
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

Главный редактор М.П. Батура

Редакционная коллегия:

А.П. Кузнецов (зам. главного редактора),
Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),

Т.В. Борботько (ответственный секретарь),
В.Е. Борисенко, С.Е. Карпович, Н.Т. Квасов, В.К. Конопелько,
А.А. Кураев, В.А. Лабунов, В.В. Муравьев, Р.Х. Садыхов

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднар, С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, В.В. Голенков, В.Ф. Голиков, А.Л. Гурский, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, В.А. Емельянов, И.Е. Зуйков, В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов, С.П. Кундас, В.А. Куренев, В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков, Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко, А.А. Петровский, В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, В.А. Сокол, Н.К. Толочко, А.А. Хмыль, В.В. Цегельник, В.А. Чердынцев, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, к. 326
293-88-41

doklady@bsuir.by

www.doklady.bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Лазарук С.К., Купреева О.В., Высоцкий В.Б., Чевычелов А.И., Летохо А.С. Структура и элементный состав анодных алюмооксидных пленок, сформированных в сернокислом электролите высокой концентрации.....	5
Киевец Н.Г., Корзун А.И. Сравнение статистик тестов серий и аппроксимированной энтропии....	12
Колосов С.В. Гиро-ЛБВ с закритической секцией и поглощающими вставками	18
Новикова М.А. Оптические свойства твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{(1-x)}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$	22
Бойправ О.В., Белоусова Е.С., Мохамед А.М.А. Многослойные экраны электромагнитного излучения на основе порошкообразных углеродосодержащих материалов и вспученного перлита	27
Борискевич И.А., Цветков В.Ю. Сопровождение малоразмерных целей с нестационарной видекамеры на основе ковариационных признаков и предсказания	33
Третьяков Ф.И., Серебряная Л.В. Методы автоматического построения рефератов на основе частотного анализа текстов	40

Железняк В.К., Рябенко Д.С. Метод сигнала ортогональной частотной манипуляции без разрыва фазы для оценки защищенности от утечки речевых сигналов в цифровой форме.....	45
Сидоренко А.В. Контроль хаотичности выходных последовательностей алгоритма шифрования на основе динамического хаоса	51
Панькова В.В., Саломатин С.Б. Криптографический анализ кодовых структур кривой Эрмита на соответствие требованиям систем защиты информации	58
Курочка К.С., Асенчик О.Д., Стародубцев Е.Г. Построение программно-аппаратного комплекса для исследования распределения электромагнитного поля в ближней зоне диэлектрических и металлических наночастиц.....	64
Гейстер С.Р., Чан Тай Чонг. Математическая модель и время задержки отраженного сигнала при гидроакустическом синтезе апертуры антенны	71
Буйлов Е.Н., Горшков С.А. Снижение уровня боковых остатков в лестничных дискретных частотно-манипулированных сигналах с линейно-частотно-модулированными дискретами.....	78
Мохаммед А.С., Муха Е.В., Степанов А.А., Пасынков А.В., Смирнов А.Г. Методика и программно-аппаратный комплекс функционального контроля микродисплейного модуля видеопроекторного устройства персонального типа.....	85
Кривошея Ю.Н. Прецизионные стабилизаторы напряжения положительной полярности с низким остаточным напряжением и защитой от воздействия разряда статического электричества.....	90
Пилиневич Л.П., Гончарик Е.В. Оценка выбора решений системы управления при чрезвычайных ситуациях техногенного характера	95
Хорошко Л.С., Ашариф А.М., Ореховская Т.И., Меледина М.В., Сокол В.А., Колосницын Б.С., Гапоненко Н.В. Фотолитография на пленочных структурах ксерогель/пористый анодный оксид алюминия, сформированных в различных электролитах	101
Лихачев С.А., Еленская С.В., Ващилин В.В., Гурский И.С. Объективизация нарушений биомеханики поясничного отдела позвоночника по данным видеоанализа у пациентов с неврологическими проявлениями остеохондроза	106
Ильин В.М. Применение арифметических прогрессий для решения алгебраических уравнений высоких степеней	112

Учредитель: учреждение образования
"Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"

Редактор Т. В. МИРОНЕНКО
Компьютерный дизайн и верстка О. В. БОЙПРАВ

Подписано в печать 07.05.2014. Формат 60×84 1/4. Гарнитура "Таймс". Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 14,18. Уч.-изд. л. 12,7. Тираж 110 экз.
Индекс для индивидуальной подписки 00787.
Индекс для ведомственной подписки 007872.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/0494175 от 03.04.2009. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2014

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

Editor-In-Chief M.P. Batura

ADDRESS OF EDITORIAL OFFICE

220013, Minsk, P. Brovka Str., 6, Room 326

293-88-41

doklady@bsuir.by

www.doklady.bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Lazarouk S.K., Kupreeva O.V., Vysotski V.B., Chavychelau A.I., Letoho A.S. Structure and element composition of anodic alumina films formed in high concentrated sulfuric electrolyte	5
Kiyevets N.G., Korzun A.I. Comparison of serial and approximate entropy test statistics	12
Kolosov S.V. Gyro-TWT with cut-off section and absorb inserts	18
Novikova M.A. Optical properties of solid solutions $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{(1-x)}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$	22
Boiprav O.V., Belousova E.S., Mohamed A.M.A. Multilayer electromagnetic radiation shields based on powdered carbon materials and expanded perlite	27
Baryskievic I.A., Tsviatkou V.Yu. Tracking of low-sized targets from non-stationary camera based on covariance features and predictor	33
Tretyakov F.I., Serebryanaya L.V. Automatic construction methods of abstracts on the basis of the texts frequency analysis	40
Zheleznyak V.K., Ryabenko D.S. Method of orthogonal frequency manipulation signal without rupture of the phase for the estimation of security from leak of speech signals in the digital form	45
Sidorenko A.V. The control of the chaotic regimes in encryption algorithm based on dynamic chaos	51
Pankova V.V., Salomatin S.B. Cryptographic analysis of the code structures of Hermite curve for compliance with the requirements of information security systems	58
Kurachka K.S., Asenchik O.D., Starodubtsev E.G. Program-software complex for calculations of the electromagnetic field distribution in the near field of dielectric and metal nanoparticles	64
Heister S.R., Tran Tai Trong. Mathematical model and delay time of reflected signal in synthetic aperture sonar	71
Builov E.N., Gorshkov S.A. Level decreasing of the lateral rests in the ladder discrete in frequency manipulated signals with the linearly-frequency-modulated impulses	78

Mohammed A.S., Mukha Y.U., Stsiapanau A.A., Pasynkov A.V., Smirnov A.G. Hard/software functional control method of microdisplay modules for personal videoprojection systems	85
Kryvasheya Y.N. Precision voltage stabilizers of positive polarity with the low residual voltage and protecting from electrostatic discharge	90
Pilinevich L.P., Hancharyk A.V. Evaluation of the decision making of the control system during emergencies of man-induced nature	95
Khoroshko L.S., Asharif A.M., Orekhovskaya T.I., Meledina M.V., Sokol V.A., Kolosnitsin B.S., Gaponenko N.V. Photolithography of film structures xerogel/porous anodic alumina prepared in various electrolytes.....	101
Likhachev S.A., Elenskaya S.V., Vashchilin V.V., Goursky I.S. The objectivity of biomechanical disorders of the lumbar spine according to video analysis in patients with neurological manifestations of spine osteochondrosis	106
Ilyin V.M. The arithmetic progression application for solving of high degrees algebraic equations	112

УДК. 539.216

СТРУКТУРА И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ АНОДНЫХ АЛЮМООКСИДНЫХ ПЛЕНОК, СФОРМИРОВАННЫХ В СЕРНОКИСЛОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

С.К. ЛАЗАРУК, О.В. КУПРЕЕВА, В.Б. ВЫСОЦКИЙ, А.И. ЧЕВЫЧЕЛОВ, А.С. ЛЕТОХО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, 220013, Минск, Беларусь*

Поступила в редакцию 31 октября 2013

Представлены результаты исследования электрохимического анодирования алюминиевой фольги и тонких алюминиевых пленок, осажденных на кремниевые пластины, в сернокислом электролите высокой концентрации при разных напряжениях формовки. Показано, что при увеличении напряжения формовки более 16 В происходит формирование трубчатой структуры анодного оксида, большую часть которого составляет гидроксид алюминия. При этом коэффициент роста толщины анодных пленок увеличивается до 3, а коэффициент формовки гексагональных ячеек снижается до 2,2 нм/В.

Ключевые слова: анодирование, пористый оксид алюминия, наноструктуры, гидроксид алюминия.

Введение

Пористый оксид алюминия привлекает внимание исследователей из-за своей упорядоченной наноструктуры [1, 2], что позволяет его использовать как формозадающую матрицу для формирования наноструктур других материалов. Кроме этого, пористый оксид алюминия может использоваться как внутриуровневый диэлектрик алюминиевой металлизации интегральных микросхем [3] и для формирования ориентирующих пленок в жидкокристаллических дисплеях [4, 5]. Для формирования минимальных размеров гексагональных ячеек пористого оксида алюминия используются электролиты на основе серной кислоты, причем увеличение концентрации сернокислого электролита приводит к уменьшению структурных размеров. Однако большинство исследований проводилось в сернокислых электролитах с концентрацией менее 50 масс. %. В настоящей работе проведено исследование структуры и элементного состава анодных пористых пленок, сформированных анодированием алюминия в сернокислых электролитах с концентрацией более 50 масс. %.

Эксперимент

Алюминиевая фольга (чистота 99,9 %) толщиной 100 мкм и алюминиевые пленки толщиной 0,1 мкм, осажденные на кремниевую подложку магнетронным распылением, использовались для анодирования в электролитах на основе водных растворов серной кислоты с концентрацией более 50 масс. %. Анодирование выполнялось при температуре электролита 20 ± 2 °С. Напряжение формовки линейно увеличивалось до 10÷35 В со скоростью развертки 1 В/с и затем поддерживалось на заданном значении до окончания анодного процесса в течении 5÷10 мин. Окончание анодного процесса для алюминиевых пленок, осажденных на кремниевые пластины, определялось по спаду анодного тока до уровня ниже 50 % от его максимального значения во время анодирования. Тонкопленочные структуры на кремнии использовались для определения коэффициента увеличения толщины анодных пленок.

Структура анодных пленок анализировалась при помощи растровой электронной

микроскопии (РЭМ). Коэффициент увеличения толщины определяли из соотношения толщины анодных оксидных пленок и исходных алюминиевых пленок, осажденных на кремний. Для определения элементного состава анодных оксидных пленок использовали рентгеноспектральный (EDX), Оже и вторичный ионный масс-спектрометрический (ВИМС) анализы.

Результаты и их обсуждение

Исследование процесса пористого анодирования алюминия проводилось в сернокислых электролитах с концентрацией в диапазоне от 50 до 75 масс. %. Исследования показали, что использование концентраций более 70 масс. % нецелесообразно из-за высокой скорости химического травления формируемых оксидов в используемых электролитах. Электрохимическое анодирование в электролитах с концентрацией от 50 до 62 масс. % практически не отличалось от анодного процесса с концентрацией 63 масс. %. Выбор электролита с концентрацией 63 масс. % связан с удобством его приготовления, так как он создается разбавлением исходного раствора концентрированной серной кислоты (87 масс. %) с водой при соотношении объемов 1:1. Проведенные исследования показали, что при формировании пористых пленок толщиной до 10 мкм в 63 % электролите заметных эффектов химического растрывания структурных элементов не наблюдалось.

На рис. 1, *а–в* представлены фотографии поперечного сечения пористых алюмооксидных пленок, сформированных на алюминиевой фольге при напряжениях формовки 12, 15, 25 В. Структура пленки, сформированной при напряжении формовки 12 В, нанопористая, вид сверху которой напоминает пчелиные соты, в то время как структура пленок, сформированных при 25 В, трубчатая. Отличие поперечного сечения нанопористой структуры от трубчатой проявляется в том, что скол нанопористых образцов проходит через середину гексагональных ячеек, т.е. через поры, в то время как скол трубчатых структур проходит в основном вдоль внешних границ гексагональных ячеек, минуя поры. Кроме этого поры первой структуры не расположены строго вертикально и местами как бы огибают алюминиевые зерна, из которых состоит алюминиевая фольга. Поры трубчатой структуры расположены практически перпендикулярно обрабатываемой поверхности и при этом заметна высокая самоорганизация гексагональных алюмооксидных ячеек. Структура пористого оксида, сформированного при напряжении формовки 15 В, состоит из верхнего нанопористого слоя и нижнего трубчатого. Нанопористый слой отмечен на фотографии прямоугольником белого цвета, а область с трубчатой структурой отмечена прямоугольником черного цвета. Отметим, что диаметр формируемых при 15 В трубок составляет 40÷50 нм.

Важно отметить, что проведение анодного процесса на алюминиевой фольге при напряжении формовки 30 В и выше приводит к появлению неконтролируемых локальных пробоев и выгоранию алюминия в месте пробоя. При этом проведение анодного процесса на алюминиевых пленках, осажденных на кремниевые подложки, позволило использовать напряжение формовки до 35 В без заметных локальных пробоев в формируемых пленках. На рис. 1, *г–е* представлены фотографии поперечного сечения пористых алюмооксидных пленок, сформированных анодированием алюминиевых пленок на кремниевых подложках. Так же, как и при анодировании алюминиевой фольги, при напряжении формовки 12 В на алюминиевых пленках формируется нанопористая структура оксида, а при напряжениях более 20 В наблюдается трубчатая структура анодных пленок. Пленки, сформированные при напряжении формовки 15 В, опять-таки имели смешанную структуру: местами нанопористую, местами трубчатую. Наличие трубчатой и нанопористой структур на одном и том же поперечном сечении исследуемых образцов свидетельствует о том, что переход от нанопористого оксида к трубчатому не является резким и может проходить постепенно в определенном диапазоне режимов анодного процесса. Известно [1], что трубчатая структура в отличие от нанопористой формируется при более высоких плотностях анодного тока. На основании этого можно предположить, что в структурах, представленных на фотографиях (*б*) и (*д*), в процессе их формовки происходило локальное увеличение плотности анодного тока, что и привело к локальному формированию трубчатой структуры. Причиной увеличения плотности анодного тока в потенциостатическом режиме может быть увеличение температуры пористого оксида за счет джоулевого тепла, выделяемого внутри барьерного слоя растущего оксида [6].

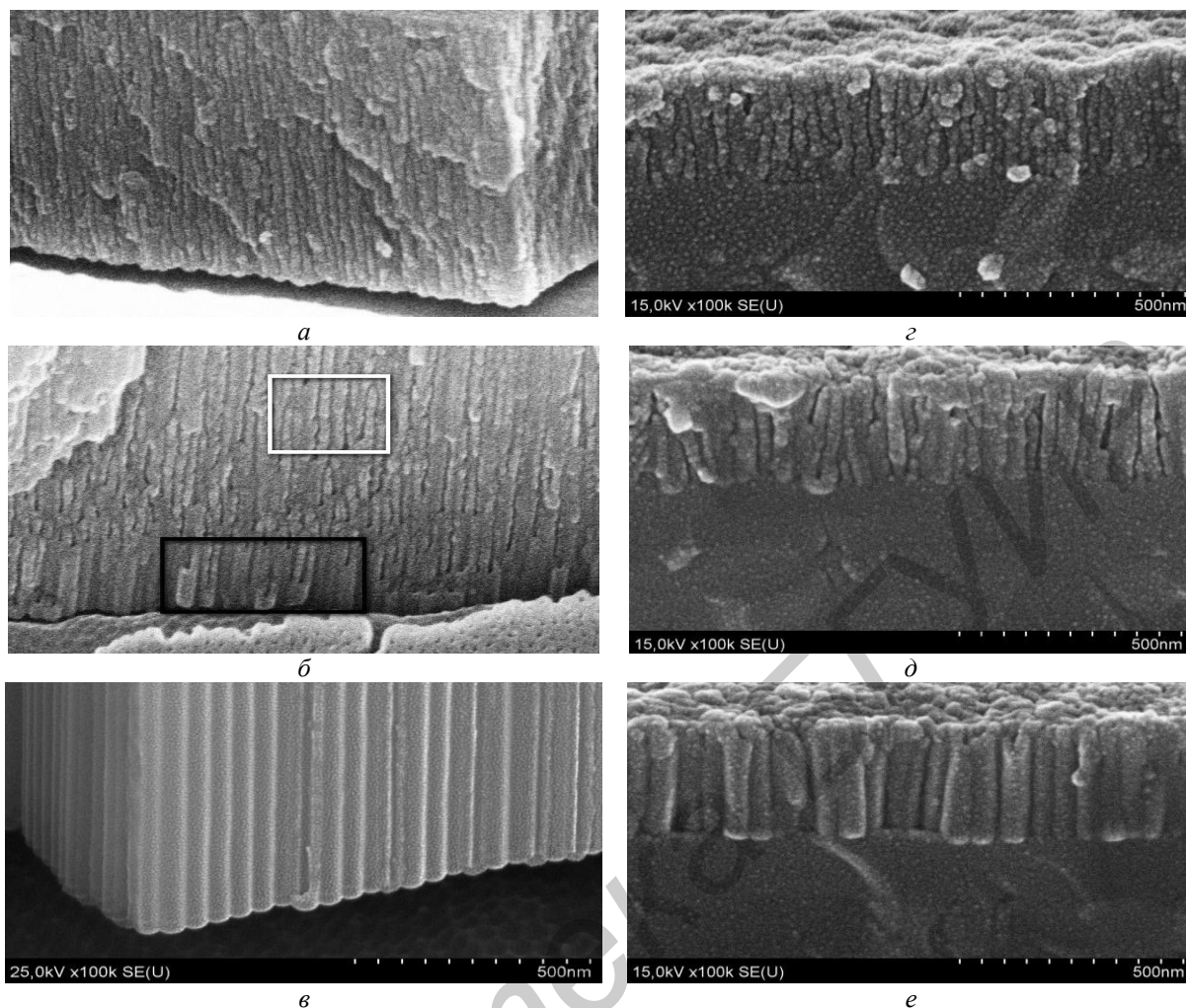


Рис. 1. Микрофотографии поперечного сечения пористых оксидных пленок сформированных анодированием алюминиевой фольги (*a, б, в*) и алюминиевых пленок на кремниевых подложках (*г, д, е*) при напряжениях формовки 12 В (*a, г*), 15 В (*б, д*) и 25 В (*в, е*); внутри белого прямоугольника расположен оксид с пористой структурой, а внутри черного прямоугольника – оксид с трубчатой структурой

Для установления причин, определяющих тип структуры пористых оксидных пленок, была записана вольтамперная зависимость процесса анодирования при скорости линейной развертки напряжения 10 В/с. Результаты измерений представлены на рис. 2. Здесь же показана зависимость сопротивления формируемой пленки от анодного напряжения. Сопротивление формируемой пленки определялось как отношение напряжения формовки к току, протекающему через пленку. При этом, учитывая, что сопротивление электролита значительно меньше сопротивления пленки, влиянием электролита пренебрегали. Как видно из графика, обе зависимости имеют экстремальные точки в области напряжения около 15 В. Именно при этом напряжении формовки происходит переход от нанопористой структуры к трубчатой. Кроме типа структуры происходят и другие изменения в структурных параметрах формируемых пленок. На рис. 3 показаны зависимости коэффициента роста толщины и расстояния между центрами пор формируемых анодных пленок от напряжения формовки процесса анодирования. Отметим, что расстояние между центрами пор соответствует внешнему размеру элементарной ячейки, и в литературе для него используется термин межпоровое расстояние. Как видно из графика рис. 3, при переходе от нанопористой структуры к трубчатой происходит увеличение коэффициента роста толщины от 2 до 2,5 с последующим ростом этого параметра при увеличении напряжения формовки до 3. Как показано в [7], именно механические напряжения, возникающие в процессе анодирования, являются причиной отделения соседних элементарных ячеек оксида друг от друга при раскалывании образцов в вертикальном направлении, что и приводит к формированию трубчатой структуры анодных

пленок. Кроме этого, чем больше коэффициент увеличения толщины, тем выше самоупорядочивание трубчатой структуры [1, 7].

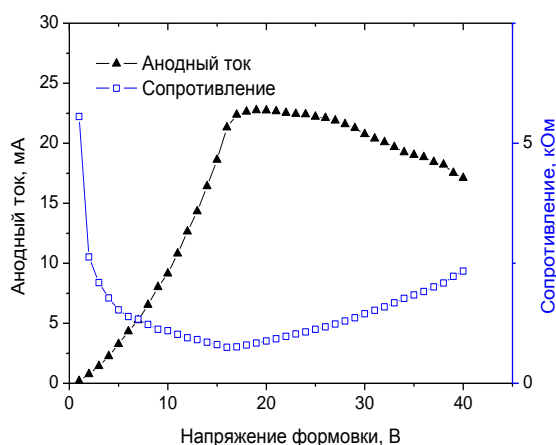


Рис. 2. ВАХ системы алюминий/серноокислый электролит и зависимость сопротивления формируемой пленки от анодного напряжения. Площадь анодируемой алюминиевой поверхности $0,3 \text{ см}^2$

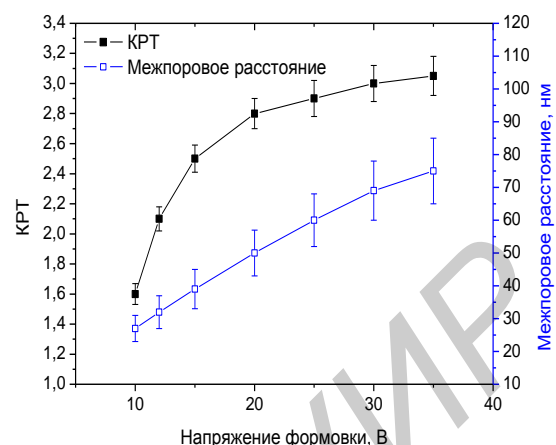


Рис. 3. Зависимости коэффициента роста толщины и расстояния между центрами пор формируемых анодных пленок от напряжения формовки процесса анодирования

Как уже отмечалось выше, в анодных пленках, сформированных при напряжении формовки 15 В, одновременно наблюдаются как нанопористые, так и трубчатые структуры. В связи с тем, что нанопористым структурам соответствует коэффициент увеличения толщины менее 2,2, а в трубчатых структурах этот параметр более 2,5, то между областями с различными типами структуры возникают механические напряжения, что в конечном счете приводит к растрескиванию формируемой пленки по границе раздела между нанопористым и трубчатым слоями.

