиперболоидом вращения высшего порядка, ее диаметр — около 2700 мм. В отсутствие компенсатора волновая сферическая aberrация в изображении точки C_0 оказывается более $13\,000\lambda$, продольная aberrация на краю зрачка — 1171,64 мм, поперечная — 184,92 мм.

С помощью одной линзы с фокусным расстоянием 530,36 мм и линейным увеличением $V = -2,045$ можно исправить сферическую aberrацию на краю зрачка (поперечная aberrация 0,000 424 мм), отдельная линза имеет сферическую aberrацию на краю зрачка $-548,54$ мм. При этом в пределах всего зрачка в системе „зеркало с линзой“ поперечная aberrация достигает 30 мм, волновая aberrация — более 3000λ . Следовательно, для компенсации aberrации в пределах всего зрачка необходимо использовать более сложный компенсатор.

При добавлении второй линзы вблизи каустики лучей, отраженных от зеркала, т.е. при использовании классической схемы Оффнера, aberrации осевого пучка составили порядка 2500λ ($\lambda = 0,6328$ мкм), таким образом, коррекция aberrаций в автоколлимационной схеме с двухлинзовым компенсатором получается неудовлетворительной, поэтому необходимо усложнять схему компенсатора.

В процессе расчета был получен компенсатор из трех линз (рис. 3). Небольшими вариациями исходных параметров схемы можно добиться хорошей коррекции aberrаций с тремя плосковыпуклыми линзами. Параметры полученной схемы контроля для второй поверхности в схеме телескопа приведены в табл. 1 (звездочкой обозначена несферическая поверхность).

Одна из линз компенсатора (см. рис. 3) расположена вблизи каустики. Две линзы обращены выпуклыми сторонами к зеркальной поверхности, при ином расположении коррекция aberrаций несколько хуже.



Рис. 3

Таблица 1

Конструктивные параметры компенсатора к несферической поверхности

Номер поверхности	Радиус кривизны r , мм	Толщина d , мм	Оптическая среда
1	∞	150	Стекло К8
2	-666,9	590	Воздух
3	∞	140	Стекло К8
4	-1030,18	1855	Воздух
5	1787,72	70	Стекло К8
6	∞	8900	Воздух
7	-7500*	-8900	- Воздух
8	∞	-70	- Стекло К8
9	1787,72	-1855	- Воздух
10	-1030,18	-140	- Стекло К8
11	= ∞	-590	- Воздух
12	-666,9	-150	- Стекло К8
13	∞		

В табл. 2 приведены значения aberrации полученной компенсационной схемы. Из таблицы видно, что коррекция aberrации близка к совершенной.

Таблица 2

Аберрации осевого пучка

y , о.е.	Продольная aberrация, мм	Поперечная aberrация, мм	Волновая aberrация, λ
1	0,00013	-0,000052	-0,0132
0,866	0,00034	-0,000113	-0,0603
0,707	0,00050	-0,000133	-0,0297
0,5	0,00033	-0,00006	-0,0287
0	0	0	0

Для третьей поверхности (несферической формы) телескопа (световой диаметр — 2720 мм, радиус кривизны при вершине $r = -12\,600$ мм) расчет компенсатора аналогичен представленному выше.

Расчет компенсатора к сплюснутому эллипсоиду. Четвертая поверхность — сплюснутый эллипсоид высшего порядка — имеет радиус кривизны при вершине $r = -2\,696$ мм, световой диаметр 620 мм. Был выполнен расчет универсального компенсатора Пуряева Д. Т. [см. лит.] В рассматриваемом случае световой диаметр поверхности достаточно велик, поэтому волновую сферическую aberrацию при использовании универсального компенсатора Пуряева можно исправить только до порядка 3λ . При этом несферическая поверхность мениска оказывается тоже сплюснутым эллипсоидом.

В процессе расчета была получена схема с мениском, обращенным к зеркалу вогнутой стороной, одна из поверхностей которого асферизована, причем несферическая по-

А. А. УМБИТАЛИЕВ, А. К. ЦЫЦУЛИН, В. Д. СМИРНОВ, И. Д. ЕГЕЛЬСКИЙ

КОМПОНОВКА МНОГОКАНАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ИНФРАКРАСНОГО И МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ

Осуществление регистрации малоконтрастных объектов, имеющих различную температуру, стало в настоящее время актуальной задачей для многих видов оптико-электронной аппаратуры. Рассмотрен вариант многоканальной аппаратуры, каждый из каналов которой решает свою частную задачу в условиях малого контраста регистрируемых объектов и в условиях низкой освещенности.

Ключевые слова: малоконтрастный объект, многоканальная аппаратура, спектральный диапазон.

Задача наблюдения малоконтрастных объектов в условиях предельно мощных фоновых помех является сложной для обнаружительной аппаратуры независимо от спектрального диапазона работы. Впервые проблемами решения задач регистрации малоконтрастных объектов в условиях фоновых помех и низкой освещенности в *видимой области* спектра занялся академик С. И. Вавилов [1, 2] и его ученики А. В. Луизов, А. С. Лебедев [3].

Задача регистрации малоконтрастных объектов, имеющих различную температуру (от „холодных“ до „теплых“), является и в настоящее время актуальной, ее следует решать путем создания комплексов аппаратуры, включающей несколько спектральных каналов.

Таким образом, требуется:

- разработка аппаратуры сверхвысокой чувствительности, работающей в видимом диапазоне в условиях предельно низкой освещенности при предельно низком контрасте наблюдаемых объектов к окружающему их фону;
- разработка высокочувствительной аппаратуры визуализации „теплых“ и „холодных“ объектов;
- разработка малогабаритной чувствительной аппаратуры, работающей в длинноволновом диапазоне (радиодиапазоне);
- объединение всех каналов аппаратуры в единый конструктивный комплекс с взаимопривязкой осей наведения („осей визирования“) каждого канала (с точностью до угловых секунд) в общую для всего комплекса „прицельно-визирную“ ось.

Следует заметить, что для создания аппаратуры, функционирующей в нескольких спектральных диапазонах [4—7], необходимо обоснованно выбирать базовый рабочий спектральный диапазон, определяющий максимальную точность всего комплекса. Следовательно, требуется грамотно распределять функции между спектральными каналами. Базовую область спектра можно определять, используя известную формулу: $\Delta\alpha = 2,44\lambda/D$.

Из формулы следует, что предел углового разрешения ($\Delta\alpha$), а следовательно и точность наведения на визируемый объект, находится в прямой зависимости от длины волны (λ , мкм) рабочего диапазона спектра и диаметра (D , мм) входного зрачка аппаратуры (т.е. увеличение длины волны при одних и тех же размерах D приводит к созданию менее точного канала).

Целесообразно разделить основные функции комплекса обнаружительной аппаратуры по малоконтрастным объектам (в условиях плохой видимости: дождь, туман, ночь, пыль) на:

- „поисковую“ задачу (грубое нахождение регистрируемого объекта), которая решается в длинноволновом спектральном канале;
- „опознавательную координатно-измерительную“ задачу, которая решается в коротковолновом высокоразрешающем спектральном интервале (видимом или ближнем ИК-диапазонах).

На рис. 1 представлена принципиальная схема соосной компоновки многоканального комплекса обнаружительно-опознавательной аппаратуры, работающего в видимом и ИК-диапазонах, а также в миллиметровой области спектра. Как показано на рисунке, коротковолновая „опознавательная“ телевизионная камера 1 расположена перед приемником радиодиапазона 2 (в „мертвой“ зоне) на оптической оси комплекса (3 — антенна, 4 — основание комплекса).