Еще одним отличием процессов формирования нанопористого и трубчатого анодных оксидов является различие их коэффициентов формовки, определяемых отношением межпорового расстояния к напряжению формовки анодирования. В частности, для нанопористых пленок этот параметр находится в диапазоне от 2,7 до 2,6 нм/В, в то время как для трубчатых пленок его величина составляет от 2,5 до 2,2 нм/В. Отметим, что величины коэффициентов формовки для электролитов с концентрацией более 50 масс. % превосходят аналогичные величины для электролитов с более низкой концентрацией серной кислоты. Тем не менее, эта закономерность также наблюдалась и в низкоконцентрированных электролитах [7]. Это свидетельствует о том, что внутри барьерного слоя напряженность электрического поля в трубчатых структурах значительно превышает аналогичную величину для нанопористых пленок. Этому еще способствует тот факт, что пористость трубчатых структур меньше пористости обычных нанопористых аналогов [7]. Расчет напряженности электрического поля по методике, описанной в [8], показал, что ее величина на дне пор трубчатых структур может достигать и даже превышать 10^{10} В/м. Такой высокий уровень напряженности электрического поля достижим только в наноразмерных структурах и в объемно-однородных твердых материалах не наблюдается. Это может быть причиной появления новых эффектов и явлений на наноуровне. Поэтому формирование пористых анодных пленок с трубчатой структурой заслуживает тщательного исследования как для практического применения, так и для получения новых фундаментальных знаний.

На рис. 4 представлены результаты исследования элементного состава пленки, сформированной при напряжении 25 В методом рентгеноспектрального анализа. Особый интерес представляет соотношение атомов кислорода к атомам алюминия в исследуемых пленках. Если в нанопористых пленках это соотношение составляет $\sim 1,5$, то в трубчатых $\sim 3,0$. Исследование состава анодного оксида алюминия при помощи ВИМС анализа показало, что в нанопористых алюмооксидных пленках содержание водорода составляет единицы ат. %, в то время как в трубчатых структурах содержание водорода увеличивается более чем на порядок. На основании чего можно сделать вывод, что алюмооксидные нанопористые пленки в

основном состоят из окиси алюминия Al_2O_3 , в то время как анодные пленки с трубчатой структурой в основном состоят их гидроокиси алюминия $Al(OH)_3$. Это объясняет отличия структурных параметров нанопористых и трубчатых структур, таких как пористость и коэффициент увеличения толщины в процессе анодирования.

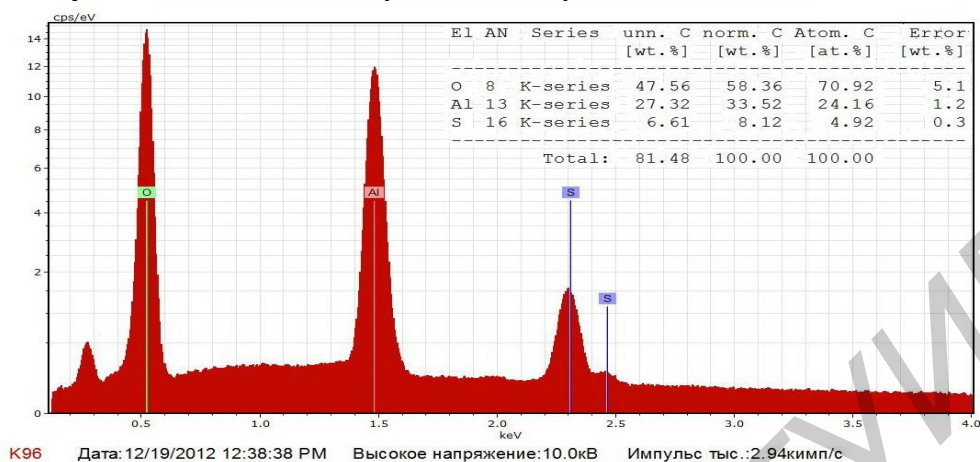


Рис. 4. Результаты исследования элементного состава исследуемой пленки, сформированной при напряжении 25 В методом рентгеноспектрального анализа

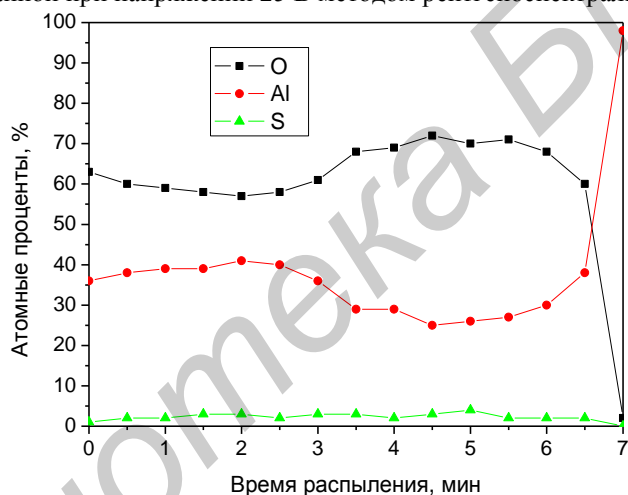


Рис. 5. Результаты Оже-анализа распределения атомов алюминия, кислорода и серы по толщине формируемых пленок

Для того, чтобы выяснить как распределены атомы алюминия и кислорода по толщине формируемых пленок, был проведен Оже-анализ анодных пленок, сформированных при напряжении формовки 15 В на алюминиевой фольге, при послыном ионном распылении исследуемой пленки. Результаты Оже-анализа представлены на рис. 5. Как видно из рисунка, соотношение атомных процентов кислорода и алюминия составляет $\sim 1,5$ в верхней части пленки, имеющей нанопористую структуру. В нижней части исследуемой пленки эта величина составляет ~ 3 , что свидетельствует о том, что нижняя часть анодной пленки, имеющая трубчатую структуру, в основном состоит из гидроокиси алюминия. При этом распределение атомов алюминия и кислорода довольно равномерное по толщине нанопористого и трубчатого слоев, что свидетельствует о достаточно высокой воспроизводимости анодных процессов. Кроме этого, следует отметить, что содержание атомов серы в нанопористых пленках составляет $2 \div 3$ ат. %, в то время как эта величина в трубчатых структурах составляет $4 \div 5$ ат. %, что свидетельствует о встраивании анионных комплексов электролита в формируемые анодные пленки. При этом в трубчатых пористых оксидных пленках содержание таких остатков анионных комплексов больше, что также способствует увеличению объема анодных пленок.

Проведенные исследования позволяют предложить следующий механизм формирования пористых алюмооксидных пленок в сернокислых электролитах высокой

концентрации. При напряжениях формовки до 12 В наблюдается обычный процесс пористого анодирования, приводящий к формированию анодного оксида алюминия со стехиометрическим составом близким к Al_2O_3 . При напряжениях 12÷15 В уже формируются анодные оксидные пленки Al_2O_3 с увеличением содержания анионных комплексов и гидроксида алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$, в результате чего содержание атомов кислорода увеличивается по сравнению со стехиометрическим Al_2O_3 . Это вызывает уменьшение сопротивления анодных пленок как видно из графика рис. 2. Минимум сопротивления наблюдается при напряжении формовки 16÷17 В, что соответствует формированию анодных пористых пленок с трубчатой структурой, состоящих из гидроксида алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$ и примесных анионных комплексов $\text{H}_2(\text{SO}_4)$. Дальнейшее увеличение напряжения формовки приводит к формированию анодных пленок с трубчатой структурой с постепенным увеличением сопротивления формируемых пленок, что объясняется увеличением толщины барьерного слоя трубчатой структуры. Таким образом, минимум сопротивления анодных пленок при напряжении формовки 16÷17 В соответствует переходу от формирования нанопористой структуры к трубчатой, а по элементному составу это явление соответствует переходу от формирования пленок Al_2O_3 к формированию пленок $\text{Al}(\text{OH})_3$, чему способствуют высокие напряженности электрического поля внутри барьерного слоя пористых анодных пленок.

Анодные алюмооксидные пленки, сформированные при высоких напряжениях формовки в сернокислых электролитах высокой концентрации, могут использоваться для изготовления самоупорядоченных структур с размерами элементов до 40 нм, что позволяет создавать на их основе формозадающие матрицы, широкоиспользуемые в нанотехнологии для формирования наноструктур из различных материалов. Отметим, что по нашим сведениям самоупорядоченная трубчатая структура алюмооксидных пленок с межпоровым расстоянием менее 50 нм ранее не наблюдалась. Кроме того, пористое анодирование при высоких напряжениях формовки может быть использовано для формирования алюминиевых межсоединений ИС с субмикронными проектными нормами за счет высокой анизотропии анодного процесса [8]. Пленки, сформированные при высоких напряжениях формовки, могут использоваться для создания планарных алюмооксидных волноводов, обладающих минимальными оптическими потерями благодаря низкой пористости таких пленок [9].

Заключение

Проведенные исследования процесса анодирования алюминия в сернокислом электролите высокой концентрации позволили установить напряжение формовки 16 В, при котором происходит переход от формирования оксида алюминия Al_2O_3 к формированию гидроксида алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$. При этом наблюдается переход от формирования нанопористой структуры типа пчелиных сот к трубчатой структуре. Причинами наблюдаемых явлений являются увеличение напряженности электрического поля внутри барьерного слоя пористого оксида при увеличении напряжения формовки анодного процесса.

STRUCTURE AND ELEMENT COMPOSITION OF ANODIC ALUMINA FILMS FORMED IN HIGH CONCENTRATED SULFURIC ELECTROLYTE

S.K. LAZAROUK, O.V. KUPREEVA, V.B. VYSOTSKI, A.I. CHAVYCHELAU, A.S. LETOHO

Abstract

Porous aluminium anodization process has been investigated in 63 wt % sulfuric electrolyte. Porous alumina formed at anodic voltages till 16 V had the «honey comb» cell structure while porous alumina formed at anodic voltages more than 16 V displayed the tubular cell structure with thickness expansion factor more than 2,5. The obtained results can be explained by resulted of $\text{Al}(\text{OH})_3$ formation during anodization process at high electric field inside anodic films.

Список литературы

1. *Chu S., Wada K., Inoue S. et. al. // Adv. Mater.* 2005. Vol. 17. P. 2115.
2. *Lee W // Corrosion* 2010. Vol. 62. № 6. P. 57–63.
3. *Lazarouk S., Katsouba S., Demianovich A. et. al. // Solid-State Electronics.* 2000. Vol. 44. P. 815-818.
4. *Maeda T., Hiroshima K. // Jpn. J. Appl. Phys.* 43 (2004) L1004
5. *Lazarouk S., Muravski A., Sasinovich D. et. al. // Japanese Journal of Applied Physics.* 2007. Vol. 46, № 10A. P. 6889–6892.
6. *Кацуба П.С., Лешок А.А., Высоцкий В.Б. и др. // Докл. БГУИР.* 2012. № 69. С. 54–59.
7. *Lazarouk S., Sasinovich D., Borisenko V. et. al. // J. of Applied Physics* 107. 2010. 033527–1–5.
8. *Lazarouk S., Baranov I, Maello G. et. al. // J. of Electrochemical Society.* 1994. Vol. 141. P. 2556–2559.
9. *Лазарук С.К., Лешок А.А., Лабунов В.А. и др. // Физика и техника полупроводников.* 2005. Т. 39, вып. 1. С. 149–152.

Библиотека БГУИР

УДК 004.056.5:519.254

СРАВНЕНИЕ СТАТИСТИК ТЕСТОВ СЕРИЙ И АППРОКСИМИРОВАННОЙ ЭНТРОПИИ

Н.Г. КИВЕЦ, А.И. КОРЗУН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 27 декабря 2013

Показывается, что выражения для тестовых статистик серий и аппроксимированной энтропии являются эквивалентными при рассмотрении пересекающихся серий одинаковых длин и при длинах исследуемых последовательностей $n \rightarrow \infty$. Экспериментально подтверждено совпадение результатов, полученных при тестировании последовательностей различных длин.

Ключевые слова: тестовая статистика, тест серий, тест аппроксимированной энтропии.

Введение

На сегодняшний день остается открытой проблема зависимости статистических тестов, используемых для тестирования генераторов случайных чисел (ГСЧ) [1]. Применение зависимых тестов приводит к неоправданному увеличению временных затрат и может привести к неверным выводам о качестве генератора [2].

Одной из наиболее используемых систем тестирования ГСЧ является система NIST [3]. Данная система включает тест серий и тест аппроксимированной энтропии, тестовая статистика которых вычисляется на основе частот появления в исследуемой последовательности пересекающихся серий различной длины.

В данной работе приводится сравнение тестовых статистик теста серий и теста аппроксимированной энтропии для выявления зависимости тестов и подтверждение полученных выводов экспериментальными данными.

Анализ статистик теста серий и аппроксимированной энтропии

Целью применения статистических тестов является принятие либо отклонение выдвинутой гипотезы о случайности исследуемой последовательности. В каждом тесте рассчитывается статистика, на основе которой определяется значение вероятности P , характеризующей приемлемость выдвинутой гипотезы. В системе NIST для прохождения теста необходимо выполнение условия: $P \geq 0,01$. В тестах серий и аппроксимированной энтропии рассчитываются статистики χ^2 , имеющие распределение «хи-квадрат». При таком распределении статистики вероятность P рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{\int_{\chi^2/2}^{\infty} t^{\frac{K}{2}-1} e^{-t} dt}{\int_0^{\infty} t^{\frac{K}{2}-1} e^{-t} dt}, \quad (1)$$

где K – число степеней свободы распределения.

Система NIST содержит два теста серий. В данной статье рассматривается тест, в котором рассчитывается статистика:

$$\chi^2 = \frac{2^{m+1}}{n} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} w_k^2 - \frac{2^m}{n} \sum_{i=0}^{2^m-1} v_i^2, \quad (2)$$

где $(m+1)$ и m – длины рассматриваемых пересекающихся серий, n – длина исследуемой последовательности, w_k – число появлений в последовательности серии k -го вида длины $(m+1)$, v_i – число появлений в последовательности серии i -го вида длины m .

В тесте аппроксимированной энтропии рассчитывается статистика:

$$\chi^2 = 2n(\ln 2 - \text{ApEn}(m)), \quad (3)$$

где

$$\text{ApEn}(m) = \varphi^{(m)} - \varphi^{(m+1)} - \quad (4)$$

аппроксимированная энтропия, $\varphi^{(m)} = \sum_{i=0}^{2^m-1} \frac{v_i}{n} \ln \left(\frac{v_i}{n} \right)$, $\varphi^{(m+1)} = \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} \frac{w_k}{n} \ln \left(\frac{w_k}{n} \right)$.

Заменим в (4) величины $\varphi^{(m)}$ и $\varphi^{(m+1)}$ эквивалентными соотношениями при $n \rightarrow \infty$ [4]:

$$\varphi^{(m)} \sim -m \ln 2 + \frac{2^m}{2n} \sum_{i=0}^{2^m-1} Z_i^2, \text{ где } Z_i = \sqrt{n} \left(\frac{v_i}{n} - \frac{1}{2^m} \right);$$

$$\varphi^{(m+1)} \sim -(m+1) \ln 2 + \frac{2^{m+1}}{2n} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} Y_k^2, \text{ где } Y_k = \sqrt{n} \left(\frac{w_k}{n} - \frac{1}{2^{m+1}} \right).$$

Получаем выражение для аппроксимированной энтропии:

$$\begin{aligned} \text{ApEn}(m) &= -m \ln 2 + \frac{2^m}{2n} \sum_{i=0}^{2^m-1} Z_i^2 + (m+1) \ln 2 - \frac{2^{m+1}}{2n} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} Y_k^2 = -m \ln 2 + \frac{2^m}{2n} \sum_{i=0}^{2^m-1} n \left(\frac{v_i}{n} - \frac{1}{2^m} \right)^2 + \\ &+ m \ln 2 + \ln 2 - \frac{2^{m+1}}{2n} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} n \left(\frac{w_k}{n} - \frac{1}{2^{m+1}} \right)^2 = \ln 2 + \frac{2^m}{2n} \sum_{i=0}^{2^m-1} \frac{1}{n} \left(v_i - \frac{n}{2^m} \right)^2 - \frac{2^{m+1}}{2n} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} \frac{1}{n} \left(w_k - \frac{n}{2^{m+1}} \right)^2. \end{aligned}$$

Подставив полученное выражение для $\text{ApEn}(m)$ в (2), имеем:

$$\begin{aligned} \chi^2 &= 2n \left(\ln 2 - \left(\ln 2 + \frac{2^m}{2n} \sum_{i=0}^{2^m-1} \frac{1}{n} \left(v_i - \frac{n}{2^m} \right)^2 - \frac{2^{m+1}}{2n} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} \frac{1}{n} \left(w_k - \frac{n}{2^{m+1}} \right)^2 \right) \right) = \\ &= 2n \left(\frac{2^{m+1}}{2n} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} \frac{1}{n} \left(w_k - \frac{n}{2^{m+1}} \right)^2 - \frac{2^m}{2n} \sum_{i=0}^{2^m-1} \frac{1}{n} \left(v_i - \frac{n}{2^m} \right)^2 \right) = \frac{2^{m+1}}{n} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} \left(w_k - \frac{n}{2^{m+1}} \right)^2 - \\ &- \frac{2^m}{n} \sum_{i=0}^{2^m-1} \left(v_i - \frac{n}{2^m} \right)^2 = \frac{2^{m+1}}{n} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} \left(w_k^2 - \frac{2nw_k}{2^{m+1}} + \left(\frac{n}{2^{m+1}} \right)^2 \right) - \frac{2^m}{n} \sum_{i=0}^{2^m-1} \left(v_i^2 - \frac{2n}{2^m} + \left(\frac{n}{2^m} \right)^2 \right) = \\ &= \frac{2^{m+1}}{n} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} w_k^2 - \frac{2^{m+1}}{n} \cdot \frac{2n}{2^{m+1}} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} w_k + \frac{2^{m+1}}{n} \cdot 2^{m+1} \cdot \left(\frac{n}{2^{m+1}} \right)^2 - \frac{2^m}{n} \sum_{i=0}^{2^m-1} v_i^2 + \frac{2^m}{n} \cdot \frac{2n}{2^m} \sum_{i=0}^{2^m-1} v_i - \\ &- \frac{2^m}{n} \cdot 2^m \cdot \left(\frac{n}{2^m} \right)^2 = \frac{2^{m+1}}{n} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} w_k^2 - 2 \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} w_k + n - \frac{2^m}{n} \sum_{i=0}^{2^m-1} v_i^2 + 2 \sum_{i=0}^{2^m-1} v_i - n. \end{aligned}$$

Так как $\sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} w_k = n$ и $\sum_{i=0}^{2^m-1} v_i = n$, то получаем выражение для χ^2 :

$$\chi^2 = \frac{2^{m+1}}{n} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} w_k^2 - 2n + n - \frac{2^m}{n} \sum_{i=0}^{2^m-1} v_i^2 + 2n - n = \frac{2^{m+1}}{n} \sum_{k=0}^{2^{m+1}-1} w_k^2 - \frac{2^m}{n} \sum_{i=0}^{2^m-1} v_i^2. \quad (5)$$

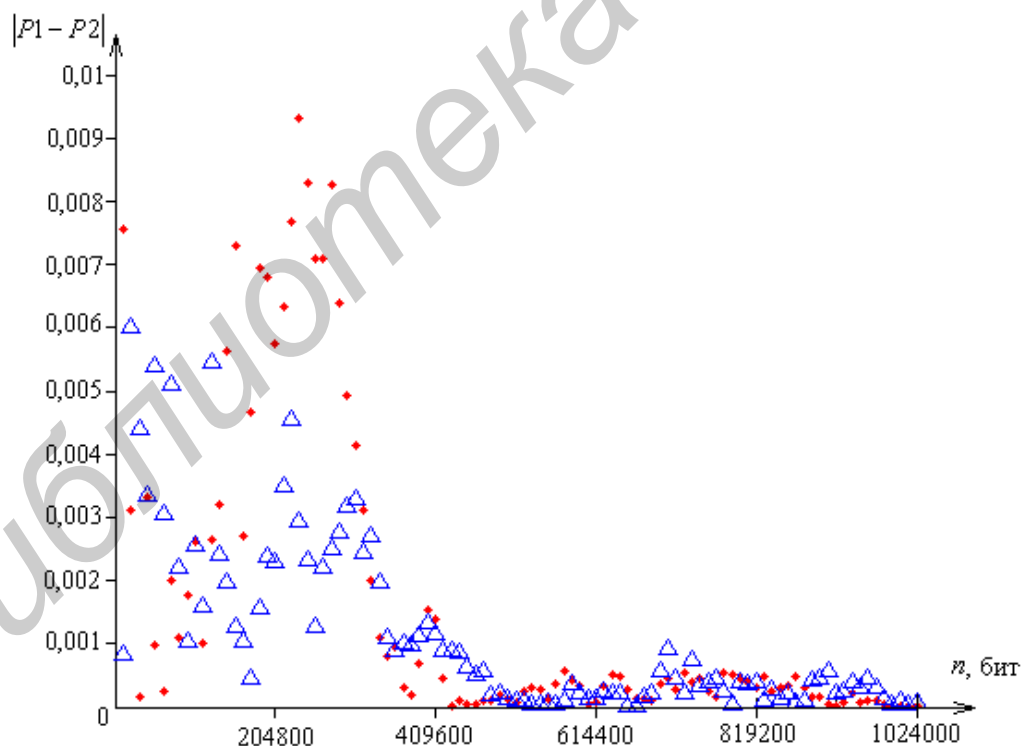
Получилось, что выражение (5) для χ^2 теста аппроксимированной энтропии совпадает с выражением (2) для χ^2 теста серий. Так как для обоих тестов величины K равны и $K = 2^m$, получаем равные значения P , что видно из формулы (1).

Таким образом, показано, что при $n \rightarrow \infty$ значения вероятностей P для теста аппроксимированной энтропии и теста серий совпадают, что говорит об их зависимости.

Экспериментальные исследования

С целью подтверждения правильности принятых допущений проведены экспериментальные исследования. Проверялось условие $|P1 - P2| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, где $P1$ - значение вероятности, полученное для теста серий; $P2$ - значение вероятности, полученное для теста аппроксимированной энтропии. Для этого из двух электронных пластиковых карт (ЭПК) с операционной системой MINOS с помощью аппаратно-программного комплекса [5] извлечено по 1000 ключей длиной 1024 бит.

Для каждой из ЭПК №1 и №2 сформировано 1000 последовательностей a_i , где i - номер последовательности. При этом i -я последовательность сформирована из i ключей, представленных в двоичном коде и записанных в поток данных побитно. Полученные последовательности протестированы с использованием MATLAB [6]. Задан параметр $m = 3$. Для достижения наглядности на рисунке представлено каждое десятое значение $|P1 - P2|$. Видно практически полное совпадение значений $P1$ и $P2$ для $n > 500000$ бит. Заметим, что даже при относительно небольших значениях n $|P1 - P2|$ не превышает 1% от максимально возможного значения, равного 1.



Зависимость величины $|P1 - P2|$ от длины тестируемой последовательности n :

♦ - для последовательностей из ЭПК №1, △ - для последовательностей из ЭПК №2

В табл. 1 содержатся значения вероятностей $P1$, $P2$ и разности $|P1 - P2|$ для каждой 50-й последовательности. Таблица позволяет увидеть, как изменяются $P1$ и $P2$ с ростом n . Отчетливо видна тенденция приближения значений $P1$ и $P2$ при увеличении n . Тенденция характерна для последовательностей, выработанных генераторами различных карт.

Таблица 1. Значения вероятностей $P1$, $P2$ и разностей $|P1-P2|$, полученных при тестировании последовательностей, длины которых кратны 51200 битам

i	n , бит	Последовательности из ЭПК №1			Последовательности из ЭПК №2		
		$P1$	$P2$	$ P1-P2 $	$P1$	$P2$	$ P1-P2 $
50	51200	0,7111	0,7121	0,0010	0,2219	0,2272	0,0054
100	102400	0,1940	0,1966	0,0026	0,7877	0,7902	0,0026
150	153600	0,2893	0,2966	0,0073	0,3343	0,3355	0,0013
200	204800	0,3607	0,3665	0,0057	0,2723	0,2746	0,0023
250	256000	0,1333	0,1404	0,0071	0,0736	0,0749	0,0013
300	307200	0,4354	0,4396	0,0041	0,2786	0,2819	0,0033
350	358400	0,3404	0,3414	0,0009	0,5725	0,5734	0,0009
400	409600	0,4130	0,4116	0,0014	0,6240	0,6252	0,0011
450	460800	0,6164	0,6164	0,0001	0,7383	0,7388	0,0005
500	512000	0,5342	0,5341	0,0001	0,6745	0,6746	0,0001
550	563200	0,5753	0,5749	0,0004	0,7490	0,7489	0,0000
600	614400	0,6085	0,6084	0,0001	0,5319	0,5318	0,0001
650	665600	0,5776	0,5775	0,0001	0,4233	0,4234	0,0000
700	716800	0,6556	0,6553	0,0003	0,3216	0,3220	0,0005
750	768000	0,5893	0,5891	0,0002	0,4425	0,4430	0,0005
800	819200	0,7549	0,7546	0,0003	0,5677	0,5673	0,0004
850	870400	0,6357	0,6352	0,0005	0,5711	0,5710	0,0001
900	921600	0,8916	0,8916	0,0000	0,7058	0,7060	0,0002
950	972800	0,8085	0,8084	0,0001	0,5854	0,5857	0,0003
1000	1024000	0,9691	0,9691	0,0000	0,6798	0,6797	0,0001

В табл. 2 и 3 представлены значения $P1$, $P2$ и $|P1-P2|$ для последовательностей, длины которых отличаются на 4096 бит. Из таблиц видно, что увеличение 54-й последовательности на 45056 бит привело к более существенному изменению вероятностей $P1$ и $P2$, чем увеличение 954-й последовательности на то же количество бит. Это объясняется тем, что чем длиннее последовательность, тем незначительнее меняет ее добавление некоторого количества бит. Табл. 2 и 3 показывают, что значения $|P1-P2|$ на порядок меньше для длинных последовательностей с номерами от 954 до 998, чем для относительно коротких последовательностей с номерами от 54 до 98.

Таблица 2. Значения вероятностей $P1$, $P2$ и разностей $|P1-P2|$, полученных при тестировании последовательностей длиной от 55296 до 1003523 бит

i	n , бит	Последовательности из ЭПК №1			Последовательности из ЭПК №2		
		$P1$	$P2$	$ P1-P2 $	$P1$	$P2$	$ P1-P2 $
54	55296	0,8295	0,8295	0,0000	0,3527	0,3561	0,0033
58	59392	0,8041	0,8035	0,0006	0,3172	0,3201	0,0028
62	63488	0,8206	0,8212	0,0006	0,3108	0,3149	0,0041
66	67584	0,6635	0,6648	0,0013	0,3638	0,3684	0,0046
70	71680	0,6594	0,6614	0,0020	0,3825	0,3876	0,0051
74	75776	0,5070	0,5098	0,0028	0,4841	0,4878	0,0037
78	79848	0,4387	0,4395	0,0008	0,5987	0,6012	0,0025
82	83944	0,2208	0,2231	0,0023	0,5573	0,5599	0,0026
86	88040	0,3061	0,3084	0,0022	0,7140	0,7155	0,0014
90	92136	0,3209	0,3227	0,0018	0,7921	0,7931	0,0010
94	96208	0,3178	0,3197	0,0019	0,7127	0,7148	0,0021
98	100352	0,2481	0,2517	0,0035	0,7702	0,7723	0,0021

Таблица 3. Значения вероятностей $P1$, $P2$ и разностей $|P1-P2|$, полученных при тестировании последовательностей длиной от 97896 до 1021952 бит

i	n , бит	Последовательности из ЭПК №1			Последовательности из ЭПК №2		
		$P1$	$P2$	$ P1-P2 *10^4$	$P1$	$P2$	$ P1-P2 *10^3$
954	976896	0,7825	0,7825	0,2002	0,6182	0,6185	0,2769
958	980992	0,8166	0,8167	0,5935	0,6134	0,6137	0,3073
962	985088	0,8721	0,8722	0,4031	0,6486	0,6486	0,0149
966	989184	0,8905	0,8905	0,2937	0,6629	0,6631	0,1488
970	993280	0,9091	0,9091	0,0211	0,7031	0,7031	0,0462
974	997376	0,9337	0,9337	0,1770	0,7018	0,7019	0,0613
978	1001472	0,9371	0,9372	0,1981	0,7056	0,7057	0,1165
982	1005568	0,9411	0,9411	0,3784	0,6879	0,6880	0,0747
986	1009664	0,9385	0,9385	0,1474	0,6591	0,6590	0,0699
990	1013760	0,9464	0,9465	0,2898	0,7237	0,7237	0,0493
994	1017856	0,9627	0,9627	0,2722	0,6961	0,6961	0,0344
998	1021952	0,9771	0,9771	0,0612	0,7000	0,6999	0,0930

На рисунке видна область значений $|P1-P2|$ при сравнительно небольших длинах последовательностей, в пределах которой значение $|P1-P2|$ может быть больше значения 0,01. Для более детального рассмотрения этой области значений был проведен эксперимент. Из ЭПК MINOS извлечено 1152 ключа длиной 1024 бит. Полученный массив ключей разбит на 48 групп по 24 ключа. Из ключей каждой группы, представленных в двоичном коде, сформирована битовая последовательность. Получено 48 последовательностей, каждая длиной 24576 бит. В табл. 2 представлены значения $P1$ и $P2$ для всех последовательностей. Все значения $|P1-P2|$ принадлежат диапазону $[1,3400 \cdot 10^{-5}; 0,0213]$.

Таблица 4. Значения вероятностей $P1$ и $P2$, полученных при тестировании 48 последовательностей длиной 24576 бит

№	$P1$	$P2$	№	$P1$	$P2$	№	$P1$	$P2$	№	$P1$	$P2$
1	0,0051	0,0051	13	0,7979	0,7978	25	0,8678	0,8648	37	0,5647	0,5703
2	0,3817	0,3917	14	0,9244	0,9223	26	0,5701	0,5682	38	0,5069	0,5139
3	0,2143	0,2113	15	0,8709	0,8707	27	0,5424	0,5434	39	0,9875	0,9876
4	0,7966	0,8008	16	0,1032	0,1013	28	0,2342	0,2350	40	0,0993	0,0999
5	0,3879	0,3848	17	0,0169	0,0197	29	0,8167	0,8169	41	0,4887	0,4954
6	0,2719	0,2740	18	0,1748	0,1755	30	0,9330	0,9324	42	0,5459	0,5482
7	0,8588	0,8587	19	0,6879	0,6838	31	0,0173	0,0183	43	0,4717	0,4717
8	0,1949	0,1889	20	0,5769	0,5744	32	0,3509	0,3477	44	0,6026	0,6088
9	0,4957	0,4912	21	0,3100	0,3113	33	0,2418	0,2446	45	0,6871	0,6880
10	0,9507	0,9513	22	0,6068	0,6120	34	0,6294	0,6291	46	0,1072	0,1076
11	0,5089	0,5096	23	0,3000	0,2984	35	0,8213	0,8216	47	0,7865	0,7864
12	0,0885	0,0867	24	0,0407	0,0377	36	0,1313	0,1526	48	0,9268	0,9271

Заключение

Полученные выражения для тестовых статистик тестов серий и аппроксимированной энтропии и результаты экспериментальных исследований по тестированию последовательностей различных длин показали, что тесты являются эквивалентными при рассмотрении серий одинаковых длин и при длинах исследуемых последовательностей $n \rightarrow \infty$. На основании того, что выявлена высокая степень зависимости двух тестов, целесообразно исключить один из них из системы тестирования.

COMPARISON OF SERIAL AND APPROXIMATE ENTROPY TEST STATISTICS

N.G. KIYEVETS, A.I. KORZUN

Abstract

It is shown that mathematical expressions for serial and approximate test statistics are equivalent on conditions that concerned overlapping series have the same lengths and observable sequence length $n \rightarrow \infty$. The test result coincidence is experimentally confirmed.

Список литературы

1. Statistical testing of random number generators. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://infosec.pku.edu.cn/~tly/oldversion/nist-nissc-1999/papers/p24.pdf>. – Дата доступа: 13.11.2012.
2. *Turan M.S., Dođanaksoy A., Boztaş S.* // Proceedings of the 5th International Conference «Sequences and Their Applications – SETA 2008». September, 14–18, 2008. P. 18–29.
3. A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-22-rev1a/SP800-22rev1a.pdf>. – Дата доступа: 13.11.2012.
4. *Rukhin A.* // J.of Applied Probability. 2000. Vol. 37. P. 88–100.
5. *Киевец Н.Г., Корзун А.И.* // Электроника инфо. 2013. №6 (96). С. 158–160.
6. *Бондаренко В.Ф., Дубовец В.Д.* MatLab. Основы работы и программирования, компьютерная математика. Минск, 2010.

УДК 621.385.6

ГИРО-ЛБВ С ЗАКРИТИЧЕСКОЙ СЕКЦИЕЙ И ПОГЛОЩАЮЩИМИ ВСТАВКАМИ

С.В. КОЛОСОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 10 февраля 2014

Рассмотрены возможности повышения коэффициента усиления и КПД в гиро-ЛБВ за счет введения закритической секции в середине волновода и наличия поглощающих вставок с обеих сторон такой секции.

Ключевые слова: гиро-ЛБВ, нерегулярные волноводы.

Введение

Разработка гиро-ЛБВ с высоким коэффициентом усиления наталкивается на проблему изоляции взаимного влияния электромагнитных полей входной секции лампы, где происходит начальная модуляция поперечных скоростей спирализованного электронного потока, с электромагнитными волнами выходной секции, где при отборе энергии от сгруппированного электронного потока возбуждаются как попутная волна, так и встречная волна, которая, если ее не изолировать, попадет во входную секцию, что приведет к самовозбуждению лампы.

Одним из путей решения этой проблемы является вставка поглощающей электромагнитные волны секции в середину лампы [1, 2]. Однако при этом происходит полное поглощение встречной волны и частичное поглощение возбуждаемой уже в средней части лампы попутной волны, что понижает полный КПД на 2–10 %.

Другим из возможных способом развязки входной и выходной секций лампы является вставка в средней части лампы закритической для рабочей моды секции, которая полностью изолирует эти секции друг от друга и не отбирает энергию от электромагнитных волн.

Результаты расчета гиро-ЛБВ

Моделирование процессов в гиро-ЛБВ осуществлялось с помощью компьютерной программы GYRO-K из программного комплекса «КЕДР» [3]. Параметры электронного потока гиро-ЛБВ были следующими: напряжение – 50 [кВ], ток электронного потока – 3 [А], питч фактор – $q = V_{\perp}/V_{\parallel} = 1,2$.

Магнитостатическое поле в этом приборе – понижающееся на величину $-0,04079$ начиная со значения $F(z) = \frac{\mu_0 e H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{1,748 \cdot 10^{11} \cdot B_0 [\text{T}]}{2\pi \cdot f_0 [\text{Hz}]} = 1,0391$.

Полная длина прибора: $l = \frac{2\pi L}{\lambda_0} = 160$ рад. Волновод имеет закритическую вставку

начиная с длины от 35 до 80 радиан. Волновод покрыт поглощающим покрытием с 20 по 40 и 75 по 105 радиана с удельным сопротивлением $R_V = 1092$ Мком/м.

В расчетах учитывались 8 типов волн – TE_{01-04} и TM_{01-04} . Это позволило корректно рассчитывать взаимные преобразования типов волн на нерегулярностях волновода и одновременно учитывать влияние полей пространственного заряда.

Интегральные характеристики данной лампы приведены на рис. 1. На нем профиль волновода обозначен жирным черным цветом, серым – поглощающие участки волновода,

$$F_1 = 1 - \left\{ \left[\sum_{s=1}^{N_s} G_s \left(\frac{1}{Ne} \sum_{i=1}^{Ne} \cos(\alpha_{is}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{s=1}^{N_s} G_s \left(\frac{1}{Ne} \sum_{i=1}^{Ne} \sin(\alpha_{is}) \right) \right]^2 \right\} - \text{функция группировки электронного}$$

потока по первой гармонике, $\bar{\beta}_\perp = \bar{V}/c$ – средняя нормированная к скорости света поперечная скорость электронов, КПД-е – электронный КПД, КПД-в – волновой КПД, т.е. энергия переносимая волной.

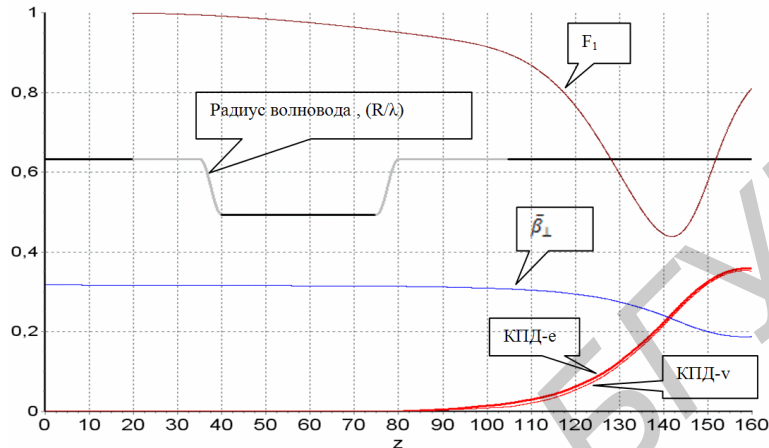


Рис.1. Интегральные характеристики gyro-ЛБВ

КПД такой gyro-ЛБВ достигает 37 %, а коэффициент усиления – 40 дБ. На следующем рисунке показано увеличенное изображение рис. 1.

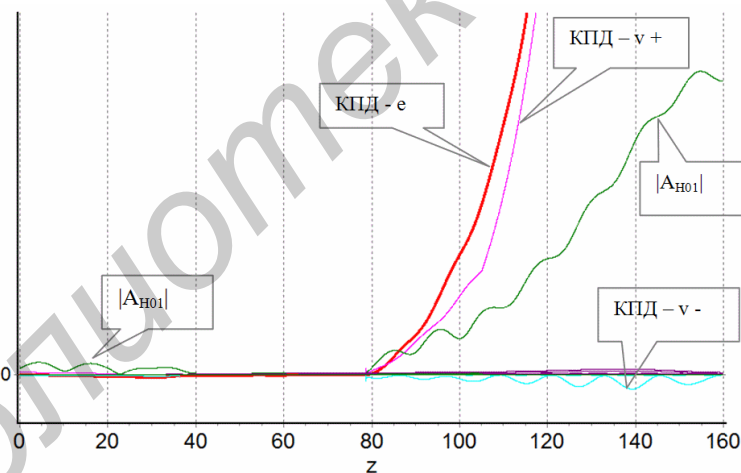


Рис. 2. Детализация кривых рис. 1

Здесь $|A_{H01}|$ – амплитуда волны H_{01} , КПД-в+ – мощность этой же волны, но распространяющейся вправо, КПД-в- – мощность волны, распространяющейся влево, т.е. встречной волны. Видно, как на участке по z от 105 до 80, амплитуда встречной волны уменьшается за счет ее поглощения поглотителем волновода. В этом случае мощность, отдаваемая электронным потоком полю, превышает мощность бегущей волны TE_{01} , но разница в КПД в этом случае не превышает 1 %, в то время как в варианте с одной поглощающей секцией [1] эта разница достигала 4,7 %. Это указывает на то, что закритический участок волновода не препятствует группировке электронов и обеспечивает надежную развязку входа и выхода лампы, а поглощающие участки волновода обеспечивают режим бегущей волны и препятствуют образованию режима стоячих волн, как во входной секции волновода, так и в выходной. Процесс поперечной фазовой группировки электронов показан на рис. 3.

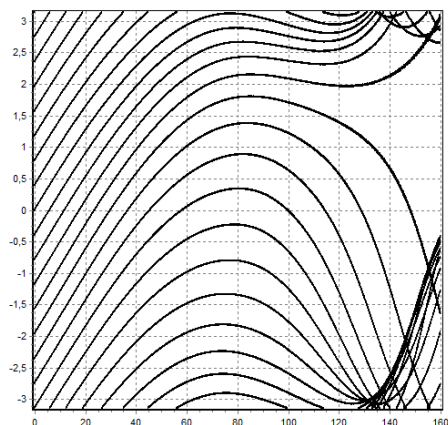


Рис. 3. Фазовые траектории электронов

Рис. 3 показывает, как формируется фазовый пакет электронов при $z = 135$ и как он рассыпается при отборе энергии к концу лампы.

Из рис. 4 следует, что большинство электронов отдадут свою энергию электромагнитному полю, т.е. в конце лампы большинство электронов имеют поперечную скорость меньше начальной – 0,317.

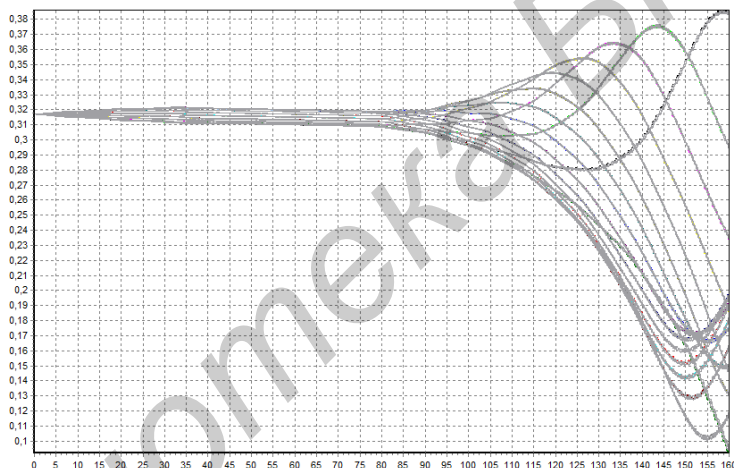


Рис. 4. Распределение поперечных скоростей электронов

На рис. 5 показан продольный разрез лампы с отображением модуля амплитуды волны H_{01} .

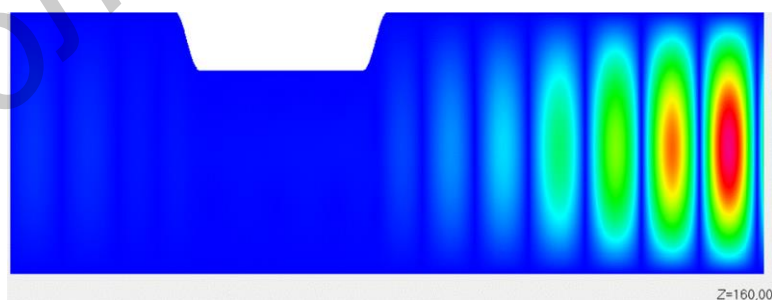


Рис. 5. Распределение модуля напряженности электрического поля в продольном сечении волновода

Рис. 5 показывает, как нарастает мощность бегущей вправо волны H_{01} и показывает полное отсутствие электромагнитного поля в области закритической вставки волновода.

Была исследована частотная характеристика этой гиро-ЛБВ, она показана на рис. 6.

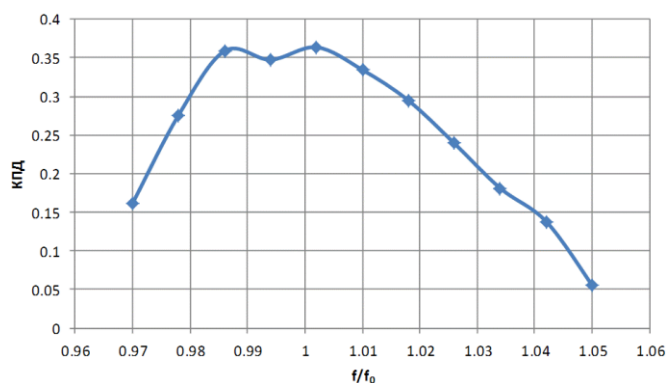


Рис. 6. Частотная характеристика гиро-ЛБВ

Полоса усиления данной лампы составляет 6 %. Следует отметить, что если убрать поглощающие вставки в волноводе, то частотная характеристика лампы станет более неравномерной, что следует из следующего рисунка.

Рис. 7 показывает, что при отсутствии поглощающих вставок существенно усилилась неравномерность частотной характеристики, т.е. возникают резонансные явления внутри волновода.

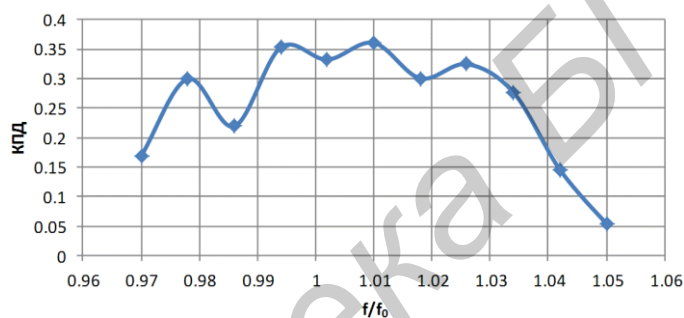


Рис. 7. Частотная характеристика гиро-ЛБВ без поглощающих секций

Заключение

Проведенные расчеты показали, что введение закритической секции в середине волновода и наличие поглощающих вставок позволяют создавать гиро-ЛБВ с большим коэффициентом усиления, более 40 дБ, предотвращать эффекты самовозбуждения, достигать КПД ~ 37 %, улучшать равномерность частотной характеристики и иметь полосу усиления 6 %.