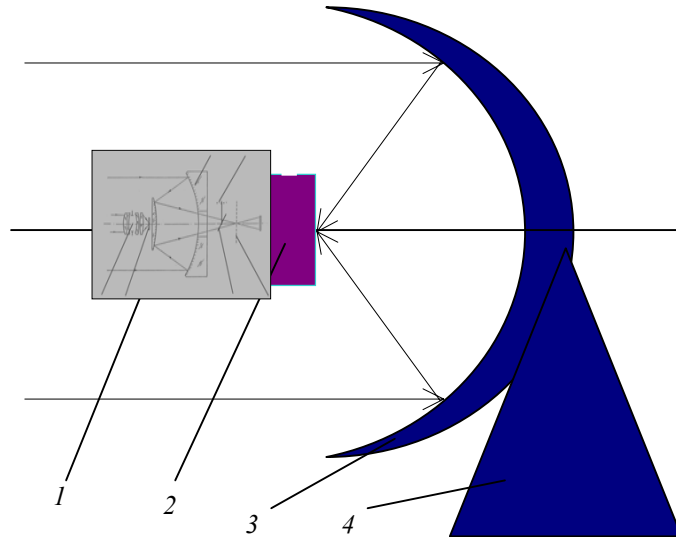


Рис. 1

На рис. 2 приведена принципиальная схема оптической системы трехканальной „опознавательной“ телевизионной камеры (1 — сверхчувствительная телевизионная камера видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра; 2 — матричный ПЗС; 3 — зеркало; 4 — ИК-ФПУ (для $\Delta\lambda = 8\text{—}14\text{ мкм}$) либо модулятор потока типа „равномерная решетка“; 5 — одноэлементный приемник „теплового диапазона“; 6 — ИК-ФПУ (для $\Delta\lambda = 3\text{—}5\text{ мкм}$); 7 — зеркальная оптическая система, работающая в двух спектральных диапазонах ($\Delta\lambda = 3\text{—}15$ и $8\text{—}14\text{ мкм}$)).

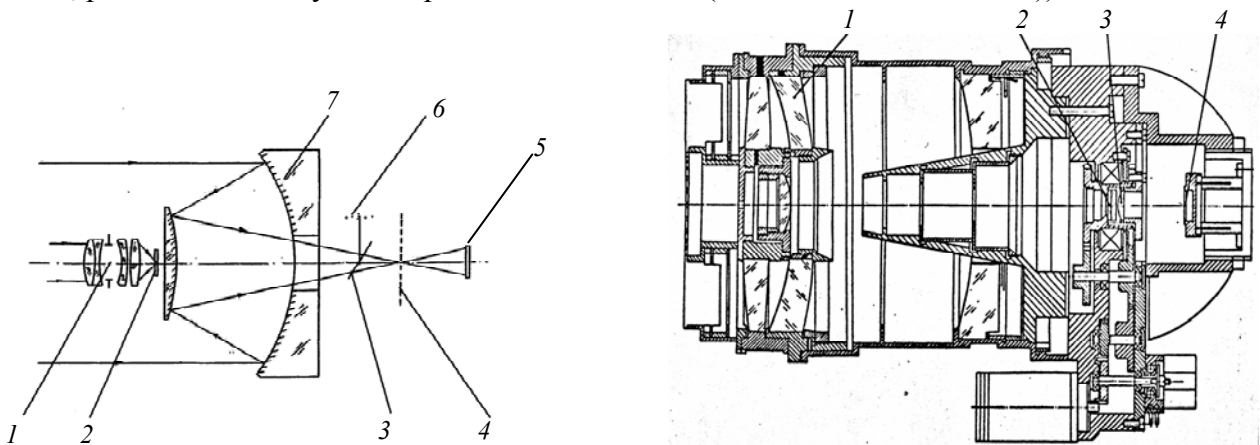


Рис. 2

Рис. 3

По этой схеме наиболее коротковолновая телевизионная камера (видимого диапазона), работающая с „накоплением“, находится перед контрзеркалом чисто зеркального телескопа, способного регистрировать излучение в окнах прозрачности атмосферы в любом участке ИК спектрального диапазона [6].

На рис. 3 представлен один из вариантов первичной обработки информации ИК-камеры, устанавливаемой соосно (рис. 1) перед приемником радиодиапазона комплекса аппаратуры: 1 — блок оптических компонентов; 2 — охлаждаемый модулятор типа „восьмисекторная

равномерная решетка“ с охлаждаемой апертурной диафрагмой; 3 — германиевый коллектив; 4 — одноэлементный ИК-приемник излучения.

В настоящее время задача создания ИК-аппаратуры имеет аппаратную реализацию как минимум в трехканальном варианте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов С. И. Микроструктура света. М.: Изд-во АН СССР, 1950.
2. Вавилов С. И. Флуктуации при световой адаптации глаза // ЖЭТФ. 1942. № 12. С. 105.
3. Луизов А. В. Инерция зрения. М.: Оборонгиз, 1961.
4. Цыцулин А. К. Телевидение и Космос. СПб: Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2003.
5. Смирнов В. Д. Оптико-электронные сканирующие системы. СПб: Изд-во „Петербургский институт печати“, 2004.
6. Смирнов В. Д. Патент РФ № 48616. „Устройство дистанционного обнаружения“. Приоритет 18.05.2005 г.
7. Смирнов В. Д. Оптические и оптико-электронные системы космического технического зрения для беспилотных летательных аппаратов. СПб: Изд-во „Петербургский институт печати“, 2006.

Сведения об авторах

- | | |
|---|--|
| <i>Александр Ахатович Умбиталиев</i> | — Научно-исследовательский институт телевидения,
Санкт-Петербург, E-mail: niit@infos.ru |
| <i>Александр Константинович Цыцулин</i> | — Научно-исследовательский институт телевидения,
Санкт-Петербург, E-mail: niit@infos.ru |
| <i>Всеволод Дмитриевич Смирнов</i> | — Научно-исследовательский институт телевидения,
Санкт-Петербург, E-mail: niit@infos.ru |
| <i>Иван Денисович Егельский</i> | — Научно-исследовательский институт телевидения,
Санкт-Петербург, E-mail: niit@infos.ru |

Рекомендована институтом

Поступила в редакцию
12.03.08 г.

А. М. СКВОРЦОВ, С. С. ДЫШЛОВЕНКО, М. В. ПОГУМИРСКИЙ,
ФАМ КУАНГ ТУНГ, В. И. СОКОЛОВ

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕМ

Исследовано влияние лазерного микроstructuring монокристаллического кремния на морфологию и оптические свойства облученных областей. Показано, что на поверхности облученных областей кремния происходят сложные структурные изменения, сопровождаемые морфотропией кремния с образованием его нанокластеров. Одновременно существенно изменяются оптические характеристики, о чем свидетельствует изменение коэффициента пропускания облученных областей кремния.

Ключевые слова: лазерное микроstructuring, облученная зона, кремниевый нанокластер, коэффициент пропускания.

В настоящее время процесс лазерного микроstructuring поверхности широко применяется в полупроводниковой микроэлектронике. Краткий обзор методов микроstructuring кремния с помощью лазера приведен в работе [1]. Изменяя параметры лазерного излучения, можно реализовать широкий диапазон режимов воздействия от локального нагревания до строго дозированного удаления материала. Из основных методов лазерного микроstructuring поверхности в настоящей работе использован метод, который основан на локальном нагревании и испарении вещества. Этот метод позволяет модифицировать структуру поверхности кремния и его свойства.

Методика эксперимента. В работе осуществлялось лазерное микроstructuring поверхности монокристаллических кремниевых пластин электронного типа проводимости с удельным сопротивлением 7,5 Ом·см и толщиной 0,38 мм, ориентированных в кристаллографической плоскости (100). Лазерной обработке подвергались как пластины неокисленного кремния, так и пластины с термическим окислом толщиной 0,35—0,4 мкм.

Лазерная обработка кремниевых пластин проводилась на специальном технологическом комплексе, в котором использовался CO₂-лазер с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм. Основные параметры облучения: длительность импульса $\tau = 0,88 \cdot 10^{-4}$ с, частота следования импульсов $f = 80$ Гц, диаметр пучка 20 мкм, средняя мощность лазерного излучения $P = 0,3$ Вт, скорость сканирования $V = 2,5$ мм/с. Площадь сканирования составляла 5×5 мм. Сканирование проводилось на воздухе в разных направлениях относительно базового среза пластины: параллельно, перпендикулярно и под углом 45°. Пластина кремния располагалась на стеклянной подложке.