GYRO-TWT WITH CUT-OFF SECTION AND ABSORB INSERTS

S.V. KOLOSOV

Abstract

Computer simulations have shown that the introduction of the cut-off waveguide section in the middle and the presence of absorbing inserts allows you to create a gyro-TWT with high gain over 40 dB, prevents the effects of self-excitation, receive an efficiency of ~ 37 %, improve the uniformity of the frequency response and have a gain bandwidth of 6 %.

Список литературы

1. Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В. // Матер. XX Междунар. конф. «КрыМиКо-2010». Севастополь, 13–17 сентября 2010. С. 299–300.
2. Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В. // Весті НАН Беларусі. Сер. фізіка-техн. навук. 2012. № 2. С. 97–103.
3. Колосов С.В., Кураев А.А., Сеницын А.К., Аксенчик А.В. Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 389.

УДК 621.315.592

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$

М.А. НОВИКОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 11 декабря 2013*

На монокристаллах соединений In_2S_3 , FeIn_2S_4 и твердых растворах $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$, выращенных методом направленной кристаллизации из расплава (вертикальный метод Бриджмена), проведены исследования спектров пропускания в области края собственного поглощения при 295 К. По полученным спектрам определена ширина запрещенной зоны указанных соединений и твердых растворов на их основе, а также построены ее концентрационные зависимости. Показано, что ширина запрещенной зоны с параметром состава x при 295 К изменяется нелинейно и описывается квадратичной зависимостью.

Ключевые слова: монокристалл, спектр пропускания, ширина запрещенной зоны.

Введение

Современные достижения физики и техники полупроводников в значительной степени определяются поиском и детальным исследованием новых полупроводниковых материалов. К таким материалам относится тройное соединение типа $A^{\text{II}}B_2^{\text{III}}C_4^{\text{VI}}$ (A^{II} – Mn, Fe, Co, Ni; B^{III} – Ga, In; C^{VI} – S, Se, Te). Тройные соединения типа $A^{\text{II}}B_2^{\text{III}}C_4^{\text{VI}}$ принадлежат к широкому классу полупроводников, в пределах которого наблюдаются сильные изменения физических свойств, контролируемые атомным составом и процессами межатомного взаимодействия, определяемыми спецификой эффектов самоорганизации в этих соединениях. Указанные соединения вызывают большой интерес у различных групп исследователей в силу следующих обстоятельств: а) наличие магнетизма в этих веществах, связанное с возможностью контролируемого введения атомов Fe и Mn; б) значение ширины запрещенной зоны этих соединений близко к оптимальному для разработок преобразователей солнечного излучения ($E_g = 1,0\text{--}1,7$ эВ). Эти соединения перспективны для использования их как материалов для светоизлучающей техники, оптоэлектроники, нелинейной оптики и солнечной энергетики, также устройств, управляемых магнитным полем.

В данной работе представлены результаты измерения и анализа спектров пропускания в области края собственного поглощения, определения ширины запрещенной зоны и построение ее концентрационной зависимости для твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$. В литературе такие данные до настоящего времени отсутствовали.

Методика эксперимента

Монокристаллы твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ выращивали методом направленной кристаллизации из расплава (вертикальный метод Бриджмена) из предварительно синтезированных двухтемпературным методом поликристаллических слитков, методика которого описана в [1]. Полученные поликристаллические слитки измельчали и перегружали в двойные конусообразные кварцевые ампулы, в которых внутренняя ампула заканчивалась цилиндрическим капилляром, который обеспечивал формирование монокристаллической затравки. После вакуумирования ампулы помещали в вертикальную однозонную печь. Температуру в печи повышали со скоростью ~ 100 К/ч до 1400 К, выдерживали ~ 2 ч, после чего проводили направленную кристаллизацию расплава,

понижая температуру печи со скоростью ~ 2 К/ч до полного затвердевания расплава. Затем проводили отжиг полученных слитков при ~ 1020 К в течение 250 ч. Выращенные монокристаллы твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ были диаметром ~ 14 мм и длиной ~ 40 мм.

Состав полученных монокристаллов твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ определяли с помощью микрозондового рентгеноспектрального анализа. В качестве возбудителя тормозного рентгеновского излучения образца использовали электронный луч растрового электронного микроскопа Stereoscan 360. В качестве анализатора рентгеновского спектра использовали рентгеновский спектрометр AVALON 8000. Равновесность соединений и гомогенность твердых растворов определяли рентгеновским методом. Дифрактограммы записывали на автоматически управляемом с помощью ЭВМ рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 М в $\text{CuK}\alpha$ – излучении с графитовым монохроматором.

Спектры пропускания тройных соединений In_2S_3 , FeIn_2S_4 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ в области края фундаментального поглощения регистрировали на спектрофотометре «Сару-500» при $T = 295$ К. Методика измерений указанных спектров аналогична описанной в [2]. Для измерений из полученных кристаллов вырезали монокристаллические плоскопараллельные пластинки, которые механически шлифовали и полировали с двух сторон до толщин ~ 20 мкм. Для снятия нарушенного слоя, образовавшегося при механической обработке кристаллов непосредственно перед измерениями спектров, образцы подвергали обработке в травителе состава $\text{Br}_2:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1:3$.

Результаты и их обсуждение

Данные микрорентгеноспектральных исследований показали, что содержание компонентов в выращенных монокристаллах удовлетворительно согласуется с заданным составом в исходной шихте. Результаты рентгеновских исследований показали, что на всех снятых дифрактограммах присутствуют рефлексы отражения, характерные для кубической структуры шпинели. Параметры элементарной ячейки, рассчитанные методом наименьших квадратов, с составом x изменяются линейно, т.е. в соответствии с законом Вегарда.

Спектры пропускания монокристаллов тройных соединений In_2S_3 , FeIn_2S_4 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ при $T = 295$ К представлены на рис. 1.

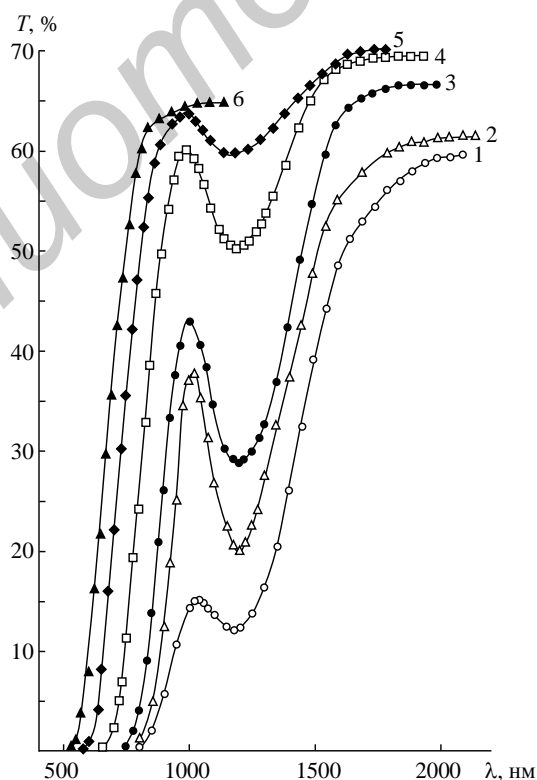


Рис. 1. Спектры пропускания монокристаллов In_2S_3 , FeIn_2S_4 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$: 1 — $x = 0,0$; 2 — $x = 0,2$; 3 — $x = 0,4$; 4 — $x = 0,6$; 5 — $x = 0,8$; 6 — $x = 1,0$

Видно, что указанные спектры имеют сложный характер в исследованной области длин волн. За исключением тройного соединения In_2S_3 , они состоят из трех участков: на первом участке начинается рост величины пропускания с достижением максимума, затем происходит некоторый спад пропускания с достижением минимума, затем – дальнейший рост величины пропускания.

По зарегистрированным спектрам пропускания в области края собственного поглощения рассчитывали коэффициент поглощения α по формуле, учитывающей многократное внутреннее отражение в плоскопараллельном образце:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left\{ \frac{(1-R)^2}{2T} + \sqrt{\left[\frac{(1-R)^2}{2T} \right]^2 + R^2} \right\}, \quad (1)$$

где α – коэффициент поглощения, T – пропускание, d – толщина образца, коэффициент отражения $R = 0,25$.

Известно [3], что тройные соединения типа $A^{II}B_2^{III}C_4^{VI}$ являются материалами с прямыми межзонными переходами, поэтому ширину запрещенной зоны для них определяли экстраполяцией прямолинейного участка зависимости $(\alpha\hbar\omega)^2$ от энергии фотона $(\hbar\omega)$ до пересечения с осью абсцисс. Указанная зависимость $(\alpha\hbar\omega)^2$ от $(\hbar\omega)$ представлена на рис. 2.

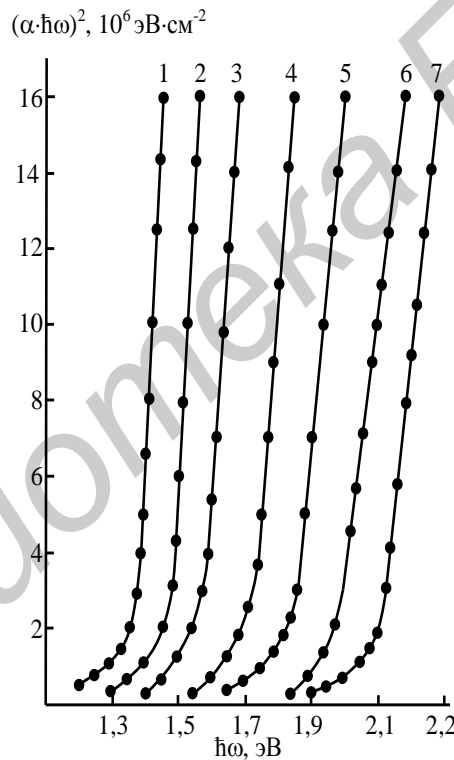


Рис. 2. Спектральные зависимости $(\alpha\hbar\omega)^2$ от $(\hbar\omega)$ для кристаллов In_2S_3 , FeIn_2S_4 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$: 1 – $x = 0,0$; 2 – $x = 0,2$; 3 – $x = 0,4$; 4 – $x = 0,6$; 5 – $x = 0,8$; 6 – $x = 0,9$; 7 – $x = 1,0$

По полученным экспериментальным значениям построена концентрационная зависимость $E_g(x)$ для твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ при $T = 295$ К, представленная на рис. 3. Видно, что указанная зависимость имеет нелинейный вид, что характерно для твердых растворов, образованных сложными соединениями.

Для описания поведения ширины запрещенной $E_g(x)$ для твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ была использована квадратичная зависимость следующего вида :

$$E_g(x) = E_A + (E_B - E_A - c)x + cx^2, \quad (2)$$

где E_A и E_B – ширина запрещенной зоны исходных соединений In_2S_3 и FeIn_2S_4 ; c – параметр нелинейности, который характеризует степень отклонения от линейной зависимости E_g для

среднего состава ($x = 0,5$), определяемый из выражения:

$$c = 4\Delta E(x=0.5), \quad (3)$$

$$\text{где } \Delta E = \frac{(E_A + E_B)}{2} - E_g(x=0.5). \quad (4)$$

Представленная концентрационная зависимость E_g для твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ при $T = 295$ К аналитически описывается следующей зависимостью:

$$E_g^{295}(x) = 1.377 + 0.298x + 0.414x^2. \quad (5)$$

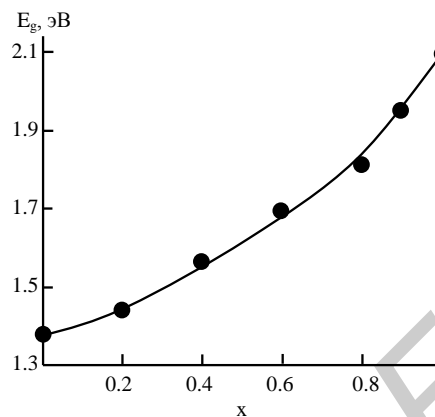


Рис. 3. Концентрационные зависимости ширины запрещенной зоны для монокристаллов твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$

В настоящее время не существует строгой теории, способной объяснить отклонение $E_g(x)$ от линейности. Обычно для его объяснения используются два приближения: диэлектрическая модель Ван Вехтена и Бергштрессера [4] и модель псевдопотенциала Хилла и Ричардсона [5]. Авторы первой модели считают, что определяющую роль в отклонении $E_g(x)$ от линейности в твердых растворах играют флуктуации кристаллического потенциала, вызванные хаотическим расположением замещающих атомов. Авторы второй модели считают, что это отклонение является следствием нелинейных свойств кристаллического поля. Обе модели удовлетворительно описывают экспериментальные данные для твердых растворов на основе тройных соединений $A^{II}B_2^{III}C_4^{VI}$.

Заключение

Методом направленной кристаллизации из расплава (вертикальный метод Бриджмена) выращены монокристаллы соединений In_2S_3 , FeIn_2S_4 и твердых растворах $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$. По спектрам пропускания в области края собственного поглощения при 295 К определена ширина запрещенной зоны указанных соединений. Установлено, что с параметром состава x ширина запрещенной зоны для твердых растворов изменяется нелинейно и описывается квадратичной зависимостью.

OPTICAL PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{(1-x)}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$

M.A. NOVIKOVA

Abstract

Single crystals of In_2S_3 , FeIn_2S_4 compounds and their solid solutions $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ have been grown by directional crystallization of the melt (vertical Bridgman method). Transmission spectra of the grown crystals in the intrinsic absorption edge region were investigated. Band gap width (E_g) and its concentration dependence have been determined on the measured spectra. It is established, that band gap width E_g changes nonlinearly with composition x .

Список литературы

1. Боднарь И.В., Федотова Ю.А., Новикова М.А. // Неорганические материалы. 2011. Т. 47, № 2. С. 156–160.
2. Bodnar I.V., Bodnar I.T., Gremenok V.F. et. al. // J. Cryst. Growth. 2006. Vol. 293, № 2. P. 324–329.
3. Shay J.L., Wernick J.H. Ternary chalcopyrite semiconductors: growth, electronic properties and applications. New York, 1975.
4. Van Vechten J.A., Bergstresser T.K. // Phys. Rev. B. 1970. Vol. 1. P. 3351–3357.
5. Hill R. // J. Phys. C: Sol. St. 1974. Vol. 7, № 3. P. 521–526.

УДК 537.5 : 661.66–026.771

МНОГОСЛОЙНЫЕ ЭКРАНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ И ВСПУЧЕННОГО ПЕРЛИТА

О.В. БОЙПРАВ, Е.С. БЕЛОУСОВА, А.М.А. МОХАМЕД

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 30 января 2014

Предложена технология изготовления многослойных экранов электромагнитного излучения с использованием композиционных материалов на основе вспученного перлитового песка и порошкообразных углеродосодержащих материалов различного типа. Исследованы частотные зависимости ослабления и коэффициентов отражения электромагнитного излучения изготовленных по предложенной технологии экранов. Разработаны рекомендации по практическому применению таких экранов.

Ключевые слова: композиционный материал, перлит, технический углерод, шунгит, экран электромагнитного излучения, углеродосодержащие материалы.

Введение

Наиболее приемлемым способом обеспечения электромагнитной развязки устройств радиоэлектронного оборудования на сегодняшний день, как правило, является экранирование электромагнитного излучения (ЭМИ), сопровождающего их работу. Для создания экранов ЭМИ широко применяются композиционные материалы, которые представляют собой совокупность связующего вещества и закрепленного в нем порошка (наполнителя). В большинстве случаев параметры физических свойств композиционного материала (прочности при растяжении и сжатии, гибкости, диапазона температур эксплуатации, электропроводности, диэлектрической проницаемости и т.п.) превосходят аналогичные параметры его компонентов [1].

Управляемо изменять параметры прочности при растяжении и сжатии, гибкости, диапазон температур эксплуатации композиционного материала возможно путем изменения типа его связующего вещества, а параметры электропроводности, диэлектрической проницаемости, следовательно, и экранирующих характеристик (значений ослабления и коэффициентов отражения ЭМИ) – путем изменения состава его наполнителя.

Тип связующего вещества, наряду с вышеперечисленными параметрами физических свойств композиционного материала, также определяет способ использования последнего в рамках процессов создания экранов ЭМИ и технологичность этих процессов. В случае если связующим веществом композиционного материала является клеевой состав, такой материал используется в качестве соединяющего слоя в многослойных экранах ЭМИ, если строительный раствор (бетонный или гипсовый) – в качестве облицовочного материала для стен экранируемых от внешних ЭМИ помещений, если краски – в качестве покрытия для экранов ЭМИ. Изменение состава наполнителя композиционных материалов осуществляется в результате включения в него дополнительных компонентов (путем пропитывания наполнителя жидкостями либо формирования на его поверхности металлических кластеров) или его смешивания с другими порошками, которые способны обеспечить дополнительные потери энергии ЭМИ.

С использованием композиционных материалов изготавливаются одно- и многослойные экраны ЭМИ, а также экраны, обладающие геометрически неоднородной поверхностью. Как правило, наибольшими значениями ослабления и наименьшими значениями коэффициентов отражения ЭМИ среди экранов перечисленных разновидностей характеризуются многослойные. Однако такие экраны обладают существенным недостатком – значительной массой.

Цель настоящей работы заключалась в разработке технологии изготовления многослойных экранов ЭМИ, обладающих пониженными массогабаритными характеристиками. Для реализации указанной цели были решены следующие задачи.

1. Обоснован способ использования композиционного материала в рамках процессов изготовления многослойных экранов ЭМИ, обладающих пониженными массогабаритными характеристиками.

2. Выбраны связующее и наполнитель для формирования композиционных материалов для изготовления многослойных экранов ЭМИ, обладающих пониженными массогабаритными характеристиками.

3. Представлены основные этапы изготовления многослойных экранов ЭМИ и использованные в рамках данного процесса вспомогательные материалы.

4. Составлены рекомендации по практическому применению многослойных экранов ЭМИ, разработанных по разработанной технологии.

Методика проведения эксперимента

Чтобы обеспечить снижение массогабаритных характеристик многослойных экранов ЭМИ, необходимо снизить материалоемкость последних. Для этого в процессе формирования композиционных материалов, предполагаемых к использованию в целях изготовления многослойных экранов ЭМИ, в качестве связующего вещества наиболее приемлемо использовать краски. Толщина образуемых посредством таких материалов слоев в экранах ЭМИ, как правило, составляет 1...3 мм (в зависимости от размера фракций использованного в качестве наполнителя порошка).

В рамках настоящей работы в качестве связующего вещества для формирования композиционных материалов для изготовления многослойных экранов ЭМИ был использован огнезащитный состав «Агнитерм-М», а наполнителя – смесь порошкообразных вспученного перлита марки М150 (далее по тексту – перлит) и углеродосодержащего материала (шунгита, активированного угля или технического углерода). Выбор перлита в качестве компонента для наполнителя композиционных материалов обусловлен его диэлектрическими свойствами и малой насыпной плотностью (не более 150 кг/м³), а порошкообразных шунгита, активированного угля или технического углерода – их электропроводными свойствами.

Перлит представляет собой порошкообразный материал, получаемый термической обработкой измельченных слоев вулканического стекла (перлитовой либо обсидиановой пород). В состав перлита входят оксид кремния (70...75 масс. %), оксид алюминия (12...14 масс. %), связанная вода (до 6 масс. %), а также оксиды трехвалентного железа, натрия, калия, кальция и магния (до 5 масс. % каждого из перечисленных оксидов). Размер фракций перлита марки М150 составляет 1 мм [2, 3].

Каждый из углеродосодержащих порошкообразных материалов, использованных в процессе формирования смеси для наполнителя, характеризуется определенными свойствами и составом.

Шунгит относится к группе твердых углеродистых минеральных веществ, представляющих в основной массе аморфные разновидности углерода, близкие по составу к графиту. Он содержит 30...40 масс. % углерода, 35...50 масс. % оксида кремния, 10...25 масс. % оксида алюминия, до 5 масс. % оксидов калия, натрия, титана [4].

Активированный уголь по своему химическому составу схож с графитом. Он содержит 87...97 масс. % углерода, до 13 масс. % водорода, кислорода, азота и серы [5].

Технический углерод представляет собой мелкодисперсный углеродный материал, производимый термодеструктивными и окислительными методами. Он содержит 94,8...99,7 масс. % углерода, 0,2...0,9 масс. % водорода, до 0,15 масс. % серы [6].

Средний размер фракций использованных в процессе формирования композиционных материалов шунгита, активированного угля и технического углерода составляет 10 мкм. Измерение размера фракций проводилось с использованием фотоэлектрического окулярного микрометра ФОМ-2-16х.

Объемное соотношение связующего вещества и наполнителя в сформированных композиционных материалах составляло 2:1 (независимо от объемного соотношения компонентов и типа углеродосодержащего порошкообразного материала в наполнителе). При увеличении объемного содержания связующего вещества в композиционном материале ухудшаются экранирующие характеристики последнего, при уменьшении – прочностные характеристики. Общее количество сформированных композиционных материалов – 15. Каждый из них отличался определенным объемным соотношением компонентов в наполнителе и/или типом использованного для его изготовления углеродосодержащего материала.

Перечень компонентов наполнителя каждого из композиционных материалов и их объемное соотношение в нем представлены в таблице.

Объемные соотношения компонентов в наполнителе композиционных материалов

Наименование композиционного материала	Наименование использованного углеродосодержащего материала в наполнителе	Объемное соотношение перлита и углеродосодержащего материала в наполнителе, об. %
№ 1.1	Шунгит	90:10
№ 1.2		80:20
№ 1.3		70:30
№ 1.4		60:40
№ 1.5		50:50
№ 2.1	Активированный уголь	90:10
№ 2.2		80:20
№ 2.3		70:30
№ 2.4		60:40
№ 2.5		50:50
№ 3.1	Технический углерод	90:10
№ 3.2		80:20
№ 3.3		70:30
№ 3.4		60:40
№ 3.5		50:50

В качестве вспомогательных материалов для изготовления образцов многослойных экранов ЭМИ были использованы металлические и целлюлозные подложки. Технология изготовления образцов двухслойных экранов ЭМИ на основе сформированных композиционных и указанных вспомогательных материалов включала в себя следующие этапы.

1. Подготовка металлической подложки с требуемыми геометрическими размерами.
2. Очищение и обезжиривание поверхности подготовленной металлической подложки.
3. Нанесение на металлическую подложку сформированного композиционного материала одного из типов.

Технология изготовления образцов трехслойных экранов ЭМИ включала в себя следующие этапы.

1. Подготовка металлической подложки с требуемыми геометрическими размерами.
2. Подготовка целлюлозной подложки с требуемыми геометрическими размерами.
3. Нанесение на целлюлозную подложку сформированного композиционного материала одного из типов.
4. Очищение и обезжиривание поверхности подготовленной металлической подложки.
5. Закрепление целлюлозной подложки с нанесенным на нее композиционным покрытием на металлической подложке с использованием спрей-клея.

Толщина использованных для изготовления двух- и трехслойных экранов ЭМИ металлических подложек составляла 1 мм, а использованных для изготовления трехслойных экранов ЭМИ целлюлозных подложек – 3 мм. Толщина нанесения слоя композиционного материала в обоих случаях составляла 1 мм. При этом масса 1 м² металлической подложки – 0,72 кг, целлюлозной подложки – 0,5 кг, а слоя композиционного материала толщиной 1 мм – 0,5 кг.

Общее количество разработанных образцов экранов ЭМИ по предложенным технологиям – 30. Схемы изготовленных экранов ЭМИ приведены на рис. 1 и рис. 2.

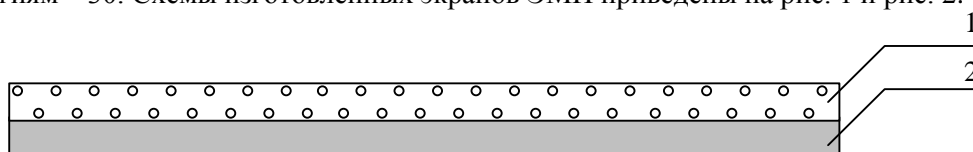


Рис. 1. Схема изготовленных образцов двухслойных экранов ЭМИ:
1 – композиционное покрытие; 2 – металлическая подложка

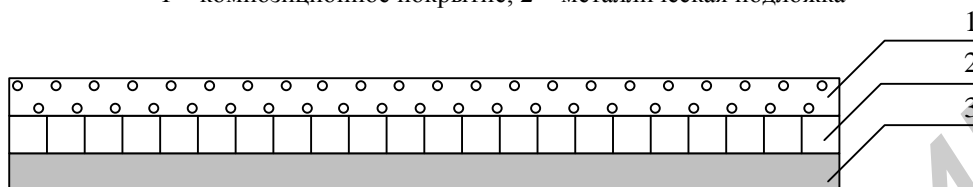


Рис. 2. Схема изготовленных образцов трехслойных экранов ЭМИ:
1 – композиционное покрытие; 2 – целлюлозная подложка; 3 – металлическая подложка

Измерения параметров экранирующих характеристик (частотных зависимостей ослабления и коэффициентов отражения ЭМИ) изготовленных по предложенным технологиям образцов экранов ЭМИ проводились с использованием панорамного измерителя КСВН и отражения Я2Р-67, согласно методике, представленной в [7]. Измерения проводились в частотном диапазоне 8...12 ГГц. В указанном частотном диапазоне функционируют конвертеры систем приема сигналов с однократным преобразованием частоты, интегральные схемы двухпозиционных СВЧ-коммутаторов радиоэлектронных устройств и т. п.

Результаты и их обсуждение

На основе анализа результатов проведенных измерений установлено, что значения коэффициентов отражения ЭМИ изготовленных образцов многослойных экранов составляет $-2,53 \dots -18,24$ дБ, а значения ослабления – более 40 дБ. При этом среди образцов двухслойных экранов ЭМИ наименьшими значениями коэффициентов отражения характеризуются образцы, изготовленные с использованием композиционных материалов № 1.3, № 2.3 и № 3.2, среди трехслойных – образцы, изготовленные с использованием композиционных материалов № 1.5, № 2.1, № 3.5. Частотные зависимости коэффициентов отражения ЭМИ данных образцов экранов представлены на рис. 3 и 4 (кривые 1 соответствуют частотным зависимостям коэффициентов отражения ЭМИ экранов, изготовленных с использованием композиционных материалов, наполнитель которых содержит шунгит, кривые 2 и 3 – экранов, изготовленных с использованием композиционных материалов, наполнитель которых содержит активированный уголь и технический углерод соответственно).

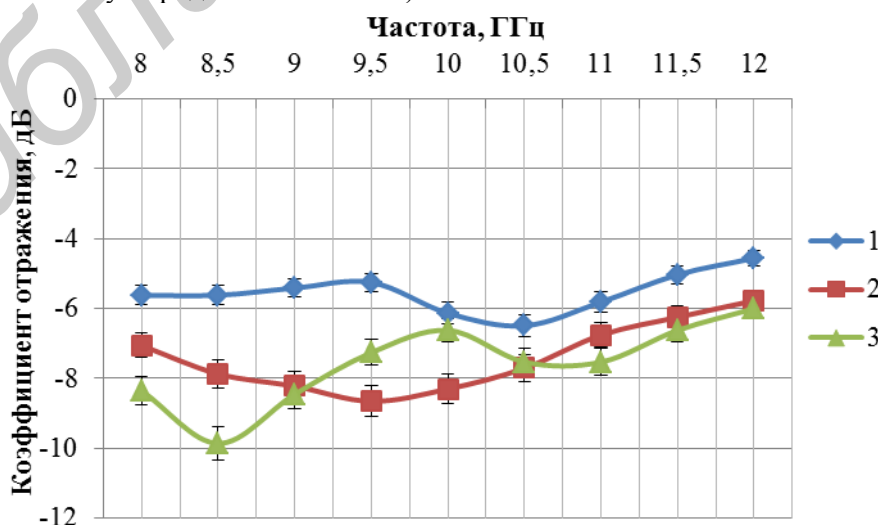


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициентов отражения ЭМИ двухслойных экранов

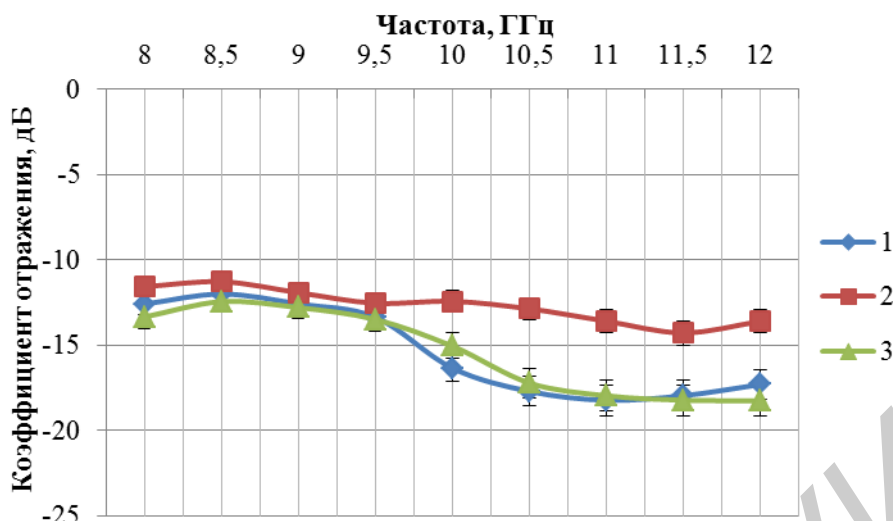


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициентов отражения ЭМИ трехслойных экранов

В предложенных композиционных материалах частицы перлита и углеродосодержащего материала создают в наполнителе объемную решетку из коротких проводящих отрезков с диэлектрическими вставками [8]. Параметры отрезков такой решетки (значения высоты и толщины) зависят от объемного соотношения перлита и углеродосодержащего порошкообразного материала. Длина электромагнитных волн (ЭМВ) в частотном диапазоне, в котором проводились измерения, превышает величины параметров данной решетки. Следовательно, процесс взаимодействия ЭМВ с каждым из композиционных материалов, использованных в процессе изготовления многослойных экранов ЭМИ, аналогичен дифракции этих волн на мелкой решетке. ЭМВ, падающая на решетку, вызывает в ней перераспределение электрических зарядов и токов, характеризуемое дипольными (или мультипольными) электрическими и магнитными моментами. Создаваемое ими рассеянное поле имеет вблизи решетки квазистатический характер. Оно практически совпадает с полем статических диполей, моменты которых равны мгновенным значениям моментов индуцированных диполей. Как правило, последние не зависят от частоты ЭМВ. Вдали от решетки рассеянное электромагнитное поле имеет вид расходящейся сферической ЭМВ. С ростом частоты ЭМВ уменьшаются амплитуда рассеянного поля и угол его рассеяния, что обуславливает уменьшение точек пространства, в которых оно локализуется. Значение амплитуды рассеянного частицами электромагнитного поля пропорционально величине r^6 / λ^4 , где r – средний радиус частиц, образующих рассеивающую решетку, λ – длина ЭМВ. Кроме того, на значение амплитуды рассеянного электромагнитного поля оказывают влияние электродинамические параметры частиц (электропроводности, диэлектрической проницаемости и т. п.) [9–11]. Таким образом, амплитуда ЭМИ, отраженного изготовленными многослойными экранами, представляет собой разность амплитуд ЭМИ, отраженного металлической подложкой, и ЭМИ, рассеянного частицами наполнителя композиционного материала. При этом величина ЭМИ, рассеиваемого данными материалами, определяется соотношением в его наполнителе перлита и углеродосодержащего порошкообразного материала, а также типом последнего. Двухслойный экран ЭМИ, изготовленный на основе композиционного материала № 1.3, характеризуется меньшими значениями коэффициентов отражения ЭМИ (рис. 3) в связи с тем, что шунгит содержит меньше углерода, а значит, обладает меньшей электропроводностью и в силу этого обеспечивает меньшее рассеяние электромагнитного поля, по сравнению с активированным углем и техническим углеродом. Трехслойные экраны характеризуются меньшими значениями коэффициентов отражения ЭМИ по сравнению с двухслойными. Это обусловлено дополнительными потерями в трехслойных экранах ЭМИ энергии отраженных ЭМВ, связанными с многократным переотражением последних от границ раздела композиционный материал–целлюлозная подложка, целлюлозная подложка–металлическая подложка. Образец трехслойного экрана, изготовленного на основе композиционного материала № 2.1, характеризуется более высокими значениями

коэффициентов отражения ЭМИ по сравнению с образцами трехслойных экранов, изготовленных на основе композиционных материалов № 1.5 и № 3.5 (рис. 4), в связи с тем, что в композиционном материале № 2.1 содержится больше частиц перлита, обеспечивающих ввиду своего размера большее рассеяние электромагнитного поля, по сравнению с частицами наполнителя композиционных материалов № 1.5 и № 3.5.

Заключение

С использованием многослойных экранов ЭМИ, технология изготовления которых предложена в рамках настоящей работы, могут формироваться следующие изделия.

1. Облицовочные панели для стен помещений, в которых размещается радиоэлектронное оборудование, подверженное воздействию внешних электромагнитных помех.

2. Экранирующие перегородки для функционального зонирования серверных комнат.

3. Пространственно-замкнутые контейнеры для радиоэлектронного оборудования, которые будут обеспечивать снижение уровня его побочных ЭМИ, а также защиту его компонентов от воздействия внешних электромагнитных помех.

Так как связующим веществом композиционных материалов, предложенных к использованию для формирования многослойных экранов ЭМИ, является огнезащитный состав, то изготавливаемые на основе таких экранов изделия будут характеризоваться, наряду с эффективностью ослабления энергии ЭМИ, еще и огнеупорными свойствами. Кроме того, предложенные композиционные материалы могут наноситься на корпуса радиоэлектронного оборудования.

MULTILAYER ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDS BASED ON POWDERED CARBON MATERIALS AND EXPANDED PERLITE

O.V. VOIPRAV, E.S. BELOUSOVA, A.M.A. MOHAMED

Abstract

The technology of multilayer electromagnetic radiation shields production with use of composite materials on the basis of expanded perlite sand and powdered carbon materials of various types is proposed. The electromagnetic radiation attenuation and reflection of coefficients frequency dependences of shields produced by the proposed technology are investigated. The recommendations for the practical application of such screens are developed.

Список литературы

1. Юскаев В.Б. Композиционные материалы. Сумы, 2006.
2. ГОСТ 25226-96. Щебень и песок перлитовые для производства вспученного перлита. Технические условия.
3. Мелконян Р.Г. Аморфные горные породы – новое сырье для стекловарения и строительных материалов. М., 2002.
4. Шунгитосодержащие композитные экраны электромагнитного излучения / Под ред. Л.М. Лынькова. Минск, 2013.
5. Активированный уголь, описание. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.chemsystem.ru/aktivirovannuu_ugol/. – Дата доступа: 27.01.2014.
6. Ивановский В.И. Технический углерод. Процессы и аппараты: Омск, 2004.
7. Бойправ О.В., Борботько Т.В., Пухир Г.А. // Электроника инфо. 2013. № 6. С. 99–101.
8. Малый С.В. Численное моделирование взаимодействия электромагнитного излучения с периодическими структурами и композиционными материалами: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Минск, 1997.
9. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. М., 1970.
10. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии, Л., 1966.
11. Ерохин Г.А., Чернов О.В., Козырев Н.Д. и др. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. М., 2007.

УДК 004.932.72

СОПРОВОЖДЕНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ЦЕЛЕЙ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ ВИДЕОКАМЕРЫ НА ОСНОВЕ КОВАРИАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ И ПРЕДСКАЗАНИЯ

И.А. БОРИСКЕВИЧ, В.Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 17 октября 2013

Предложен селективно-ковариационный метод сопровождения малоразмерных целей с нестационарной видеокамеры, основанный на модификации метода ковариационного сопровождения и позволяющий уменьшить время вычисления и повысить вероятность правильного обнаружения цели за счет предсказания и минимизация размера области поиска цели.

Ключевые слова: сопровождение малоразмерных целей, нестационарная видеокамера, ковариационная матрица, предсказание.

Введение

Устойчивое сопровождение подвижных малоразмерных целей с использованием нестационарной видеокамеры в реальном масштабе времени является сложной задачей, решение которой проблематично при увеличении скорости перемещения цели и видеокамеры, снижении частоты видеокadres, временном пропадании цели.

Для сопровождения подвижных целей широко используются методы, основанные на среднем сдвиге [1], обучаемых классификаторах [2], вычитании фона [3] и ковариационных признаках [4]. В методе сопровождения на основе среднего сдвига используется итеративный корреляционный поиск соответствия области анализа текущего кадра с эталонным изображением цели, начиная с позиции сопровождаемого объекта на предыдущем кадре. Его развитием является метод на основе обучаемых классификаторов, который позволяет повысить скорость поиска цели за счет параллельной обработки. Данные методы не могут использоваться для сопровождения малоразмерных целей в условиях нестационарной видеокамеры из-за ограничений на величину межкадрового смещения цели. Метод на основе вычитания фона обеспечивает сопровождение малоразмерных целей в условиях нестационарной видеокамеры за счет стабилизации текущего кадра относительно предыдущего (опорного) кадра и обнаружения объекта посредством вычисления разности опорного и стабилизированного кадров. Недостатком данного метода является высокая вычислительная сложность стабилизации кадров, что делает проблематичным его реализацию в реальном масштабе времени. Более эффективным для сопровождения малоразмерных целей в условиях нестационарной видеокамеры является метод на основе ковариационных признаков, учитывающий как яркостные, так и текстурные свойства цели. Однако вычислительная сложность и вероятность ложного обнаружения цели в данном методе резко возрастают при повышении скорости движения цели и видеокамеры, при увеличении области поиска, а также при снижении частоты кадров. Устранение данных недостатков возможно за счет предсказания местоположения цели, позволяющего снизить вычислительную сложность и вероятность ложного обнаружения цели за счет селективной ковариационной обработки и уменьшения размеров дескрипторов и области поиска.

Целью работы является разработка селективно-ковариационного метода сопровождения быстро движущихся малоразмерных целей с нестационарной видеокамеры на основе предсказания их местоположения на видеокадре.

Особенности использования ковариационной матрицы в качестве дескриптора

Элементы ковариационной матрицы признаков $C_l = \|c_l(i, j)\|_{i, j=1, \bar{d}}$ изображения I вычисляются с помощью выражения

$$c_l(i, j) = \frac{1}{XY} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (f(x, y, i) - \mu(i))(f(x, y, j) - \mu(j)), \quad (1)$$

где $f(x, y, d) = (x \ y \ I(x, y) \ |I_x(x, y)| \ |I_y(x, y)| \ |I_{xx}(x, y)| \ |I_{yy}(x, y)| \ \dots)$ – элементы признакового образа $F_l = \|f(x, y, d)\|_{x=1, \bar{X}, y=1, \bar{Y}, d=1, \bar{D}}$; $\mu(d)$ – покомпонентное среднее арифметическое элементов признакового образа; X, Y – количество пикселей изображения по горизонтали и вертикали.

Ковариационные матрицы могут быть использованы в качестве дескрипторов при поиске соответствия между изображениями. Для сравнения двух ковариационных матриц $C_E, C_l \in \text{Sym}_d^+$, описывающих изображения эталона и окна-кандидата в области цели, используется инвариантная риманова метрика:

$$\rho_l^2(C_E, C_l) = \sum_{i=1}^n \log^2 \lambda_i(C_E, C_l) = \text{tr}[\log^2(C_E^{-1/2} C_l C_E^{-1/2})], \quad (2)$$

где Sym_d^+ – связанное риманово многообразие, являющееся локально евклидовым топологическим пространством; $\lambda_i(C_E, C_l)_{i=1, \dots, n}$ – i -е обобщенное собственное значение ковариационных матриц C_E и C_l , вычисленное из $(\lambda_i C_E x_E - C_l x_l = 0)_{i=1, \dots, n}$; $x_i \neq 0$ – обобщенные собственные векторы; $\text{tr}[A]$ – след матрицы A , представляющий собой сумму элементов главной диагонали матрицы $\text{tr}[A] = \sum_i a_{i,i}$.

При использовании ковариационной матрицы в качестве дескриптора цели обеспечивается [4]: объединение различных признаков без их нормирования или использования весовых коэффициентов; инвариантность к масштабированию и изменению среднего; пространственно-частотная локализация цели. За счет этого ковариационная матрица обладает высокой дискриминационной способностью, что позволяет использовать ее для обнаружения подвижных малоразмерных целей с нестационарной видеокамеры в присутствии схожих объектов. Ограничением на практическое применение является вычислительная сложность, связанная с размером ковариационной матрицы и признаковых образов.

Таким образом, для уменьшения вычислительной сложности сопровождения на основе ковариационной матрицы необходимо стремиться к уменьшению размеров признаковых образов. Без ущерба для качества сопровождения это возможно за счет предсказания и минимизации размера области поиска цели, что приводит к возможности использования признаковых образов размером UVd , где U и V – размеры предсказанной области поиска по горизонтали и вертикали.

Селективно-ковариационное сопровождение быстро движущихся малоразмерных целей с предсказанием

Предлагается селективно-ковариационный метод сопровождения быстро движущихся малоразмерных целей, основанный на модификации ковариационного метода. Предложенный метод отличается от базового предсказанием местоположения, размера и определением формы области поиска цели, обработкой события отсутствия цели на видеокадре. Он позволяет уменьшить время и повысить вероятность правильного обнаружения цели, а также

сопровождать быстро движущиеся цели за счет предсказания формы и минимизации размера области поиска цели. Сущность предложенного метода состоит в формировании признаков изображений для перекрывающихся признаков окон в пределах предсказанной области поиска цели на текущем кадре видеопоследовательности, вычислении ковариационных матриц признаков изображений и их сравнении с матрицей эталона.

Алгоритм селективно-ковариационного сопровождения цели включает следующие шаги.

1. Инициализация начальных параметров алгоритма.

1.1. Формирование эталонного изображения E сопровождаемой цели.

Производится считывание первого кадра $I(t) = \|i(t, x, y)\|_{(x=1, \bar{X}, y=1, \bar{Y})}$ размером $X \times Y$ видеопоследовательности $I = \|I(t)\|_{t=1, \bar{T}}$, где $t = 1, \bar{T}$ и T – номер и число кадров в видеопоследовательности соответственно. В качестве эталонного изображения выбирается прямоугольная область размером $M \times N$ на первом кадре видеопоследовательности, центральный пиксель которой является центром сопровождаемой цели.

1.2. Формирование ковариационной матрицы и гистограммы эталонного изображения цели.

Для эталонного изображения E вычисляются ковариационная матрица C_E и гистограмма H_E .

1.3. Инициализация счетчиков кадров.

Устанавливаются начальные значения счетчиков кадров видеопоследовательности $t = 1$ и последовательных кадров без обнаруженной цели $T_a = 0$.

2. Начало цикла обработки кадров видеопоследовательности.

Переход к обработке очередного кадра видеопоследовательности. Значение счетчика кадров видеопоследовательности увеличивается на единицу: $t = t + 1$.

3. Предсказание и селективная обработка области цели на t -м кадре видеопоследовательности.

3.1. Предсказание центра области поиска цели.

Координаты (\hat{x}, \hat{y}) центрального пикселя области поиска цели определяются с помощью выражения

$$(\hat{x}, \hat{y}) = f(V(t-k), T(t, t-k)), \quad (3)$$

где f – функция определения координат центрального пикселя области поиска цели; $V(t-k)$ – параметры движения цели (скорость, ускорение, направление), определяемые по предыдущим кадрам видеопоследовательности; $T(t, t-k)$ – параметры движения видеокамеры (скорость, ускорение, направление) для текущего видеокadra относительно предыдущего.

3.2. Предсказание размера области поиска цели.

Размер S области поиска цели по горизонтали и вертикали вычисляется с помощью выражения

$$S = 3^{-1} \max(M, N) F_k / p, \quad (4)$$

где p – вероятность попадания цели в окно размером $U \times V$, определяемая точностью оценки параметров движения цели и видеокамеры; $F_k = f(T_a)$ – коэффициент, учитывающий количество последовательных кадров T_a , на которых цель не обнаружена. Значение F_k увеличивается с ростом значения счетчика T_a последовательных кадров без обнаруженной цели, что приводит к расширению области поиска цели.

3.3. Определение формы области поиска цели.