Исследование структурных свойств экспериментальных образцов производилось методами растровой электронной микроскопии и катодolumинесценции, а для

исследования оптических свойств измерялся коэффициент пропускания образцов в ИК-диапазоне длин волн.

Люминесцентные методы исследования являются одними из наиболее информативных при изучении структуры двуоксида кремния. Метод электролюминесценции наиболее часто используется при исследовании генерационно-рекомбинационных процессов в МОП-структурах с тонким диэлектриком, а также при исследовании возможности токовой накачки светоизлучающих наноконструкций, содержащих нанокристаллы кремния.

В настоящей работе использован метод катодолюминесценции, который хотя и сложнее метода электролюминесценции, но обладает рядом преимуществ перед последним, такими как возможность регистрации спектров с разрешением по глубине окисной пленки, а также высокая энергия возбуждения, что позволяет исследовать глубокие люминесцентные центры [2, 3]. В целом, нужно отметить, что спектры катодолюминесценции и фотолюминесценции весьма похожи.

Исследования катодолюминесцентных свойств полученных структур проводились на электронно-зондовом микроанализаторе Camebax фирмы Самеса (Франция), снабженном оптическим спектрометром, регистрирующим катодолюминесцентное излучение образцов в видимой области спектра (350—750 нм).

Для измерения коэффициента пропускания образцов в инфракрасной области спектра использовался спектрофотометр ИКС-29.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 1, *a—г* приведены фотографии облученных областей с различной морфологией из разных участков зоны лазерного сканирования; *д* — схематическое изображение зоны сканирования и расположение в ней участков *a—г*.

Как видно из рис. 1, в облученных областях, расположенных в средней части (участки *a* и *б*) зоны сканирования лазерного луча, можно выделить три части (рис. 1, *a*): центральная часть в виде выпуклости, окруженной волнообразными структурами в виде колец, ширина которых изменяется в пределах 8—10 мкм. Третья часть облученных областей имеет вид светлого кольца шириной порядка 5 мкм. В облученных областях, расположенных ближе к краям зоны сканирования (участки *в* и *г*), отсутствует центральная выпуклая часть.

Для объяснения полученных морфологических структур в областях, облученных пучком лазера, следует кратко рассмотреть процессы, которые обеспечивают взаимодействие монокристалла кремния с излучением CO₂-лазера.

Поскольку кремний в инфракрасном диапазоне длин волн отражает порядка 46 % излучения и пропускает порядка 54 %, он практически не поглощает излучение CO₂-лазера, поэтому на образцах монокристаллического кремния, облученного CO₂-лазером, не было обнаружено каких-либо структурных изменений. Как уже указывалось ранее, для активации поглощения и взаимодействия кремния с лазерным излучением под пластины образцов кремния были помещены стеклянные пластины, хорошо поглощающие излучение CO₂-лазера. Стекло под кремниевой пластиной поглощает излучение, нагревается и частично испаряется. За счет процесса теплообмена пластина кремния также нагревается, ее температура повышается. Вследствие этого изменяются оптические свойства кремния: его коэффициент поглощения повышается. Монокристалл кремния начинает поглощать лазерное излучение и нагреваться, что приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны кремния. В результате активируется внутрizonное поглощение и увеличивается скорость термической генерации свободных носителей. В итоге процесс поглощения нарастает лавинообразно [4].

Таким образом, энергия лазерного излучения поглощается кремнием за счет повышения коэффициента поглощения кремниевой пластины и преобразуется в тепловую

энергию. При температуре порядка 800 °С и выше начинается пластическая деформация кремния. Когда температура поверхности достигает $T = 1423$ °С, начинается плавление материала. В дальнейшем, при охлаждении, происходит рекристаллизация кремния и образование сложных структур, приведенных на рис. 1.

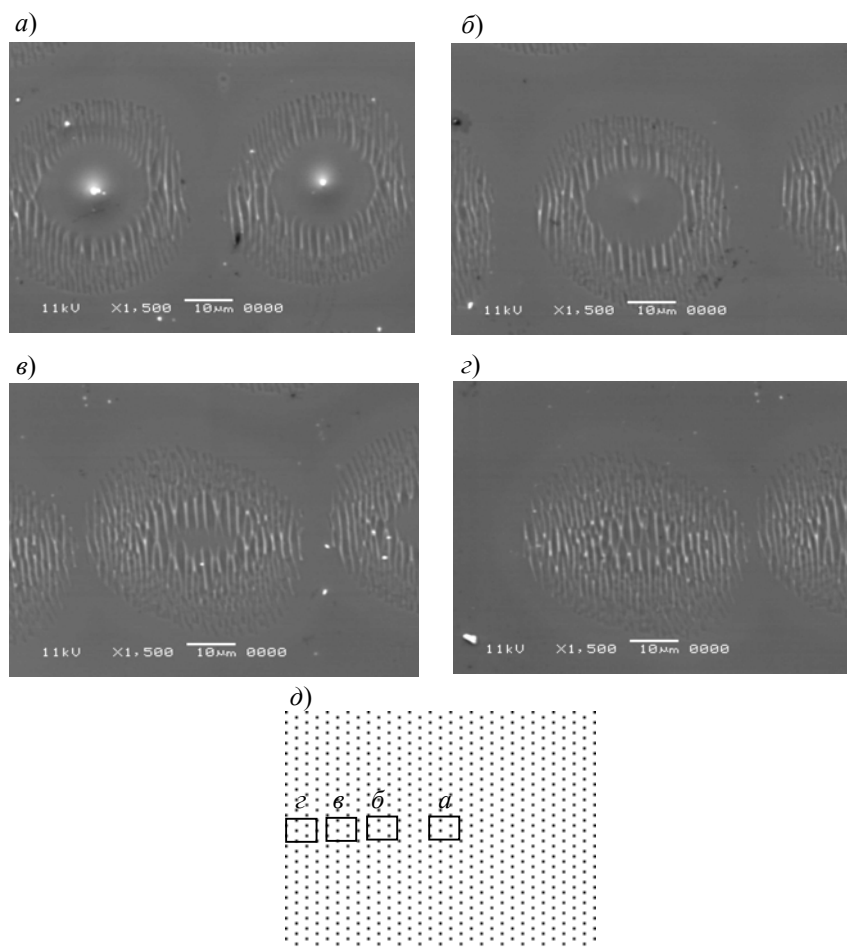


Рис. 1

Как видно из рис. 1, *a*, диаметр центральной части области облучения порядка 20 мкм, т.е. совпадает с диаметром сфокусированного в центре области сканирования лазерного пучка, что обеспечивает наибольшую плотность мощности в средней части области сканирования. Именно здесь происходит расплав кремния и последующая рекристаллизация. С отклонением луча от средней части области сканирования увеличивается расфокусировка лазерного пучка, что приводит к уменьшению плотности мощности лазерного излучения в пятне. В результате снижается вероятность появления расплава и формируется лишь структурно-деформированная область, обусловленная появлением больших упругих механических напряжений, которые приводят к пластической деформации областей, прилежащих к областям расплава. Светлые кольца, расположенные за пределами структурно-деформированных областей, являются, возможно, областями, в которых имеются напряжения, обусловленные изменением постоянной решетки монокристалла.

В настоящей работе были сняты спектры катодолуминесценции (CL) двух образцов: образец 1 — монокристаллический кремний без окисла (рис. 2, кривые 1 и 2 — вне области облучения и в облученной области соответственно) и образец 2 — кремний с окислом (рис. 2, кривая 3). Люминесценция возбуждалась пучком электронов с энергией 5 кэВ и током 20 нА.