Для определения формы области поиска цели производится сравнение яркости опорных пикселей в пределах предсказанной области поиска размером $U \times V$ с экстремумами гистограммы эталона. Расположение опорных пикселей выбирается так, чтобы обеспечивалось частичное перекрытие соседних признаков окон. Признаковое окно, представляющее собой прямоугольную область размером $M \times N$, исключается из предсказанной области поиска цели, если яркость шести и более опорных пикселей в пределах данного окна не соответствует

экстремумам на гистограмме эталона. В результате в области поиска цели локализуется L признаковых окон. На рис. 1 представлены конфигурации области поиска цели, сформированные с помощью ковариационного и селективно-ковариационного методов.

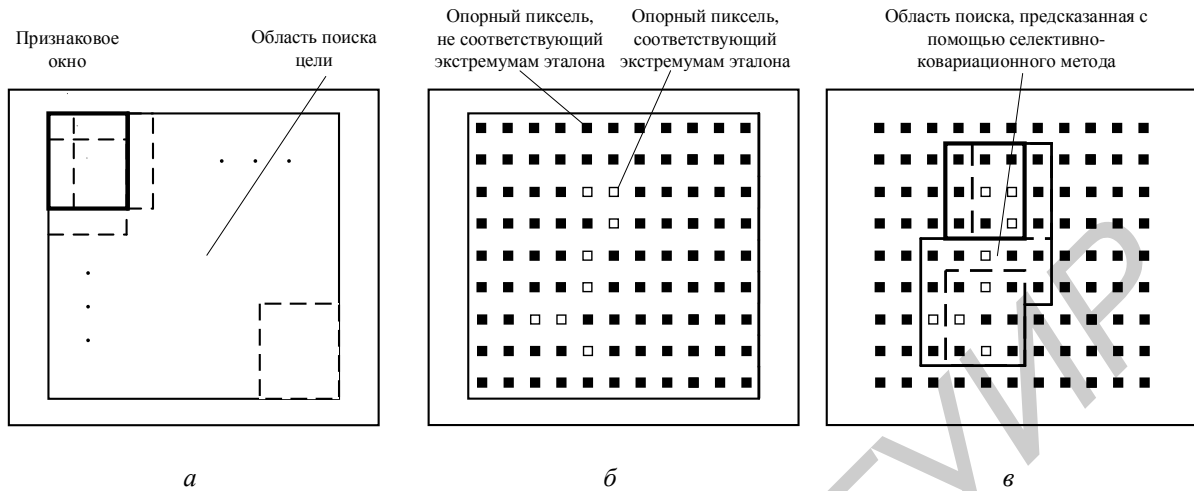


Рис. 1. Предсказание формы области поиска цели
 a – область поиска цели, сформированная с помощью ковариационного метода; b – сетка опорных пикселей, сравниваемых с яркостными экстремумами гистограммы эталона; c – область поиска цели, предсказанная с помощью селективно-ковариационного метода

4. Начало цикла обработки признаковых окон.
 - 4.1. Инициализация счетчика признаковых окон: $l = 0$.
 - 4.2. Вычисление ковариационной матрицы $C_l(t)$ для l -го признакового окна согласно выражения (1).
 - 4.3. Вычисление метрики сходства $\rho_l^2(t, C_E, C_l(t))$ ковариационных матриц l -го признакового окна $C_l(t)$ и эталона C_E согласно выражения (2).
 - 4.4. Значение счетчика признаковых окон увеличивается на единицу: $l = l + 1$.
 - 4.5. Проверка условия окончания цикла обработки признаковых окон. Если $l < L$, то осуществляется переход на шаг 4.2, иначе – выход из цикла обработки признаковых окон.
5. Выбор лучшего признакового окна.

Номер лучшего признакового окна $D \in [1, L]$ вычисляется с помощью соотношения

$$D = \arg \max_{l \in \{1, L\}} (\rho_l^2(t, C_E, C_l(t))), \quad (5)$$

где $\arg \max_x (f(x))$ – функция максимизации, вычисляющая аргумент, соответствующий максимальному значению функции.

6. Сравнение метрики сходства с порогом.

Производится сравнение значения метрики сходства $\rho_D^2(t, C_E, C_l(t))$ для D -го признакового окна с заданным пороговым значением ρ_{Th}^2 . Если условие $\rho_D^2(t, C_E, C_l(t)) > \rho_{Th}^2$ не выполняется, то принимается решение об отсутствии цели на t -м кадре видеопоследовательности. Значение счетчика T_a последовательных кадров без обнаруженной цели увеличивается на единицу ($T_a = T_a + 1$) и осуществляется переход к шагу 2. Если условие $\rho_D^2(t, C_E, C_l(t)) > \rho_{Th}^2$ выполняется, то принимается решение об обнаружении цели, счетчик T_a обнуляется и производится переход к шагу 7.

7. Проверка условия окончания цикла обработки кадров видеопоследовательности.

Если обработка кадров не завершена ($t < T$), осуществляется переход на шаг 2, иначе – выход из алгоритма. В результате выполнения данного алгоритма для каждого кадра видеопоследовательности определяются координаты центра лучшего признакового окна D , в котором обнаружена цель или принимается решение об отсутствии цели в кадре.

Оценка эффективности метода селективно-ковариационного сопровождения

Для оценки эффективности предложенного селективно-ковариационного метода используется вероятность правильного обнаружения и время обработки кадра (обнаружения цели), оцениваемые в условиях изменения частоты, яркости, контраста, уровня зашумления кадров. Изменение частоты кадров эквивалентно изменению скорости движения цели.

Вероятность правильного обнаружения цели определяется отношением числа кадров, на которых цель правильно обнаружена, к общему количеству кадров. Цель считается обнаруженной, если центр лучшего признакового окна находится в окрестности $M \times N$ пикселей от центра цели. При понижении частоты кадров предложенный метод позволяет повысить вероятность правильного обнаружения цели на 10,2 % в условиях сопровождения с высоты порядка 300 м и до 49 % в условиях сопровождения с высоты порядка 400 м (рис. 2, а). Для оценки вероятности правильного обнаружения в условиях зашумления кадров использовался аддитивный гауссовый шум с нулевым средним и дисперсией σ_n^2 . Определено, что селективно-ковариационный метод обладает сопоставимой с ковариационным методом устойчивостью к изменению уровня шума (рис. 2, б).

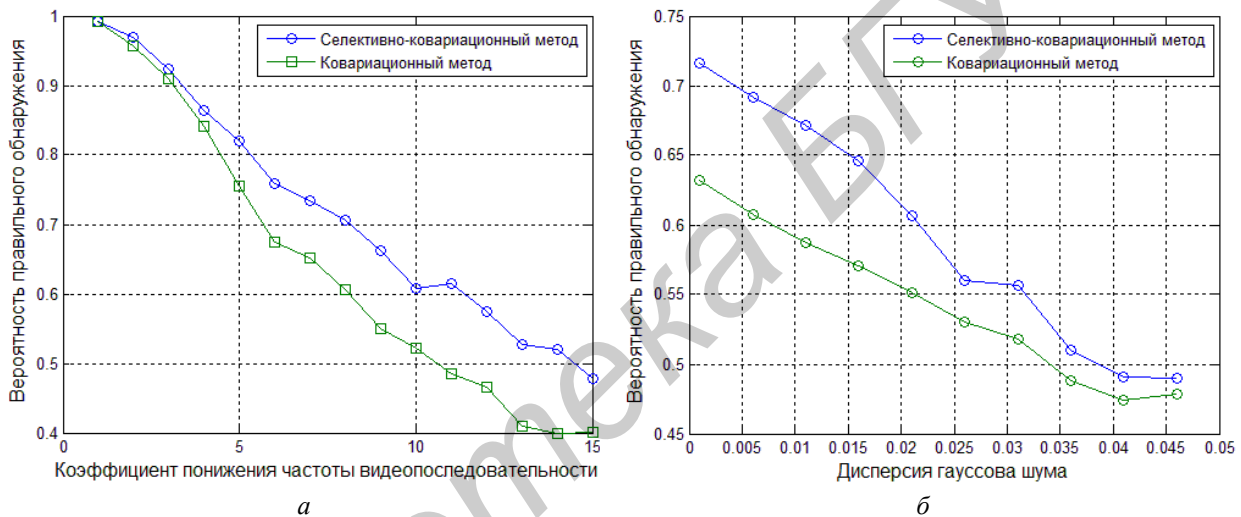


Рис. 2. Сравнение эффективности ковариационного и селективно-ковариационного методов
а – влияние понижения частоты кадров видеопоследовательности на вероятность правильного обнаружения; б – влияние дисперсии шума на среднюю вероятность правильного обнаружения

Установлено, что предложенный метод устойчив к масштабированию интенсивности пикселей видеокadres в диапазоне от 0,004 до 1,55 раз, что сопоставимо с базовым методом. Время обработки кадра оценивалось в среде программирования MATLAB R2013a на компьютере с процессором Intel Core i5 (2,6 ГГц) и ОЗУ 4 Гб. Обработано 10 видеопоследовательностей (1500 видеокadres) размером 720 на 480 пикселей, полученных с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Площадь сопровождаемой цели изменялась в диапазоне от 100 до 400 пикселей. Согласно таблице среднее время обработки одного кадра видеопоследовательности при использовании ковариационного метода составило 347,1 мс, при использовании модифицированного метода – 55,7 мс. Таким образом, селективно-ковариационный метод позволяет повысить скорость обработки кадров в 6,23 раза по сравнению с ковариационным методом.

При длительном отсутствии цели на видеокadre применение селективного предсказания области поиска позволяет существенно сократить количество признаковых окон и, следовательно, время обработки кадра видеопоследовательности. На рис. 3 приведен пример предсказания размера и формы области поиска по опорным точкам в условиях, приближенных к идеальным.

Время обработки видеопоследовательности длительностью 1 с при понижении частоты кадров

Частота видеопоследовательности (кадры/с)	Время обработки видеопоследовательности (мс)	
	Ковариационный метод	Селективно-ковариационный метод
30,00	10413,5	1671,1
15,00	5206,7	835,6
10,00	3471,2	557,0
7,50	2603,4	417,8
6,00	2082,7	334,2
5,00	1735,6	278,5
4,29	1489,1	239,0
3,75	1301,7	208,9
3,33	1155,9	185,5
3,00	1041,3	167,1
2,73	947,6	152,1
2,50	867,8	139,3
2,31	801,8	128,7
2,14	742,8	119,2
2,00	694,2	111,4

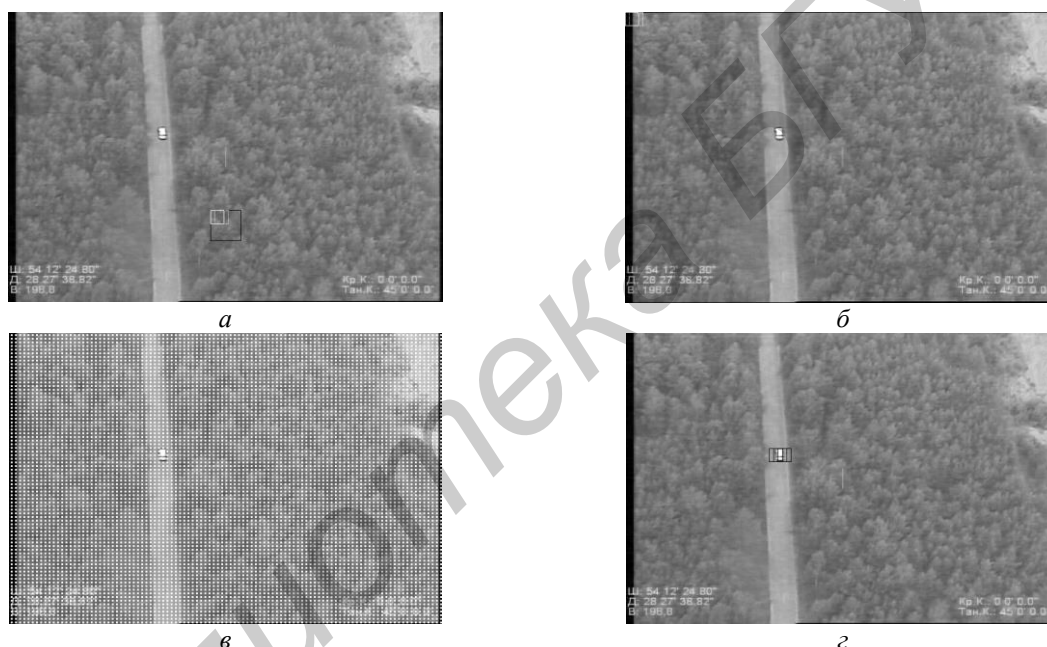


Рис. 3. Селективное предсказание конфигурации области поиска при длительном отсутствии цели:
а – стандартная область поиска, соответствующая последней обнаруженной позиции цели;
б – предсказанная прямоугольная область поиска; *в* – распределение опорных точек внутри предсказанной области поиска; *з* – определение формы предсказанной области поиска

Для представленной видеопоследовательности скорость движения БПЛА составляет порядка 100 км/ч, сопровождаемого транспортного средства – 70 км/ч. Так как цель по условиям моделирования отсутствовала на видеопоследовательности более 3 с, то для ее эффективного обнаружения требуется обработка всего кадра видеопоследовательности, что приводит к увеличению области поиска до 8034 признаковых окон (вместо стандартных 25). В ковариационном методе это возможно с помощью задания больших размеров исходной области поиска, что значительно увеличивает время обработки видеопоследовательности. В селективно-ковариационном методе с помощью выражения (4) вначале осуществляется предсказание прямоугольной области поиска (рис. 3, б), далее – посредством сравнения яркости опорных точек с экстремумами гистограммы эталона производится уточнение ее формы (рис. 3, в, з). В результате предсказания формы области поиска количество признаковых окон сократилось до 3, а время обработки данного кадра уменьшилось с 17899,8 до 6,7 мс. С учетом времени, затраченного на обработку опорных точек (31,3 мс), выигрыш в скорости обработки за счет предсказания формы области поиска для представленного примера составил

примерно 470 раз. Таким образом, использование селективного предсказания позволяет уменьшить время обработки кадра видеопоследовательности, на котором производится поиск отсутствующей ранее цели, примерно до 470 раз по сравнению с ковариационным методом. Это значение близко к теоретическому пределу, определяемому минимальным количеством признаков окон. Если в результате селективного предсказания область поиска цели уменьшится до одного признакового окна, то время обработки кадра видеопоследовательности для заданных параметров сопровождения сократится примерно до 530 раз.

Заключение

Предложен селективно-ковариационный метод сопровождения быстро движущихся малоразмерных целей с нестационарной видеокамеры, основанный на предсказании местоположения, размера и определении формы области поиска цели, с последующим ковариационным анализом этой области на соответствие эталонному образцу цели. Показано, что в условиях непрерывного сопровождения предложенный метод обеспечивает повышение скорости обработки кадров в 6,23 раза, а в случае длительного отсутствия цели в пределе при использовании одного признакового окна – примерно до 530 раз по сравнению с ковариационным методом. Для видеопоследовательности пониженной кадровой частоты селективно-ковариационный метод позволяет увеличить вероятность правильного обнаружения цели на 10,2%, обладая сопоставимой с ковариационным методом устойчивостью к изменению уровня шума и масштабированию интенсивности пикселей видеокадров.

TRACKING OF LOW-SIZED TARGETS FROM NON-STATIONARY CAMERA BASED ON COVARIANCE FEATURES AND PREDICTOR

I.A. BARYSKIEVIC, V. Yu. TSVIATKOU

Abstract

A fast selective-covariance tracking method of low-sized targets from non-stationary camera is proposed. It is based on selective predictor and representation of spatial and statistical target properties by covariance matrix. The comparison of proposed selective-covariance and known covariance methods is provided.

Список литературы

1. *Porikli F., Tuze O.* // Proceedings of IEEE Int'l. Conference on Multimedia and Expo. 2005. P. 1234–1237.
2. *Avidan S.* // Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2005. Vol. 2. P. 494–501.
3. *Ribaric S., Adrinek G., Segvic S.* // Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. 2004. P. 231–234.
4. *Tuzel O., Porikli F., Meer P.* // Proc. 9th European Conf. on Computer Vision. 2006. Vol. 2. P. 589–600.

УДК 004.4'6:655.535.54

МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ РЕФЕРАТОВ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА ТЕКСТОВ

Ф.И. ТРЕТЬЯКОВ, Л.В. СЕРЕБРЯНАЯ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 31 октября 2013

Рассмотрены алгоритмы построения авторефератов на основе частотного анализа текстов. Выполнен сравнительный анализ алгоритмов, а также предложены способы улучшения качества автореферата. Реализован метод составления сводного реферата. Создан программный модуль для решения задачи автореферирования на основе разработанных методов.

Ключевые слова: частотный анализ, автореферат, закон Зипфа.

Введение

В условиях огромного и постоянно растущего объема обрабатываемой информации задача автореферирования является весьма актуальной, поскольку краткий смысловой аналог исходного текста позволяет облегчить и ускорить обработку информации. Частотное автореферирование – это способ создания авторефератов, использующий только количественные характеристики текстов (например, частоту встречаемости слов). Частотный автореферат состоит из некоторой совокупности предложений, извлеченных из текста, причем порядок предложений автореферата может быть изменен относительно исходного текста. В результате, прочитав автореферат, не всегда удается правильно понять его содержание.

Обычно частотные авторефераты составляются на основе частоты вхождения ключевых слов. Это термины, которые чаще других встречаются в тексте и используются для передачи его содержания. Поэтому в автореферат попадают предложения, включающие в себя наибольшее количества ключевых слов. Сводный автореферат – это текст, построенный из совокупности текстов-авторефератов [1]. Одной из задач автореферирования является проблема построения реферата по текстам схожего содержания. В этом случае в результирующем документе могут оказаться предложения с одинаковыми лексическими конструкциями (дублирование) [2]. Примерами таких подзадач может быть создание автореферата по работам одного автора или совокупности работ по рассматриваемой тематике. Несложным способом является построение автореферата по каждому отдельному тексту с последующим их объединением. В результате получится текст, в котором лексически все предложения считаются уникальными, но во многом идентичными с точки зрения смысла. Ключевым словам присваиваются весовые коэффициенты. Высока вероятность того, что слова, имеющие большие веса, попадут в авторефераты схожих тематик, а затем и в сводный автореферат. В результате получится текст, формально корректный, но содержащий повторяющиеся предложения. При этом оригинальная часть каждой работы может «выпасть» из результирующего текста, т.к. не будет иметь большие весовые коэффициенты ключевых слов. Следовательно, автореферат, построенный человеком, может существенно отличаться от текста, полученного автоматически с помощью программного средства [3]. Для оценки качества автоматически построенного частотного реферата предложено использовать сводный автореферат, построенный человеком.

Цель данной работы – оценить возможность исключения дублирования в авторефератах, построенных по методу квазиреферирования. Для этого рассматриваются различные методы автореферирования и выполняется их сравнительный анализ. В статье предложены методы частотного автореферирования на основе законов Зипфа. Создан программный модуль для решения задачи автореферирования на основе вышеуказанных методов. Подготовлены наборы тестовых данных. Разработан метод верификации результатов. Выбран оптимальный метод для каждого класса задач.

Алгоритм построения автореферата

1. Определить выходной размер автореферата. Как правило, задается пользователем в начале генерации в размере n %.
2. Разбить текст на предложения. Каждое предложение с некоторой вероятностью p попадет в сводный автореферат.
3. Разбить предложения на ключевые слова по закону Зипфа [4].
4. Назначить каждому ключевому слову коэффициент значимости k . Для этого можно применить разные методы. Например, использовать частоту вхождения ключевых слов (является численной метрикой).
5. Определить значимость каждого предложения путем определения для него численного значения m , являющегося суммой всех k , входящих в него, деленное на общее количество слов w в предложении k/w . Данный прием называют нормализацией предложений по длине. Ввиду этого условия резко возрастает вероятность появления в тексте коротких предложений. Потому как вероятность содержания в тексте предложения с высоким m , но низким w весьма велика. Поэтому также необходима функция, которая будет отсеивать короткие предложения, т.е. устанавливать определенное ограничение на w . Вес предложения пропорционален весу входящих в него слов.
6. Выбрать n % предложений из текста с наибольшим m .
7. Отсортировать их в исходном порядке для каждого текста, а тексты отсортировать по наборам ключевых слов.

При этом следуют учитывать следующие характеристики текстов.

1. Сигнальные фразы. Это слова или словосочетания, которые априори содержат ключевую информацию, имеют максимальный вес и должны быть включены в итоговый реферат. Например, «вывод», «необходимо подчеркнуть». Их также называют маркерами. Для того, чтобы обнаружить такую фразу в тексте, используют специальные словари маркеров [5].
2. Вопросительные предложения имеют понижающий коэффициент.

Способы создания сводного автореферата

Рассмотрим наиболее часто используемые способы. Первый метод.

1. Для каждого текста создается свой автореферат.
2. Все тексты объединяются в один.
3. Выделяются n % от итогового текста в итоговый сводный автореферат.

Достоинства: самый простой в реализации метод, не требует больших временных затрат на выполнение, способен работать с большими текстами.

Недостатки: на выходе n % не будет достигнуто точно, т.к. работы могут сильно отличаться по объему. Существует высокая вероятность появления дубликатов, вызванная наличием в разных рефератах предложений, имеющих большой вес и схожее содержание. В результате все эти предложения-дубликаты попадут в итоговый автореферат.

Второй метод.

1. Все тексты объединяются в один.
2. По нему строится сводный автореферат.

Достоинства: точность n % удовлетворяется, скорость работы средняя, т.к. время обработки текста увеличивается с добавлением каждой новой структурной единицы.

Недостатки: дубликатов меньше, чем в первом методе. Скорость работы значительно ниже, чем в предыдущем методе, поскольку параллельные вычисления показывают более

высокую скорость работы на независимых друг от друга структурах данных [6].

Один из сложных для реализации методов направлен на исключение дублирования. Метод состоит в том, чтобы по ключевым словам достичь с определенной точностью уникальности каждого предложения.

Достоинства: точность $n\%$ удовлетворяется, дублирование сведено к минимуму. Существует возможность сгруппировать предложения по смыслу.

Недостатки: сложность реализации, низкая скорость работы.

Рассмотрим данный метод подробнее. Необходимо модифицировать алгоритм создания автореферата следующим образом.