Во всех публикациях, касающихся структурных дефектов и люминесценции силикатных стекол (см., например, [2, 3, 5—7]), выделяют два четких пика, обусловленных собственными

структурными дефектами. Один пик (полоса) с энергией 1,94 эВ в спектре люминесценции свидетельствует о наличии обогащенных кислородом дефектов (немостиковых атомов кислорода, прещессирующих на вершине кремний-кислородного тетраэдра). Другая полоса с энергией 2,67 эВ обусловлена наличием в силикатном стекле обогащенных кремнием дефектов (наличием в молекулярном комплексе двухкоординированного атома кремния =Si:).

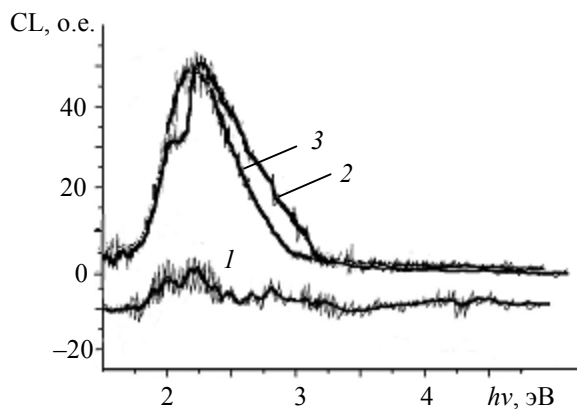


Рис. 2

В спектрах люминесценции термического окисла на кремнии наблюдаются пики в области 2,2—2,5 эВ, отсутствующие в спектрах кварцевого стекла, но характерные для нанокомпозитов опал—кремний, что свидетельствует о наличии нанокластеров кремния в окисле [3, 6, 7].

Рассмотрим спектры катодолуминесценции, полученные на первом образце. На рис. 2 (кривая 1) приведен спектр катодолуминесценции на необлученной части монокристалла кремния, покрытой тонким слоем естественного окисла. На его спектре люминесценции можно выделить три разных пика, соответствующих значениям энергии 1,94; 2,25 и 2,65 эВ. Из-за малой толщины слоя естественного окисла эти пики имеют малую интенсивность.

На спектре люминесценции, снятом в области облучения, четко выделяется одна яркая полоса, соответствующая 2,25 эВ (рис. 2, кривая 2), и полностью отсутствуют полосы со значениями энергии 1,94 и 2,65 эВ.

Следует отметить большую интенсивность пика, соответствующую энергии 2,25 эВ в спектре катодолуминесценции. Это можно рассматривать как свидетельство того, что после облучения в окисле, расположенном на структурированной поверхности кремния, сформировались нанокластеры кремния [1, 7].

На спектре люминесценции предварительно окисленного монокристаллического кремния, снятом в облученных областях, четко выделяется, так же как на рис. 2 (кривая 2), только одна яркая полоса, соответствующая энергии 2,25 эВ (кривая 3). Отличие заключается в том, что при энергии 1,97 эВ появился выступ, указывающий на наличие в структуре заметного количества обогащенных кислородом дефектов.

Исследование влияния лазерного облучения на ИК-пропускание неокисленного кремния показало (рис. 3), что в необлученном (1) и облученном (2) лазером кремнии значение коэффициента пропускания (T) существенно различается.

Если до $\lambda = 7$ мкм ход обеих кривых близок, то с увеличением λ наблюдается существенный рост T , который достигает 70 % при длине волны $\lambda = 10$ мкм и приближается к 90 % при $\lambda > 14,2$ мкм, т.е. лазерная обработка приводит к существенному росту коэффициента пропускания кремния.

На рис. 4 приведена зависимость коэффициента пропускания T монокристаллического кремния с термическим окислом толщиной 0,3—0,4 мкм на поверхности (кривая 1 — для необлученного лазером образца, 2 — для облученного). Общее значение T определяется нали-

чим двух слоев — оксида кремния и кремниевой подложки [8, 9]. Поэтому окончательный график коэффициента пропускания образца от длины волны имеет вид затухающего колебания (кривая 1).

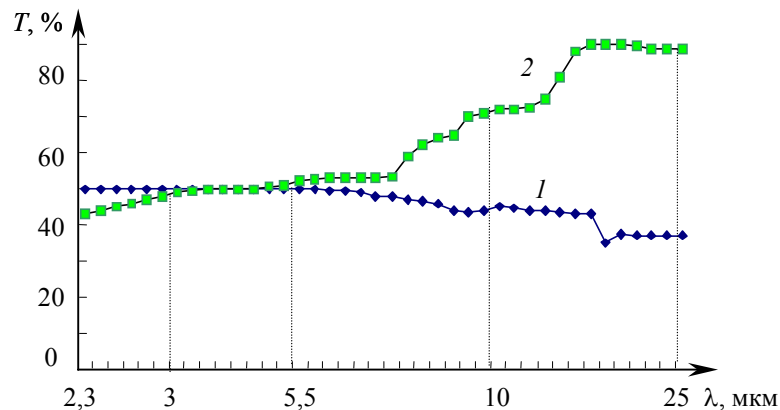


Рис. 3

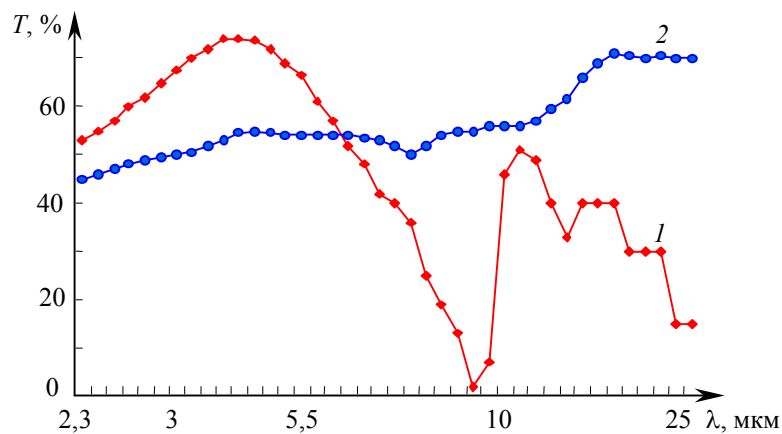


Рис. 4

После облучения лазером окисленного образца его коэффициент пропускания T значительно изменился. Наблюдается уменьшение зависимости T от длины волны. Вместо линии затухающего колебания наблюдается монотонный рост коэффициента пропускания, который достигает значения 70 % при длине волны в диапазоне $\lambda = 18\text{—}28$ мкм.

Таким образом, проведенные морфологические, структурные и оптические исследования монокристаллического кремния, микроstructuringанного с помощью излучения CO_2 -лазера, указывают на возможность использования лазерного облучения кремния для придания кремнию требуемых структурных и оптических свойств.

Авторы выражают благодарность Е. В. Колесниковой, сотруднице ФТИ им. А. Ф. Иоффе, за измерение спектров катодолуминесценции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейко В. П., Дышловенко С. С., Скворцов А. М. Лазерное микроstructuringание поверхности кремния // Науч.-технич. сб. „Диагностика и функциональный контроль качества оптических материалов“. Ч. 2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 138—153.
2. Zamoryanskaya M. V., Sokolov V. I. Structural study of thermal-oxide films on silicon by cathodoluminescence // Phys. Solid State. 1998. Vol. 47, N 11. P. 1797—1801.
3. Zamoryanskaya M. V., Sokolov V. I., Sitnikova A. A., Konnikov C. G. Cathodoluminescence study of defect distribution at different depths in films SiO_2/Si // Sol. State Phen. 1998. Vol. 63—64. P. 237—242.
4. Wang W. J., Lu Y. F., An C. W., Hong M. H., Chong T. C. Controllable periodic structure on silicon wafer by CO_2 laser irradiation // Appl. Surface Sci. 2002. Vol. 186. P. 594—598.

5. Силинь А. Р., Трухин А. Н. Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO₂. Рига: Зинатне, 1985. 244 с.
6. Bai G. F., Wang Y Q., Ma Z. C., Zong W. H., Qin G. G. Electroluminescence from Au/native silicon oxide layer/pC-Si and Au/native silicon oxide layer/nC-Si structures under reverse biases // J. Phys.: Condens. Matter. 1998. Vol. 10. P. 717—721.
7. Lin C. F., Liu C. W., Chen M.-J., Lee M. H., Lin I. C. Infrared electroluminescence from metal-oxide—semiconductor structures on silicon // J. Phys.: Condens. Matter. 2000. Vol. 12. P. 205—210.
8. Павлова В. Т. Оптика тонких пленок и технология их нанесения. Минск: БПИ, 1990.
9. Технология тонких пленок: Справочник / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. Т. 1. М.: Сов. радио, 1977. 664 с.

Сведения об авторах

- Альберт Матвеевич Скворцов** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, E-mail: a-skvortsov@yandex.ru
- Светлана Сергеевна Дышловенко** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, E-mail: puushistaya@mail.ru
- Максим Викторович Погумирский** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, E-mail: max33-05@mail.ru
- Фам Куанг Тунг** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, E-mail: quang_tung@yahoo.com
- Владимир Иванович Соколов** — Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, E-mail: V.Sokolov@mail.ioffe.ru

Рекомендована кафедрой
проектирования компьютерных систем

Поступила в редакцию
20.02.07 г.

УДК 543.422.25

А. И. ЖЕРНОВОЙ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА НЕФТЕВОДОГАЗОВОЙ СМЕСИ МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Представлен метод определения состава нефтеводогазовой смеси методом ядерного магнитного резонанса, основанный на различии значений ядерной магнитной восприимчивости и времени продольной магнитной релаксации компонентов. Используется инверсия ядерной намагниченности π -импульсом, амплитуда сигнала свободной индукции измеряется в момент времени, когда намагниченность одного из жидких компонентов или всей смеси равна нулю.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, нефтеводогазовая смесь, состав, измерение.

Для оптимизации процесса добычи нефти требуется контроль соотношения нефти, воды и попутного газа непосредственно в промысловой скважине. Для этой цели можно использовать метод ядерного магнитного резонанса. Участок трубопровода, в котором находится исследуемая смесь, помещается в приемную катушку датчика сигнала свободной индукции (ССИ), расположенную в магнитном поле. Амплитуда ССИ смеси с относительными объемными концентрациями жидких компонентов (нефти и воды), равными C_H и C_B , может быть рассчитана по следующей формуле:

$$A = C_H A_H + C_B A_B, \quad (1)$$

где A_H и A_B — амплитуды ССИ при $C_H = 1$ и $C_B = 1$, т.е. при заполнении датчика только одним компонентом.

Если в некоторый момент времени с помощью π -импульса произвести инверсию ядерной намагниченности в приемной катушке, то через время t после этого амплитуда ССИ смеси будет

$$A(t) = C_H A_H (1 - 2e^{-t/T_H}) + C_B A_B (1 - 2e^{-t/T_B}), \quad (2)$$

где T_H, T_B — время продольной релаксации компонентов.

Из выражения (2) видно, что в моменты времени $t_1 = T_H \ln 2$ и $t_2 = T_B \ln 2$ амплитуда ССИ определяется концентрацией только одного компонента:

— при $t = t_1$

$$A(t_1) = C_B A_B (1 - 2e^{-t_1/T_B}), \quad (3)$$

— при $t = t_2$

$$A(t_2) = C_H A_H (1 - 2e^{-t_2/T_H}). \quad (4)$$

Кроме того, в некоторый промежуточный между t_1 и t_2 момент времени t_0 , когда выполняется условие

$$C_H A_H (1 - 2e^{-t_0/T_H}) = C_B A_B (2e^{-t_0/T_B} - 1), \quad (5)$$

амплитуда ССИ $A(t_0) = 0$.

Первый способ определения состава смеси состоит в измерении амплитуд ССИ A до π -импульса и $A(t_1)$ в момент времени t_1 . Концентрации жидких компонентов определяются по следующим из (3) и (1) выражениям:

$$C_B = \frac{A(t_1)}{A_B \left(1 - 2e^{-\frac{T_H \ln 2}{T_B}}\right)}, \quad C_H = \frac{A - C_B A_B}{A_H}. \quad (6)$$

Объемную концентрацию газа можно рассчитать по следующему выражению:

$$C_G = 1 - C_B - C_H. \quad (7)$$

Второй способ состоит в измерении амплитуд ССИ $A(t_1)$ в момент времени t_1 и $A(t_2)$ — в момент времени t_2 . Значения концентрации C_B и C_G определяются по формулам (6) и (7), а концентрация C_H по следующему из (4) выражению

$$C_H = \frac{A(t_2)}{A_H \left(1 - 2e^{-\frac{T_B \ln 2}{T_H}}\right)}. \quad (8)$$

Третий способ определения состава смеси заключается в измерении амплитуды ССИ A до подачи π -импульса и определении момента времени t_0 , когда сигнал ССИ меняет знак. Концентрация C_G определяется по формуле (7), а концентрация C_B и C_H по следующим из (5) и (1) выражениям:

$$C_H = \frac{AX}{A_H}, \quad C_B = \frac{A(1-X)}{A_B}, \quad (9)$$

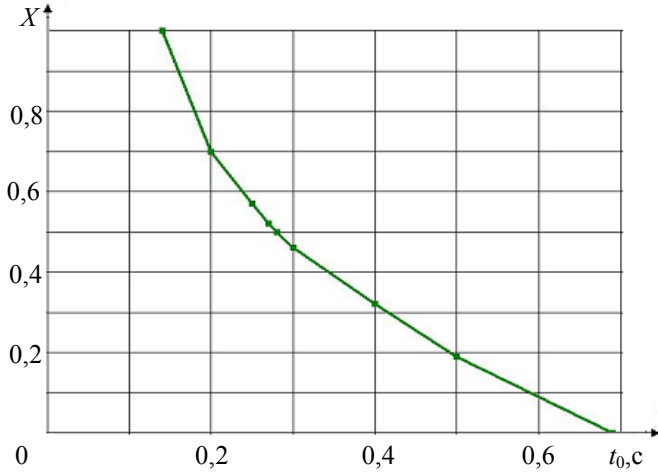
где

$$X = \frac{1 - 2e^{-t_0/T_B}}{2(e^{-t_0/T_H} - e^{-t_0/T_B})}. \quad (10)$$

Результаты расчета зависимости (10) параметра X от интервала времени t_0 при $T_H = 0,2$ с и $T_B = 1$ с по выражению (10) приведены ниже, а также представлены на рисунке.

$t_0, \text{с}$	0,14	0,20	0,25	0,27	0,28	0,30	0,40	0,50	0,69
X	1	0,70	0,57	0,52	0,50	0,46	0,32	0,19	0

Представленный метод позволяет определить состав смеси в стационарном и динамическом режимах. Если смесь движется по трубопроводу с некоторой скоростью V , то инверсия ядерной намагниченности π -импульсом должна производиться не только в приемной катушке, но и на участке трубопровода длиной l перед ней, чтобы в момент регистрации амплитуды ССИ $A(t)$ в приемной катушке находилась только жидкость, подвергнувшаяся действию π -импульса. Для этого перед приемной катушкой должна быть установлена дополнительная инвертирующая катушка длиной $l > V_{\max}t$, где V_{\max} — максимальная скорость, а значение t зависит от способа измерения.



Значение t , полученное вторым и третьим способами — $t = T_B \ln 2 \approx 0,7$ с, а первым способом $t = T_H \ln 2 \approx 0,14$ с. В случае $V_{\max} = 3$ м/с требуемая длина дополнительной катушки при использовании второго и третьего способов должна быть более 2 м, а при использовании первого способа достаточно 0,4 м. Таким образом, применение второго способа позволяет значительно уменьшить длину катушки l .