После шага 5 необходимо выполнить дополнительные действия над предложениями – исключить дубликаты. Для этого необходимо ввести специальный коэффициент E , который будет означать порог дубликатов или степень похожести предложений. Есть некая функция $f(a, b) > E$. Она сравнивает ключевые слова из предложений a и b . Если они совпадают больше, чем на E , тогда предложения признаются дублирующими, и из них остается только то, у которого m больше. По результатам исследований оптимальным значением E является 0,7. Тогда предложения a и b признаются лексически идентичными, если совпадают больше, чем на 70%. Данная функция вызывается для всех предложений, т. е. выполняется n^2 раз, где n – количество предложений. Функция E значительно замедляет скорость работы алгоритма. Для его ускорения предложено использовать параллельные вычисления [6].

Созданный программный модуль строит автореферат текстов сходной тематики, который наиболее полно включает тезисы каждого текста, содержит минимальное количество дублирующей информации и имеет размер, равный $n\%$ от общего размера всех текстов.

Оценка полученных результатов

Функции программного модуля верификации результатов связаны с оценкой качества сводного автореферата. Для этого использован перечень ключевых слов сводного автореферата, построенного автором. Основной метрикой качества является соотношение совпадения ключевых слов программного модуля и исходного сводного автореферата.

В качестве объектов исследования выберем некоторую совокупность текстов, разделенных на три группы.

1. Тексты различной тематики, не коррелирующие между собой.
2. Тексты сходной тематики, но разных авторов.
3. Тексты работ одного автора.

Исследования проводились для 100 текстов каждой категории. Размер текстов приблизительно около 15 000 символов. Каждая совокупность текстов содержит сводный автореферат, который будет использоваться для верификации результатов.

Для верификации результатов было разработано программное средство на платформе .NET Framework 4.5. Программное средство принимает на вход два автореферата и выводит на экран результаты в виде графической информации, показанной на рисунке.

Верификация результатов выполняется следующим образом.

1. Выделяются ключевые слова с их весовыми коэффициентами из двух авторефератов: исходного A и полученного B (построенного программой).

2. Строятся векторы весов для обоих авторефератов. Причем, если одно из ключевых слов отсутствует в другом векторе, оно добавляется туда с весом 0. Таким образом, векторы нормализуются по длине.

3. Для каждого элемента вектора B вычисляется его разница с соответствующим элементом вектора A по следующей формуле: $C_i = \frac{|A_i - B_i|}{A_i}$. Получается вектор различий C .

4. Находится среднеквадратическое отклонение вектора различий по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

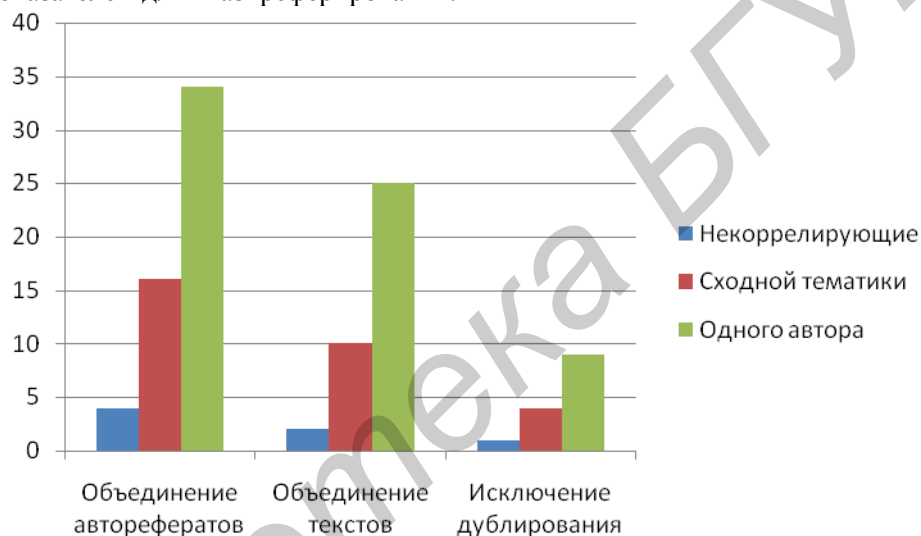
Таким образом, получается итоговая оценка отклонения полученного автореферата от исходного. Чем меньше отклонение, тем качественнее получился текст, тем лучше выбранный метод.

Если текст изобилует предложениями-дубликатами, то в нем увеличиваются веса ключевых слов этих предложений. В результате в тексте присутствует два-три ключевых слова с огромными весами, а все остальные – с низкими. Поэтому итоговое среднеквадратическое отклонение получается больше.

Для текстов с различной тематикой априори больше всего подходит первый либо второй метод. Способ устранения дублирования не очень подходит для данного вида текстов, т.к. вероятность самостоятельного появления дубликатов в нем весьма мала.

Тексты сходной тематики, но разных авторов могут содержать дубликаты, поскольку разные авторы часто ссылаются на одни и те же источники, и отклонение здесь может быть велико. В этом случае метод исключения дублирования подходит лучше всего. Он позволяет получить автореферат практически без дубликатов (отклонение в пределах 2–4 %).

Для текстов одного автора первые два метода подходят плохо, расхождение может составить до 35 %. Метод исключения дублирования имеет расхождение в 6–10 %, что является хорошим показателем для квазиреферирования.



Оценка результатов устранения дублирования: на оси абсцисс отложены исследуемые методы и виды тестовых текстов; на оси ординат отображается процент отклонения набора ключевых слов автоматического реферата от созданного автором

Заключение

Частотное автореферирование – это наиболее простой и быстрый способ создания авторефератов. С помощью частотного реферирования можно получить краткое содержание текста за минимальное время.

Существует много методов частотного автореферирования. Все они имеют свои достоинства и недостатки. Метод исключения дублирования демонстрирует неплохие показатели по скорости работы на больших объемах данных (от 100 текстов 15000 символов в каждом) с помощью распределенных вычислений [6] и показывает малый процент отклонения (1–10 %) по ключевым словам от идеального сводного автореферата.

Недостатки частотного реферирования обусловлены самим способом реферирования. Чтобы их устранить, необходимо вводить понятие семантики и строить итоговый текст, анализируя его содержание. Иными словами, использовать семантические методы. Однако это будет гораздо медленнее и сложнее. Для построения авторефератов методами со сложными алгоритмами (например, метод исключения дублирования) хорошо могут быть использованы распределенные вычисления (распараллеливание на уровне выполнения с помощью потоков) [6]. Кроме того, закон Зипфа, словари маркеров или позиционный поиск улучшают работу автореферирования.

AUTOMATIC CONSTRUCTION METHODS OF ABSTRACTS ON THE BASIS OF THE TEXTS FREQUENCY ANALYSIS

F.I. TRETYAKOV, L.V. SEREBRYANAYA

Abstract

Algorithms of author's abstracts construction on the basis of the texts frequency analysis are considered. Their comparative analysis of algorithms is made, and also ways of quality improvement of the author's abstract are offered. The algorithm of drawing up of the summary abstract is realized. The program module for automatic construction of abstracts on the basis of the developed methods is created.

Список литературы

1. TextMining. Глубинный анализ текста. Из цикла лекций «Современные Internet-технологии» для студентов 5-го курса кафедры Компьютерных технологий физического факультета Донецкого национального университета. ДонНУ, кафедра КТ, проф. В.К. Толстых.
2. *Паклин Н.Б., Орешков В.И.* Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. СПб, 2009.
3. *Захаров В.П.* Информационные системы (документальный поиск). СПб, 2002.
4. *Серебряная Л.В., Третьяков Ф.И.* // Матер. VI междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы методики преподавания математики и информатики». Биробиджан, 20 апреля 2011. С. 175–181.
5. *Серебряная Л.В., Чебаков С.В.* // Информатизация образования. 2011. № 2. С. 52–61.
6. *Третьяков Ф.И., Серебряная Л.В.* // Вест. БГУ. Сер. 1. 2013. № 2. С. 105–108.

УДК 621.372.037.372

МЕТОД СИГНАЛА ОРТОГОНАЛЬНОЙ ЧАСТОТНОЙ МАНИПУЛЯЦИИ БЕЗ РАЗРЫВА ФАЗЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОТ УТЕЧКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ В ЦИФРОВОЙ ФОРМЕ

В.К. ЖЕЛЕЗНЯК, Д.С. РЯБЕНКО

*Полоцкий государственный университет
Блохина, 29, Новополоцк, 211440, Беларусь**Поступила в редакцию 11 октября 2013*

Исследуется оптимальный частотно-манипулированный сигнал для оценки защищенности каналов утечки информации в цифровой форме. Рассматривается система сигналов, используемая для передачи информации как совокупность сигналов, объединяемых единым правилом построения. Предложены оптимальная система сигналов, обеспечивающая максимальную помехоустойчивость при минимальных отношениях энергии бита к спектральной плотности мощности шума в каналах утечки информации, методы оценки защищенности дискретных систем сигналов в каналах утечки информации при воздействии шумов высокого уровня типа белого гауссовского шума, а также выбор и обоснование оптимального сигнала, который позволит оценить защищенность каналов утечки информации.

Ключевые слова: речевой сигнал, манипуляция сигнала, спектр сигнала, оценка защищенности сигнала.

Введение

Защита информации от утечки определяется многими факторами. Мера защиты дискретных сообщений определяется методом, реализующим предельную чувствительность, высокую точность, помехозащищенность. Помехозащищенность измерительного сигнала для оценки защищенности каналов утечки информации является одним из основных факторов, влияющим на предельную чувствительность и высокую точность. Первичное преобразование аналоговых сигналов в цифровые (дискретные) последовательности, которыми манипулируют несущие частоты, генерирует каналы утечки информации.

Цель работы – предложить и обосновать структуру и основные параметры оптимального измерительного сигнала и оценку защищенности от утечки (дискретных) манипулированных сигналов в цифровой форме.

Основной задачей является обработка сигнала в условиях шумов высокого уровня. В этой связи возникает необходимость сужения полосы такого сигнала, оптимальность его обработки. Выбор измерительного сигнала решается при воздействиях ряда факторов, неопределенность которых не исследована. Принципы системного подхода для обоснования основных параметров измерительного сигнала характеризуют степень достижения поставленной цели оценки защиты информации.

Выбор измерительного сигнала

Для передачи дискретных сообщений широко распространены двоичные ($M = 2$) и M -ичные ($M > 2$) амплитудно-манипулированные (АМн), частотно-манипулированные (ЧМн) и фазоманипулированные (ФМн) сигналы. Манипулированный сигнал представляет собой несущие колебания, параметры которого меняются во времени по частоте или по фазе.

Модулирующими сигналами являются биты, важные параметры которых – коэффициент взаимной корреляции ρ , энергия символьного бита. Символьные биты сформированы видеоимпульсами. Векторная структура определяется величиной коэффициента взаимной корреляции некоторого множества битового символа ($M = 2$ либо $M > 2$). ФМн-сигналы, модулирующие несущее колебание f_n при $\rho = -1$, минимизируют вероятность ошибочного приема бита. Для M -ичных ФМн-сигналов вероятность символьной ошибки P_E увеличивается из-за взаимной корреляции между битами, уменьшения отношения энергии бита E_b к спектральной плотности мощности шума N_0 , т.е. E_b/N_0 . С увеличением размера множества символов $M = 2^k$, где $k = 2, 4, 8, 16 \dots$, энергия символа $E_E = E_b \cdot \log_2 M$.

В табл. 1. [2] представлены вероятности ошибки для различных бинарных манипуляций при $M = 2$. Из [2] следует, что разность между когерентной ФМн и некогерентной ЧМн составляет приблизительно 4 дБ при вероятности ошибки бита 10^{-4} . При когерентном детектировании бинарных ФМн сигналов и некогерентном детектировании бинарных ортогональных ЧМн-сигналов [2] вероятность ошибки составляет $8 \cdot 10^{-1}$ и $5 \cdot 10^{-1}$ бит соответственно при E_b/N_0 минус 8 дБ. Увеличение $M = 2^k$ повышает вероятность битовой ошибки ФМн-передачи и уменьшает вероятность ошибки при ортогональной ЧМн-передаче. Разность вероятностей битовой ошибки ЧМн ($M = 2$) для когерентного и некогерентного приема составляет менее 1 дБ при отношении $E_b/N_0 = -10$ дБ [3].

На основании исследований модулирующих сигналов можно сделать вывод о необходимости дальнейшего исследования ортогонального ЧМн-сигнала с некогерентным приемом.

При малых отношениях $E_b/N_0 = -10$ дБ выигрыш в чувствительности когерентного сигнала по отношению к некогерентному составляет менее одного дБ. M -ичная передача ЧМн-сигналов по чувствительности имеет несомненное преимущество перед ФМн-сигналами.

При некогерентном приеме начальная фаза неизвестна, являясь случайной величиной. Вероятность ошибки при оптимальном некогерентном приеме двух ортогональных сигналов [4]:

$$P_c = 0,5 \exp(-0,5 h_0^2) = 0,5 \exp\left(-0,5 \frac{E_b}{N_0}\right), \text{ где } h_0^2 = \frac{P_c T}{N_0} = \frac{E_b}{N_0}.$$

Анализ АМн-сигналов, обладающих более низкой помехоустойчивостью по сравнению с ФМн- и ЧМн-сигналами, исследовать нецелесообразно. Численные значения коэффициентов зависимости между ФМн-, ЧМн- и АМн-сигналами известны [5, 6].

Решение задачи начнем с анализа известных методов передачи информации, преобразованной в цифровую форму. При различном числе символов (алфавит включает $\log_2 M$ бит информации), остановимся на двоичных ЧМн-сигналах, имеющих преимущество перед ФМн и АМн при системном анализе. Из многообразия и сложности структуры и функций измерительных сигналов рассмотрим ортогональный сигнал частотной манипуляции [2]:

$$S_i = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_i t + \varphi), 0 \leq t \leq T, i = \overline{1, M}.$$

Сигналы $S_i(t)$ и $S_j(t)$, имеющие одинаковую длительность и действующие на интервале от $t_1 = t_0$ до $t_2 = t_0 + T$, называются ортогональными, если их скалярное произведение равно нулю [1]:

$$\int_0^{t_0+T} S_i(t) \cdot S_j(t) dt = 0,$$

а спектры этих сигналов удовлетворяют условию

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_i(j\omega) \cdot S_j^*(j\omega) dt = 0.$$

Сигналы $S_i(t)$ и $S_j(t)$ с несущими частотами f_1 и f_2 являются ЧМн-несущими $i, j = \overline{1, M}, i \neq j$.

Обоснование ЧМн-сигнала в качестве измерительного для оценки защищенности от утечки речевых сигналов в цифровой форме

Передача речевых сигналов в цифровой форме по каналам связи и сигналов передачи данных обусловлена рядом преобразований. Передача данных осуществляется манипуляцией несущих элементарными битовыми символьными посылками.

Некогерентная ортогональная передача ЧМн-сигналов, характеризующаяся отсутствием перекрестных искажений при передаче несущих гармонических колебаний частот f_1 и f_2 длительностью T с одинаковыми амплитудами, подтверждает их ортогональность. Частоты f_1 и f_2 ортогональны, если разность частот $(f_1 - f_2)$ кратна $1/T$ Гц [2]. Такая разность устанавливается при воздействии тактовых частот, благодаря чему отсутствуют перекрестные помехи. Минимальная разность между несущими частотами f_1 и f_2 для двоичных ортогональных ЧМн-сигналов $\cos(2\pi f_1 t + \varphi)$ и $\cos 2\pi f_2 t$. Такие сигналы формируются при $f_1 > f_2$, скорости $1/T$ символ/с, где T – длительность символа, φ – произвольный постоянный уровень фазы между 0 и 2π .

Ортогональность удовлетворяется, если [2]:

$$\int_0^T \cos 2\pi f_1 t \cdot \cos 2\pi f_2 t dt - \sin \varphi \int_0^T \sin 2\pi f_1 t \cdot \cos 2\pi f_2 t dt = 0.$$

После ряда преобразований

$$\cos \varphi \cdot \sin 2\pi(f_1 - f_2)T + \sin \varphi (\cos 2\pi(f_1 - f_2)T - 1) = 0.$$

Выражение справедливо при произвольной фазе φ , если $\sin 2\pi(f_1 - f_2)T = 0$ и $\cos 2\pi(f_1 - f_2)T = 1$ $\sin x = 0$, $\cos x = 1$ при $n = 2k$.

Из [2] $2\pi(f_1 - f_2)T = 2\pi k$ или $f_1 - f_2 = 1/T$. Минимальная разность частот между несущими f_1 и f_2 для ортогональной передачи ЧМн сигнала с некогерентным детектированием достигается при $k = 1$ [2].

Ортогональность несущих частот f_1 и f_2 достижима с исключением перекрестных искажений при тактовой синхронизации, если при передаче сигнала с несущей f_1 не принимается сигнал на несущей f_2 фильтром приемника, настроенным на несущую f_2 .

Проанализируем спектры ЧМн-колебаний с целью сравнительной оценки их параметров для использования в качестве измерительного сигнала. Синтез такого сигнала возможен для оценки защищенности от утечки в несимметричных зашумленных каналах утечки информации.

Аналитическое выражение спектра двоичных ЧМн-колебаний представляется как сумма двух независимых модулированных сигналов [7]:

$$U_{\text{ЧМн}}(t) = U'_{f_1}(t) + U''_{f_2}(t),$$

где $U'_{f_1}(t)$ – спектр сигнала с несущей f_1 , $U''_{f_2}(t)$ – спектр сигнала с несущей f_2 .

Спектр сигнала с несущей f_1 [7]:

$$U'_{f_1}(t) = U_m \frac{t_u}{T} \cos \omega t + U_m \frac{t_u}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{kF_1 t_u}{2}}{kF_1 t_u} \cdot [\cos(\omega + kf_1)t + \cos(\omega - kf_1)t]. \quad (1)$$

Из (1) следует, что спектр АМн-колебания имеет две симметричные боковые полосы с частотами $(\omega \pm kf_1)$, $k = 1, 2, \dots, n$.

Представим модулирующее колебание в виде меандра [8]:

$$E(t) = \frac{4E}{\pi} \left(\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \dots \right) = \frac{4E}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(2n+1)\omega_0 t}{(2n+1)\omega_0 t}, \text{ где } \omega_0 = 2\pi/T, n = 1, 2, \dots, i.$$

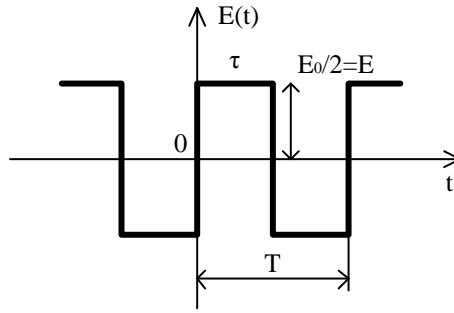


Рис. 1. Модулирующее колебание в виде меандра (T – период, τ – длительность импульса).

Представим АМн-колебание [7]:

$$U_{f_2}''(t) = U_m \left(1 - \frac{t_u}{T}\right) \cos 2\pi f_2 t - U_m \frac{t_u}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{2\pi k F_1 t_u}{2}}{2\pi k F_1 t_u} \cdot [\cos(2\pi f_2 + 2\pi k F_1)t + \cos(2\pi f_2 - 2\pi k F_1)t].$$

Окончательное выражение спектра ЧМн-сигнала с разрывом фазы представляется выражением:

$$U_{\text{ЧМн}}(t) = U_m \frac{t_u}{T} \cos 2\pi f_2 t + U_m \left(1 - \frac{t_u}{T}\right) \cos 2\pi f_2 t + U_m \frac{t_u}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{2\pi k F_1 t_u}{2}}{2\pi k F_1 t_u} \times$$

$$\times [\cos(2\pi f_1 + 2\pi k F_1)t + \cos(2\pi f_1 - 2\pi k F_1)t - \cos(2\pi f_2 + 2\pi k F_1)t - \cos(2\pi f_2 - 2\pi k F_1)t].$$

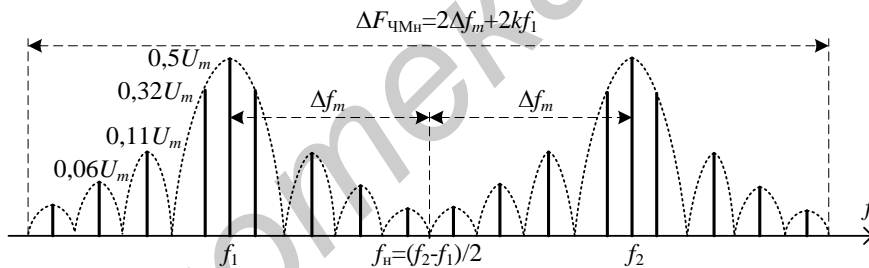


Рис. 2. Спектр двоичного ЧМн-сигнала.

Из представленного на рис. 2 графика следует, что спектр ЧМн-сигнала занимает полосу $\Delta F_{\text{ЧМн}} = 2\Delta f_m + 2kF_1$. Ширина спектра определяется числом k учитываемых гармоник F_1 , разностью частот $(f_2 - f_1)$, значением частоты f_1 и первой верхней модулирующей частотой меандра.

Из рис. 2 следует, что спектр колебаний ЧМн шире спектра АМн при прочих равных условиях на величину удвоенной девиации частоты $2\Delta f_m$. Сравнительную оценку параметров ЧМн-сигнала с разрывом фазы и без разрыва фазы выполним с представления выражения спектра колебаний ЧМн-сигнала без разрыва фазы.

Спектр ЧМн-сигнала без разрыва фазы представляется выражением [7]:

$$U_{\text{ЧМн}}(t) = U_m \cos[2\pi f_n t + \Delta\varphi(t)], \quad (2)$$

где $\Delta\varphi(t)$ – приращение фазы, обусловленная изменением частоты f_n . Представим (2) в развернутом виде:

$$U_{\text{ЧМн}}(t) = U_m [\cos 2\pi f_n t \cdot \cos \Delta\varphi(t) - \sin 2\pi f_n t \cdot \sin \Delta\varphi(t)].$$

Для построения спектра ЧМн-сигнала необходимо развернуть функции $\cos \Delta\varphi(t)$ и $\sin \Delta\varphi(t)$. Модулирующим сигналом по-прежнему является меандр. С помощью этого сигнала происходит изменение частоты f_n на величину $\pm \Delta f_m$ [9]:

$$\Delta f(t) = \begin{cases} -\Delta f_m & \text{при } -t_u < t < 0; \\ \Delta f_m & \text{при } 0 < t < t_u. \end{cases}$$

Изменение $\Delta f(t)$ фазы $\Delta\varphi(t)$ зависит от изменения частоты [9]:

$$\Delta\varphi(t) = \int_0^t \Delta f(t) dt = \begin{cases} -\Delta f_m t + C_1, & -t_u < t < 0; \\ \Delta f_m t + C_2, & 0 < t < t_u, \end{cases} \quad (3)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, которые целесообразно выбрать таким образом, чтобы соблюдались условия непрерывности фазы, определяемые из рис. 3 [7].