В динамическом режиме до входа в дополнительную инвертирующую катушку она должна проходить расположенный в магнитном поле участок трубопровода длиной L , достаточной для поляризации жидких компонентов. Во втором и третьем способах измерения требуется полная поляризация обоих компонентов, поэтому должно выполняться условие $L > 3V_{\max}T_B$ (при $V_{\max} = 3$ м/с $L > 3$ м). Использовать первый способ можно при полной поляризации только одного компонента, поэтому должно удовлетворяться условие $L > 3V_{\max}T_H$ (при $V_{\max} = 3$ м/с $L > 1,8$ м). Концентрацию C_H и C_B в этом случае следует определять по формулам:

$$C_B = \frac{A(t_1)}{A_B \left[1 - \left(2 - e^{-\frac{L}{WT_B}} \right) e^{-\frac{t_1}{T_B}} \right]}, \quad C_H = \frac{A - C_B A_B \left(1 - e^{-\frac{L}{WT_B}} \right)}{A_H}. \quad (11)$$

Для возможности применения формул (11) нужно знать скорость течения смеси V . Ее без усложнения конструкции прибора можно определять методом магнитной отметки, описанным в [1, 2]. В результате помимо определения состава смеси можно будет измерять объемный расход ее компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жерновой А. И. Измерение скоростей компонентов нефтегазовой смеси методом ЯМР // Вестн. ИНЖЭКОНа. Сер. Технические науки. 2005. Вып. 3(8). С. 41—49.
2. Жерновой А. И. Ядерно-магнитный расходомер с отметкой в приемной катушке // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 1. С. 39—43.

Сведения об авторе

Александр Иванович Жерновой

— Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), E.mail: azh@lti-gti.ru

Рекомендована кафедрой
общей физики

Поступила в редакцию
21.02.06 г.

SUMMARY

P. 5—11.

PARALLEL ALGORITHMS FOR COMPLEX NETWORKS SIMULATIONS

The set of parallel algorithms which allow reproducing a complex network as a stochastic graph with probabilistic properties is proposed in the paper. Each of algorithms is based on natural properties of graph structure parallelization and corresponds to features of the certain parallel computer architecture, including systems with the shared and distributed memory, and cluster systems as well. Results of experiments of parallel efficiency on hierarchical parallel computer systems and cluster systems (T-Forge mini) are presented.

Keywords: complex networks, generation the graph, parallel algorithms, hybrid architecture, models of productivity.

Data on authors

- Sergey Vladimirovich Ivanov* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
E-mail: sergey.v.ivanov@rambler.ru
- Ilya Igorevich Kolykhmatov* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
E-mail: kolyhmatov@rain.ifmo.ru
- Aleksander Valerjevich Boukhanovsky* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
E-mail: avb_mail@mail.ru

P. 12—15.

METHODS OF DATA PROCESSING OPTICAL MEASUREMENTS ON THE BASIS OF VECTOR REDUCED EVALUATION

The method of processing of results of the angular measurements executed with the help of optoelectronic systems is offered, allowing to raise(increase) accuracy of definition of parameters of movement of dynamic object due to sharing a method of the maximal plausibility and a vector reduction.

Keywords: vector reduction, identification, unbiased estimation, displaced estimation, optical measurements.

Data on authors

- Andrey Petrovich Aleshkin* — Space Academy by the name of A. F. Mozhayskiy, St. Petersburg
- Pavel Vladimirovich Savochkin* — Space Academy by the name of A. F. Mozhayskiy, St. Petersburg
E-mail: p_gehon@mail.ru
- Maksim Yurjevich Mantashian* — Space Academy by the name of A. F. Mozhayskiy, St. Petersburg
- Sergei Mikhailovich Kurushkin* — Space Academy by the name of A. F. Mozhayskiy, St. Petersburg

P. 16—20.

AUTOMATION OF A SAFETY OF CORPORATE NETWORKS

The information safety of corporate networks is provided at the expense of use of intellectual means in systems of protection. The giving to systems of protection of biosimilar properties, such as adaptation and self-organizing, testifies to a stage of automation of information safety. It is offered a task of automation of information safety of corporate networks to decide from positions of biosystem analogy: analogies in hierarchical organization of corporate networks, hierarchy of system of protection, field representation of the information and evolutionary processes of inheritance, development, adaptation and selection.

Keywords: information systems protection, the mechanism of protection, means of intellectual protection, neural network, immune system.

Data on authors

- Andrey Vyacheslavovich Sukhanov* — Special works Department „EURECA“, St. Petersburg,
E-mail: avsuhanov@eureca.ru
- Gennadiy Filippovich Nesteruk* — Chief Scientific Officer FGUP „VECTOR“, St. Petersburg,
E-mail: nest_g_p@yahoo.com

P. 21—24.

CONTROL OF COURSE MOVEMENTS OF A CAR USING AN ALGORITHM OF SEQUENTIAL OPTIMIZATION

We consider the optimal control of the trajectory of a car movement in a horizontal plane. The solution is formed using the algorithm of sequential optimization with the target functional hierarchy. The first functional describes the requirements regarding the angle of the trajectory deflection, while the second one regarding the linear coordinates of the center of mass of the car at the final moment. Moreover, the second functional includes the penalty function characterizing the forbidden areas of traffic defined by the dynamics of the other moving vehicles. We present the numerical modeling results showing that the algorithm of sequential optimization allows solving the problem increasing the traffic safety by avoiding the collisions with the other moving car.

Keywords: car, optimization of management, dynamics.

Data on authors

- Dmitry Sergeevich Kabanov* — Moscow Aviation Institute (State Technical University),
E-mail: kabanov@sk11424.spb.edu
- Boris Aleksandrovich Krasheninnikov* — Baltic State Technical University „Voenmech“ by the name
D. F. Ustinov, St. Petersburg,
E-mail: kabanov@sk11424.spb.edu

P. 25—30.

ANALYZE OF DIFFICULT MULTIIMAGES IN A MODE OF REAL TIME

The article deals with the method of synthesis systems analyzes of difficult multiimages in real time through the use of artificial neural technologies. New methods are devoted to a sequential-parallel analysis of the large sequences of images in real time. The results of a hardware-software implementations and practical implementations of the proposed neural technologies and methods of assessing the potential problems of terrorist danger of mobile and stationary objects, equipped by TV cameras and other sensors, are presented.

Keywords: image analyze, artificial neural net, real time.

Data on authors

- Adil Vasilievich Timofeev* — St. Petersburg Institute of Computer Science and Automation of Russian
Academy of Science, E-mail: tav@iiias.spb.su
- Oleg Aleksandrovich Derin* — St. Petersburg institute of Computer Science and Automation of Russian
Academy of Science, E-mail: derinoa@mail.ru

P. 30—34.**THE DESIGN OF THE REDUNDANT FAULT-TOLERANT CONTROL SYSTEM SOFTWARE**

With the purpose of control system fault tolerance it is offered to use multiversion methodology of software design. Multiversion programming supposes the introduction of redundant program modules that essentially raises reliability characteristics of the control system software. However it demands additional resources. The method presented in the paper allows generating multiversion software structure, considering a number of criteria such as software reliability, cost of program component realization, required to the module processor time and so forth. It is presented the approach to definition of weight coefficients on the basis of criteria ranging, that simplifies decision maker work of the criteria importance numerical value ordering.

Keywords: multiversion software, redundancy, fault-tolerance, control systems, multiple criteria decision making.

Data on authors

- Igor Vladimirovich Kovalev* — Siberian State Aerospace University by the name M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, E-mail: kovalev.fsu@mail.ru
- Olga Igorevna Zavjalova* — Siberian Federal University, Krasnoyarsk, E-mail: zav.olga888@mail.ru
- Alexey Nikolaevich Lajkov* — Siberian State Aerospace University by the name M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk

P. 35—41.**DEFINITION OF PARAMETERS OF MODEL OF THE ASYNCHRONOUS ENGINE ON THE HELP DATA**

The technique of definition of parameters of an equivalent circuit of the asynchronous short-circuited engine, providing conformity of settlement coordinates of the mechanical characteristic to the help data is offered.

Keywords: model of the asynchronous short-circuited engine, a technique of definition, parameters of model.

Data on authors

- Aleksander Anatolievich Usoltsev* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, E-mail: uaa@nwgsm.ru
- Dmitriy Vyacheslavovich Lukichev* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, E-mail: ludimit@yandex.ru

P. 42—46.**DEVELOPMENT OF TELEVISION METHODS OF TUBES GEOMETRIC PARAMETERS MEASUREMENT**

There considered the main trends of development television device of tubes geometric parameters measurements, structured schemes and methods of apparatus realization, allowing exclude the influence of television camera and object mutual location on result of the measurements. Use the modern methods of scenes processing allows to raise up accuracy and stability of investigation devices. The results of the experimental studies have shown the possibilities of required accuracy achievement.

Keywords: geometrical parameters of tube, remote measurement, a television camera, an error of processing of the image.

Data on author

- Igor Yurjevich Zhiganov* — Samara State Aerospace University by the name S. P. Korolev, E-mail: aps@ssau.ru

P. 47—51.

MODULE OF MANAGEMENT OF THE NMR-TOMOGRAPH

The module of input—output used for reception of images on a nuclear magnetic resonance a tomograph is described. The program of management written in language C++, provides formation of starting pulses of resonant frequency, submission of pulse gradients of a magnetic field through the interface, realizes summation of signals and the consecutive reference(manipulation) to fourier-transformation with a conclusion of images to the monitor for an estimation of their quality. The program provides consecutive summation of tomograms for decrease(reduction) шумового a background and increase of contrast of images.

Keywords: nuclear magnetic resonance a tomography, the module of input—output.

Data on author

Yury Iljich Neronov — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
E-mail: yinernov@mail.ru

P. 52—56.

RESEARCH OF ABILITY DISCLOSURE OBJECTS ON BASIS OF POLARISED CONTRAST

The possibility of the object imaging on the basis of polarization contrast with the spreading environment (background) is considered. To substantiate given guess there were made measurements of polarization of the light, reflected from the nitro enamel covering. They allowed to fulfill the measurement technique and to consider the distinction of polarizing characteristics of samples and natural coverings. The established distinctions of the polarization mode of completely polarized components and the polarization degree of the reflected light confirm the validity of the assumption mentioned above and can be used for the increase of detection probability of the objects with nitro enamel coverings against the spreading environment.

Keywords: polarization, reflective ability, matrix of light, degree of polarization, polarizing contrast, probability of discovery object.

Data on authors:

- Sergei Andreevich Alekseev* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
E-mail: asast@mail.ru
- Sergei Aleksandrovich Kononov* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
E-mail: sergei_kononov@yahoo.com
- Konstantin Gennadievich Sekarin* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics
- Vladimir Anatolievich Trofimov* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
E-mail: troftu@mail.ru

P. 57—65.

ELLIPSOMETRY OF OPTICAL CONNECTIONS OPTOELECTRONICS ELEMENTS

Ellipsometry method of the analysis of polarization-optical properties of elements of optoelectronics in without adhesive optical connections are considered. Methods of diagnostics tensely-deformed conditions of elements and definitions of their optical characteristics in a zone of optical contact of non-uniform superficial layers are submitted.

Keywords: ellipsometry, optical connections, elements of optoelectronics.

Data on authors

- Viktor Trofimovich Prokopenko* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Ph. (812) 595-41-26
- Igor Anatolievich Khramzovsky* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics
- Vladimir Sergeevich Zemlyansky* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics
- Yury Vasilievich Lisitsyn* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics
- Konstantin Gennadievich Sekarin* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics

P. 65—69.

PARAMETRICAL METHOD OF CONSTRUCTION OF THE ELLIPSE OF POLARIZATION OF RADIATION

Simplicity, presentation and self-descriptiveness a parametrical method of construction of an ellipse of polarization of the radiation past(last) through system of crystal plates are shown. At presence of the big number of crystal plates it is expedient to use a parametrical method for definition of a kind of polarization. With the help of two and more crystal plates it is possible to adjust system for any length of a wave for the task of a kind of polarization with required characteristics by turn of crystal plates concerning a direction transmission a polarizer.

Keywords: ellipse of polarization, parametrical method, crystal plate, ordinary / extraordinary beam, transmission direction, index of refraction.

Data on authors

- Aleksander Vyacheslavovich Syuy* — Far East State University of Means of Communication, Khabarovsk, E-mail: alsyuy271@mail.ru
- Natalia Anatolievna Kravtsova* — Far East State University of Means of Communication, Khabarovsk, E-mail: fizika@festu.khv.ru
- Vladimir Ivanovich Stroganov* — Far East State University of Means of Communication, Khabarovsk, E-mail: fizika@festu.khv.ru
- Victor Vladimirovich Krishtop* — Far East State University of Means of Communication, Khabarovsk, E-mail: fizika@festu.khv.ru

P. 69—72.

INFLUENCE DECREASING PARALLAX ON VIDEOIMAGES STABILIZATION ERROR

The method of spatial stabilization of the videoimage, reducing influence of the parallax, based on use of the free factors describing distances up to various objects of a stage is submitted. It is steady enough against the indignations connected to movement of objects and dynamic handicaps. The algorithm constructed on this method demands rather small computing expenses.

Keywords: videostabilization, effect of a parallax, QR-decomposition, Householder transformation.

Data on authors

- Vladimir Mikhailovich Demidov* — Moscow State University of Geodesy and Cartography,
E-mail: demidovvova@yandex.ru
- Aleksander Yurievich Polyakov* — Moscow State University of Geodesy and Cartography,
E-mail: apolyakov1985@rambler.ru

P. 72—75.

NULL CORRECTORS FOR THE ASPHERICAL SURFACES IN THE SCHEMES OF THE MIRROR TELESCOPES

The procedure for the design of the lens correctors for the higher-order aspherical surfaces in the four-mirror scheme of the telescope with the spherical primary diameter of 10 m is considered. The null correctors for the first two aspherical surfaces which are higher-order hyperboloids may be formed as modified Offner scheme. For the prolate spheroid (the last mirror in the telescope scheme) the null corrector which consists of the meniscus with the aspherical surface and the plane-parallel plate can be used.

Keywords: null correctors, aspherical surfaces, Offner null corrector.

Data on authors

- Victor Alekseevich Zverev* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, E-mail: post_vaz@rambler.ru
- Galina Eduardovna Romanova* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, E-mail: romanova_g_e@mail.ru

P. 76—78.

COMPOSITION MULTICHANNEL INFRARED AND MILLIMETER WAVE BAND DEVICES

Detection low contrast objects with different temperature is big problem for many type optiko-electronic systems. This article describe various many canal apparatus where every one canal decide his proposition.

Keywords: low contrast object, the multichannel equipment, a spectral range.

Data on authors

- Aleksander Akhatovich Umbitaliev* — Scientific Research Institute of Television, St Petersburg,
E-mail: niit@infos.ru
- Aleksander Konstantinovich Tsytsulin* — Scientific Research Institute of Television, St Petersburg,
E-mail: niit@infos.ru
- Vsevolod Dmitrievich Smirnov* — Scientific Research Institute of Television, St Petersburg,
E-mail: niit@infos.ru
- Ivan Denisovich Egelsky* — Scientific Research Institute of Television, St Petersburg,
E-mail: niit@infos.ru

P. 79—84.**SOME PROPERTIES OF SILICON STRUCTURES, RECEIVED BY LASER MICRO-STRUCTURIZATION**

The influence of laser microstructurization of mono-crystal silicon on morphological and optical properties of the irradiated zones is considered. There are very compound changes of structure on the surface of irradiated zone of silicon, accompanied the morphotropy of silicon and the formation of nanoclusters. At the same time the change of transmission coefficient of irradiated zone of silicon surface was found, that means the change of optical properties of silicon.

Keywords: laser microstructurization, irradiated zones, silicon nanocluster, transmission coefficient.

Data on authors

- Albert Matveevich Skvortsov* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, E-mail: a-skvortsov@yandex.ru
- Svetlana Sergeevna Dyslovenko* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, E-mail: puushistaya@mail.ru
- Maxim Viktorovich Pogumirsky* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, E-mail: max33-05@mail.ru
- Pham Quang Tung* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, E-mail: quang_tung@yahoo.com
- Vladimir Ivanovich Sokolov* — Physico-Technical Institute by the name A. F. Ioffe of Russian Academy of Science, St. Petersburg, E-mail: V.Sokolov@mail.ioffe.ru

P. 84—86.**INVESTIGATION OF THE COMPOSITION OF PETROLEUM-WATER-GAS MIXTURE BY NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE METHOD**

Method of investigation of the composition of petroleum-water-gas mixture, on the basis of the different values of magnetic susceptibility and time of the longitudinal magnetic relaxation of the components has been described. Method consists in the inversion of the nuclear magnetization of π -impulse and measurement of the signal amplitude of free induction at the moment of the time, when magnetization of one of the liquid components or the entire mixture is equal to zero.

Keywords: nuclear magnetic resonance, petroleum-water-gas mixture, composition, measurements.

Data on author

- Aleksander Ivanovich Zhernovoy* — St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), E-mail: azh@lti-gti.ru

ИНФОРМАЦИЯ

СООБЩЕНИЕ О КОНКУРСАХ ВЫПУСКНЫХ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ СПЕЦИАЛИСТОВ, БАКАЛАВРОВ И МАГИСТРОВ 2007 г. ПО ОПТОТЕХНИКЕ, ФОТОНИКЕ, ОПТОИНФОРМАТИКЕ И ПРИБОРОСТРОЕНИЮ

12-е конкурсы выпускных квалификационных работ (ВКР) специалистов, бакалавров и магистров (магистерских диссертаций) по оплотехнике, фотонике, оптоинформатике и приборостроению в 2007 г. проведены Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО) как базовым вузом по образованию в области приборостроения и оплотехники. Конкурсы проводятся с 1996 г. по решению Совета учебно-методического объединения по образованию в области приборостроения и оплотехники (далее — Совет УМО). Для координации организации и проведения студенческих олимпиад и конкурсов в составе УМО создан Совет по студенческим олимпиадам и конкурсам. Совет собирается один—два раза в год и обсуждает методические, организационные и другие текущие вопросы организации и проведения студенческих олимпиад и конкурсов, проводимых вузами России, реализующих учебные программы высшего профессионального образования в области приборостроения.

Конкурсы выпускных квалификационных работ специалистов, бакалавров и магистров (магистерских диссертаций) по направлениям подготовки „Оплотехника“, „Фотоника и оптоинформатика“ и „Приборостроение“ 2007 г. проводились в соответствии с Приказом Министерства образования и науки РФ № 326 от 14 февраля 2007 г. „Об организации и проведении Всероссийской студенческой олимпиады в 2007 году“, в котором утверждены сроки проведения конкурсов. Состав оргкомитета, жюри и рабочие группы конкурсов утверждены приказами ректора СПбГУ ИТМО №387-од от 14.11.2007 г. Этими же приказами утверждены Положения о конкурсах.

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

В 2007 г. в рабочую группу конкурса выпускных квалификационных работ по *оплотехнике, фотонике и оптоинформатике* поступило 18 работ из 4 вузов РФ. Участники Всероссийского конкурса 2007 г.: Томский государственный университет (ТГУ), Сибирская государственная геодезическая академия (СГГА), Владивостокский государственный университет экономики и сервиса (ВГУЭиС), СПбГУ ИТМО.

Среди поступивших ВКР — 14 работ специалистов, 1 — бакалавра и 3 магистерских диссертации по „Оплотехнике“, „Фотонике и оптоинформатике“.

Материалы 4 работ апробированы на конференциях различного уровня с публикацией материалов докладов. Авторы 12 работ использовали при их написании материалы научных статей и конференций. Материалы Интернета использованы авторами при написании 17 работ. Документы о практическом использовании результатов работ присутствуют в материалах 4 ВКР.

По результатам конкурса определены следующие победители:

- Боровский Евгений Леонидович (СПбГУ ИТМО) — 1-е место;
- Рябченко Даниил Олегович (ТГУ) — 2-е место;
- Золотова Елизавета Юрьевна (СПбГУ ИТМО) — 3-е место;
- Фесько Юрий Александрович (СГГА) — 1-е место среди работ бакалавров;
- Бектемиров Едиль Алтыбаевич (ТГУ) — 1-е место среди работ магистров;
- Козлович Александр Николаевич (ВГУЭиС) — диплом за лучшее IT-представление работы.

В 2007 г. в рабочую группу конкурса выпускных квалификационных работ по *приборостроению* поступило 32 работы из 7 вузов РФ. Участники Всероссийского конкурса ВКР 2007 г.: Орловский государственный технический университет (ОГТУ), Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ), СГГА, филиал „Восток“ Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева (г. Чистополь), ВГУЭиС, Северо-Западный государственный заочный технический университет (СЗГЗТУ), СПбГУ ИТМО.

Среди поступивших ВКР 29 выпускных квалификационных работ специалистов, 2 — бакалавра и 1 магистерская диссертация по „Приборостроению“ и приборостроительным специальностям.

На конкурс поступило 6 работ, результаты которых опубликованы в открытой печати, всего таких публикаций — 7. Авторы работ, представленных к награждению дипломами конкурса имеют 3 публикации.

Материалы 8 работ апробированы на конференциях различного уровня с публикацией материалов докладов. Авторы 22 работ использовали при их написании материалы научных статей и конференций. Материалы Интернета были использованы авторами при написании 20 работ. Документы о практическом использовании результатов работ присутствуют в материалах 6 работ. По материалам одной работы подана заявка на патент.

По результатам конкурса определены следующие победители:

- Семенов Вячеслав Вячеславович (ОГТУ) — 1-е место;
- Тупик Александра Николаевна (СПбГУ ИТМО) — 2-е место, диплом за лучшую магистерскую диссертацию;
- Степанова Юлия Олеговна (СЗГЗТУ) — 3-е место;
- Степанов Дмитрий Сергеевич (СПбГУ ИТМО) — диплом за лучшую программную разработку для учебного процесса;
- Ганина Альбина Рафкатовна (Казанский государственный технический университет, филиал „ВОСТОК“) — диплом за подробную разработку технологического процесса;
- Кесаева Залина Александровна (СГГА) — диплом за практическую ценность разработки;
- Алексеев Александр Евгеньевич (МГУПИ) — диплом за аргументированный выбор электронных компонентов системы;
- Киреева Анна Сергеевна (СПбГУ ИТМО) — диплом за лучшую бакалаврскую работу;

Награды конкурсов были вручены ректором СПбГУ ИТМО, председателем совета УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники представителям вузов, студенческие работы которых были удостоены наград конкурсов, на пленарном заседании совета УМО, состоявшемся 11 декабря 2007 г. В заседании участвовали представители 33 вузов России, осуществляющих подготовку специалистов, бакалавров и магистров по направлениям подготовки „Приборостроение“, „Оптотехника“, „Фотоника и оптоинформатика“.

Технический директор ЗАО НПФ „Уран“ А. А. Лоскутов от имени фирмы вручил ценные подарки представителям вузов, студенческие работы которых заняли первые три места в конкурсе по приборостроению.

Председатель оргкомитета,
проректор по развитию СПбГУ ИТМО
В. О. Никифоров,

председатель рабочих групп конкурсов
С. С. Гвоздев,

секретари конкурсов
Л. А. Хамитова, А. А. Шилова