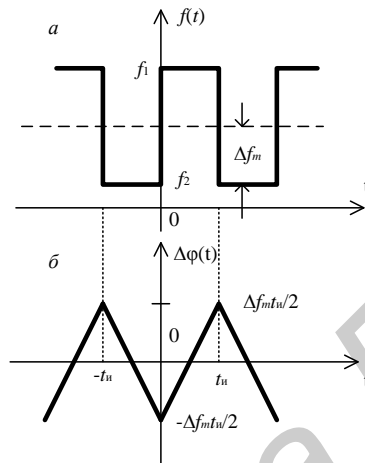


Рис. 3. Манипулирующее колебание (меандр) (а), приращение фазы в ЧМн-колебании (б)

Тогда из (3), используя значения C_1 и C_2 получаем

$$\Delta\varphi(t) = \begin{cases} -\Delta f_m t (t + t_u/2), & -t_u < t < 0; \\ \Delta f_m t (t - t_u/2), & 0 < t < t_u. \end{cases}$$

Функции $\cos\Delta\varphi(t)$ и $\sin\Delta\varphi(t)$ периодические, поскольку функция $\Delta\varphi(t)$ периодическая. Функции $\cos\Delta\varphi(t)$ и $\sin\Delta\varphi(t)$ были разложены в ряд Фурье и получено [7]:

$$U_{\text{ЧМн}}(t) = \frac{a_0}{2} = U_m \frac{\sin \frac{\pi m_{\text{ЧМ}}}{2}}{\frac{\pi m_{\text{ЧМ}}}{2}} \cos 2\pi f_{\text{н}} t + \frac{2m_{\text{ЧМ}} U_m}{\pi} \sum_{k=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{\frac{\pi m_{\text{ЧМ}}}{2}}{m_{\text{ЧМ}}^2 - k^2} \times$$

$$\times [\cos(2\pi(f_{\text{н}} + kF_1)t) + \cos(2\pi(f_{\text{н}} - kF_1)t)] -$$

$$\frac{2m_{\text{ЧМ}} U_m}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\frac{\pi m_{\text{ЧМ}}}{2}}{m_{\text{ЧМ}}^2 - k^2} \times [\sin(2\pi(f_{\text{н}} + kF_1)t) + \sin(2\pi(f_{\text{н}} - kF_1)t)].$$

Представим спектр ЧМн колебаний без разрыва фазы при индексе частотной манипуляции $m = 0,8$.

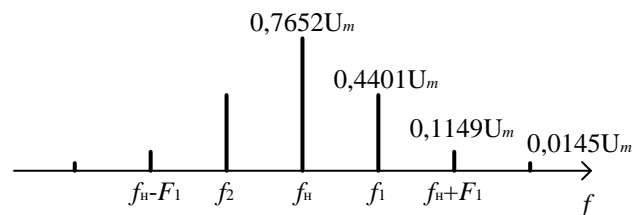


Рис. 4. Спектр ЧМн-колебания при индексе ЧМн $m_{\text{ЧМ}}=0,8$ [7]

Практически можно считать, что спектр ЧМн сигнала имеет две боковые несущие, поскольку остальные несущие составляют порядка двух процентов энергии сигнала. Ширина спектра ЧМн без разрыва фазы равна ширине полосы АМн сигнала.

Заключение

Выбрана и обоснована предпочтительная и актуальная альтернатива применительно к сложной решаемой задаче оценки защищенности речевых сигналов в цифровой форме в виде ортогонального ЧМн-сигнала без разрыва фазы. Метод сигнала с ортогональной частотной модуляцией без разрыва фазы для оценки защищенности от утечки цифровой речевых сигналов в цифровой форме обладает наиболее узкой полосой спектра по сравнению с ФМн, АМн. Метод сигнала с ортогональной частотной модуляцией без разрыва фазы для оценки защищенности от утечки речевых сигналов в цифровой форме занимает полосу спектра в 2 раза уже по сравнению с методами ЧМн сигнала с разрывом фазы, исключая переходные искажения и повышая точность оценки за счет учета с высокой точностью только двух боковых составляющих. Коэффициент k определяется отношением спектра ЧМн-сигнала с разрывом фазы к отношению спектра ЧМн-сигнала без разрыва фазы и составляет при равных несущих частотах f_n и девиации частоты $k = 2$.

METHOD OF ORTHOGONAL FREQUENCY MANIPULATION SIGNAL WITHOUT RUPTURE OF THE PHASE FOR THE ESTIMATION OF SECURITY FROM LEAK OF SPEECH SIGNALS IN THE DIGITAL FORM

V.K. ZHELEZNYAK, D.S. RYABENKO

Abstract

The optimum frequency-manipulated signal for an estimation of security of channels of information leakage in the digital form is investigated. The system of signals used for an information transfer as set of signals, united by a uniform rule of construction is considered. The optimum system of signals providing the maximum noise stability at the minimum relations of energy of bit to spectral density of capacity of noise in channels of information leakage, methods of an estimation of security of discrete systems of signals in information leakage channels are offered at influence of noise of high level of type white noise, and also a choice and a substantiation of an optimum signal which will allow to estimate security of channels of information leakage.

Список литературы

1. Мановцев А.П. Введение в цифровую радиотелеметрию. М., 1967.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М., 2007.
3. Стиффлер Дж. Дж. Теория синхронной связи. М., 1975.
4. Защищенные радиосистемы цифровой передачи информации / Под ред. П.Н. Сердюкова. М., 2006.
5. Савищенко Н.В. Многомерные сигнальные конструкции: их частотная эффективность и потенциальная помехоустойчивость приема. СПб, 2005.
6. Рябенко Д.С., Железняк В.К. // Вестн. ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. 2012. № 12. С. 12–19.
7. Железняк В.К., С.В. Дворников Основы теории модулированных колебаний. СПб, 2006.
8. Гарновский Н.Н. Теоретические основы электропроводной связи. Часть 1. Общая теория пассивных линейных цепей с сосредоточенными постоянными. М., 1956.
9. Анго Андре. Математика для электро- и радиоинженеров. М., 1964.

УДК 004.056: 061.068

КОНТРОЛЬ ХАОТИЧНОСТИ ВЫХОДНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ АЛГОРИТМА ШИФРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА

А.В. СИДОРЕНКО

Белорусский государственный университет
пр. Независимости, 4, 220050, Минск, Беларусь

Поступила в редакцию 17 февраля 2014

Рассматриваются два подхода для контроля хаотического режима в выходных последовательностях алгоритма шифрования с использованием динамического хаоса путем применения метода задержанной координаты и метода сингулярного спектрального анализа. Проводится сравнительный анализ параметров входных и выходных последовательностей разработанного алгоритма шифрования на основе динамического хаоса и алгоритмов AES (Advanced Encryption Standard), DES (Data Encryption Standard). Установлено, что параметры, характеризующие выходные последовательности алгоритма шифрования с использованием динамического хаоса не хуже параметров, полученных для стандартных шифров.

Ключевые слова: шифрование, информация, контроль, хаотическое отображение, хаос.

Введение

На современном уровне развития информационных технологий существенное значение приобретают вопросы защиты информации в телекоммуникационных системах различного назначения. Развивается направление, связанное с шифрованием информации в хаотических системах [1]. Использование динамического хаоса для систем защиты информации обусловлено способностью хаотических отображений обеспечивать скрытость передачи зашифрованной информации в блочных или поточных шифрах. Детерминизм хаоса способствует шифрованию информации, а его случайность делает систему стойкой к вскрытию [2, 3]. Такие свойства как спутанность и распыление, характерные для традиционных криптоалгоритмов, в хаотических реализуются с помощью хаотических отображений и последующих итераций.

В работе [4] показано, что традиционные криптографические системы могут рассматриваться в рамках синергетического подхода, то есть как нелинейные динамические системы. Под криптосистемой тогда можно понимать динамическую систему $\langle f, X, K \rangle$ с нелинейной функцией f , пространством состояний X и пространством параметров K . Нелинейная функция f задается с помощью алгоритма, X – множество исходных состояний, K – множество ключей.

При рассмотрении алгоритмов с использованием динамического хаоса существенным является обеспечение хаотического режима, что проявляется в получении хаотических последовательностей алгоритма шифрования, и обусловлено обеспечением требований безопасности схемы шифрования.

Как известно, показатель экспоненты Ляпунова λ является признаком хаотического режима функционирования динамической системы [5]. В ряде работ предлагается использовать показатель экспоненты Ляпунова λ для определения хаотичности динамической системы в криптографии [6, 7]. Однако при использовании, например, логистического отображения, вычисление среднего значения показателя экспоненты является недостаточно точным, либо не

охватывает «окна периодичности», где динамическая система является детерминированной. Поэтому следует рассмотреть иные методы анализа зашифрованных сообщений.

Целью работы является определение количественных параметров и визуализация зашифрованных с использованием динамического хаоса выходных последовательностей алгоритма шифрования.

В данной работе предлагаются и рассматриваются два подхода определения хаотичности выходных последовательностей зашифрованной информации. Первый из них основан на подходе методов нелинейной динамики, позволяющем определять параметры динамической системы и их изменений в процессе шифрования. Вторым вариантом, обусловленным наличием в исследуемых последовательностях детерминированной составляющей, дает возможность использовать подход на базе сингулярного спектрального анализа с определением динамики интенсивности главных компонент.

Методика проведения исследований

Для проведения исследований использованы выходные последовательности, полученные для разработанного нами алгоритма шифрования с применением динамического хаоса и алгоритмами AES (Advanced Encryption Standard), DES (Data Encryption Standard), а также входные последовательности открытого текста. В основу разработанного нами алгоритма шифрования на основе динамического хаоса положена обобщенная схема блочного симметричного алгоритма шифрования [8]. В качестве базового преобразования используется сеть Фейстеля, в которой нелинейная функция задается в виде хаотического отображения.

При использовании первого из подходов определения хаотичности анализ степени хаотичности выходных (зашифрованных) последовательностей проводится построением фазовых портретов и применением метода задержанной координаты. Применение метода задержанной координаты, как одного из методов нелинейной динамики, позволяет определить количественные параметры в виде корреляционной размерности d и энтропии Колмогорова K каждой из исследуемых последовательностей [9]. Корреляционная размерность определяет область локализации динамической системы в фазовом пространстве или число степеней свободы указанной системы. Энтропия Колмогорова характеризует устойчивость работы системы, измеряемую скоростью расходимости ее траекторий в фазовом пространстве. Визуальный анализ проводится по построенным фазовым портретам системы. Построение фазовых портретов дает возможность визуально определять степень заполнения фазового пространства.

При использовании второго из подходов определения хаотичности, основанного на методе сингулярного спектрального анализа, оценивается количественный параметр – уровень главных компонент I . Для получения визуальной информации используется построение фазовых диаграмм, когда по осям x и y откладываются различные пары собственных векторов или главных компонент.

Метод задержанной координаты

Согласно метода задержанной координаты [9], выходная последовательность алгоритма шифрования представляется в виде

$$x_1, x_2, \dots, x_n, \quad (1)$$

где $x_n = x(np)$, p – шаг дискретизации, n – целое число.

Эта последовательность порождает m -мерные векторы, лежащие в m -мерном фазовом пространстве

$$\vec{x}_i^T = (x_i, \dots, x_{i+m-1}), \quad (2)$$

где T – знак транспонирования.

Состояние системы в реконструированном m -размерном фазовом пространстве определяется m -размерными точками для каждой реализации $x(p)$

$$x_i^m = \left(m^{-1/2}\right)(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1}). \quad (3)$$

Корреляционный интеграл $C_m(l)$ – это функция, равная вероятности того, что расстояние между двумя реконструированными векторами \bar{x}_i меньше l .

Корреляционная размерность d определяется

$$d = \lim_{r \rightarrow 0} [\lg C_m(r) / \lg r], \quad (4)$$

где $C_m(r)$ – корреляционный интеграл, r – размер ячейки разбиения или коэффициент подобия.

Корреляционный интеграл записывается

$$C_m(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \theta(r - |\bar{x}_i - \bar{x}_j|), \quad (5)$$

где $\theta = 0$ при $t \leq 0$, $\theta = 0,5$ при $t = 0$, $\theta = 1$ при $t \geq 0$, θ – функция Хевисайда, N – число точек, используемых для оценки размерности.

Найдено, что для малых значений r поведение функции $C_m(r)$ может быть описано

$$C_m(r) = r^d, \quad (6)$$

где d – параметр, близкий к фрактальной размерности странного аттрактора, r – параметр подобия.

Для достоверной оценки корреляционной размерности d размерность соответствующих фазовых пространств должна удовлетворять условию Мане

$$m \geq 2d + 1. \quad (7)$$

Для снижения объема вычислений используется алгоритм И. Арансона, позволяющий оперировать с целыми числами и существенно снизить временные затраты.

Энтропия Колмогорова определяется выражением

$$K = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \lg [C_m(r) / C_{m+1}(r)]. \quad (8)$$

Метод сингулярного спектрального анализа

Для исследования реализаций открытого и зашифрованного текстовых сообщений используется метод сингулярного спектрального анализа, алгоритм которого сводится к следующему [10].

Пусть задан временной ряд $\{x_i\}_{i=1}^N$, образованный последовательностью N равноотстоящих значений некоторой функции $f(t)$.

1. *Развертка одномерного ряда в многомерный.* В качестве первой строки матрицы X используется M (длина гусеницы) значений последовательности, начиная с первого члена. В качестве второй строки матрицы используются значения последовательности, начиная с x_2 до x_{M+1} . Последнюю строку матрицы с номером $k = N - M + 1$ образуют последние M элементов последовательности. Эту матрицу, элементы которой $x_{ij} = x_{i+j-1}$, можно рассматривать как M -мерный временной ряд, которому соответствует M -мерная траектория в M -мерном пространстве из $k - 1$ звена.

2. *Анализ главных компонент: сингулярное разложение выборочной ковариационной матрицы.* Вычисляется матрица $V = \left(\frac{1}{k}\right)X^T X$, которая является нецентрированной ковариационной матрицей.

Определяются собственные числа и собственные вектора матрицы V , т.е. ее разложение $V = P\Lambda P^T$, где Λ – диагональная матрица, на диагонали которой стоят

упорядоченные по убыванию собственные числа, а P – ортогональная матрица собственных векторов матрицы V .

Матрицу P можно рассматривать как матрицу перехода к главным компонентам $XP = Y = (y_1, y_2, \dots, y_M)$.

Если используется временной ряд из случайных чисел, то собственные числа матрицы V являются выборочными дисперсиями соответствующих главных компонент, а квадратные корни из них – выборочными средними. Графическое представление собственных чисел и некоторых функций при анализе главных компонент традиционно используется для выявления структуры исследуемого ряда, отбора и интерпретации главных компонент.

3. *Отбор главных компонент.* С учетом свойств матрицы P можно матрицу ряда X представить в виде $X = YP^T$. Получаем разложение матрицы ряда по ортогональным составляющим (главным компонентам).

В то же время преобразование $y_j = X p_j$ является линейным преобразованием исходного процесса с помощью дискретного преобразования свертки, т. е.

$$y_j[l] = \sum_{q=1}^M x_{lq} p_{jq} = \sum_{q=1}^M x_{l+q-1} p_{jq}. \quad (9)$$

Алгоритм порождает набор линейных фильтров, настроенных на составляющие исходного процесса. Собственные векторы матрицы V выступают в роли переходных функций соответствующих фильтров.

Визуальное и аналитическое изучение собственных векторов и главных компонент, полученных в результате линейной фильтрации, дает информацию о структуре изучаемого процесса и его свойствах.

Для получения визуальной информации используется построение фазовых диаграмм, когда по осям x и y укладываются различные пары собственных векторов или главных компонент. Из ортогональности собственных векторов и главных компонент следует, что сдвиг фаз между такими парами равен $\pm\pi/2$.

4. *Восстановление одномерного ряда.* Процедура восстановления основана на разложении $X = YP^T$.

Восстановление проводится по главным компонентам, если при применении формулы $X = Y^* \cdot P$ матрица Y^* получена из матрицы Y обнулением всех, не входящих в набор компонент. Таким образом, мы можем получить интересующее нас приближение матрицы ряда или интерпретируемую часть этой матрицы.

Результаты и обсуждение

В процессе проведения вычислительного эксперимента при использовании метода задержанной координаты и метода сингулярного спектрального анализа получены параметры выходных последовательностей разработанного нами алгоритма шифрования, алгоритмов AES и DES. На рис.1 приведены графики зависимости корреляционной размерности d и энтропии Колмогорова K входных и выходных последовательностей (полученных путем зашифрования произвольного фрагмента открытого текста) от количества раундов базового преобразования n при использовании разработанного алгоритма шифрования и алгоритма AES в режиме работы CBC (сцепление блоков шифра).

Использование информационных параметров (корреляционной размерности и энтропии Колмогорова) позволяет выявить отличия в выходной последовательности алгоритма шифрования относительно входной. В частности, в режиме работы CBC, значения корреляционной размерности для выходной последовательности превышают значения для входной последовательности на 4,0–4,6 %, а значения энтропии Колмогорова для выходной последовательности составляют, соответственно, 20,0–21,8 % от значений для входной.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 1, в режиме CBC, для исследованного интервала значений количества раундов базового преобразования (1–32 раунда) выходные последовательности, полученные разработанным алгоритмом шифрования, демонстрируют

более высокую степень хаотичности, чем выходные последовательности, полученные алгоритмом шифрования AES.

Использование указанных информационных параметров также позволяет выявить участки детерминированности в выходных последовательностях, которые могут быть образованы при нехаотическом поведении элементов алгоритма шифрования, что не может быть выявлено при анализе показателей Ляпунова. В частности, поведение логистического отображения в алгоритме шифрования, описанном в работе [6], при определенных значениях управляющего параметра попадает в область с детерминированной динамикой, что делает данный алгоритм уязвимым к атакам на основе известного открытого текста [6]. Значения корреляционной размерности и энтропии Колмогорова для соответствующих выходных последовательностей будут существенно отличаться от таковых при наличии динамического хаоса.

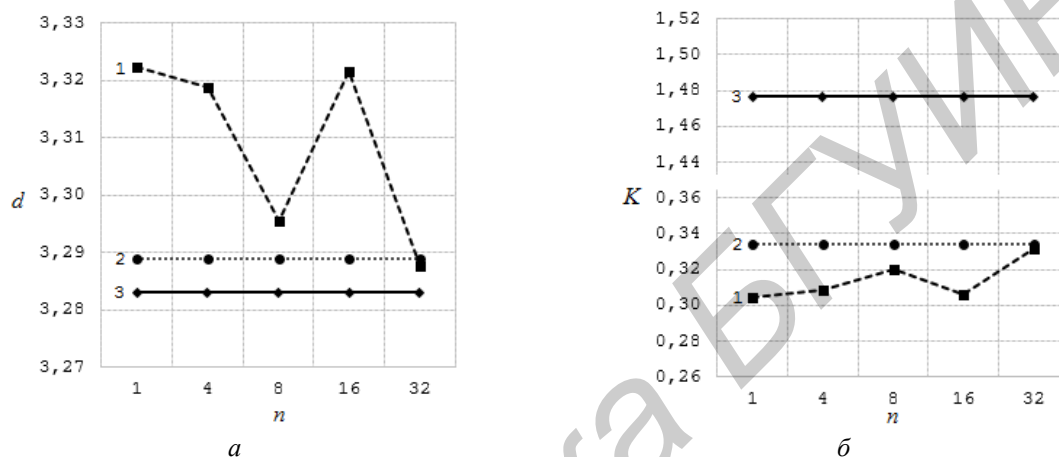


Рис. 1. Графики зависимости значения корреляционной размерности d (а), энтропии Колмогорова K (б) выходных последовательностей алгоритма шифрования с использованием динамического хаоса (кривая 1), алгоритмом AES (кривая 2), а также входных последовательностей (кривая 3) от количества раундов n базового преобразования в режиме работы CBC

На рис. 2 изображены фазовые портреты открытого текста и соответствующих зашифрованных последовательностей, полученных разработанным алгоритмом шифрования и алгоритмом AES. Количество раундов базового преобразования разработанного алгоритма равняется 16, а для AES – 14.

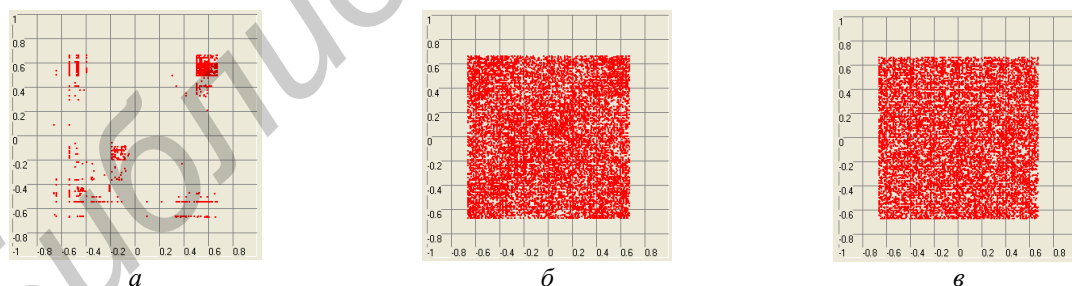


Рис. 2. Фазовые портреты входной (открытого текста) (а) и выходных последовательностей, полученных разработанным алгоритмом шифрования (б) и алгоритмом AES (в), в режиме CBC

Полученные методом задержанной координаты и построением фазовых портретов входных (открытого текста) и выходных (зашифрованных) последовательностей результаты позволяют заключить, что: корреляционная размерность, энтропия Колмогорова могут быть использованы в качестве параметров определения степени хаотичности выходных последовательностей, а фазовые портреты – для визуального анализа при применении алгоритма шифрования с использованием динамического хаоса.

При использовании второго из подходов определения хаотичности, основанного на методе сингулярного спектрального анализа, в процессе исследований проводилась оценка количественного параметра – уровня главных компонент I входных последовательностей,

выходных последовательностей разработанного нами алгоритма шифрования с использованием динамического хаоса, алгоритмов AES, алгоритма DES. Для анализа визуальной информации применяется построение фазовых диаграмм, когда по осям x и y откладываются различные пары собственных векторов или главных компонент. В таблице приведены результаты вычислительного эксперимента при следующих условиях: длина анализируемых последовательностей $N=10000$, длина гусеницы $M=1000$, число итераций изменялось $z=8$, $z=64$.

Уровень главных компонент I , входных последовательностей (1), выходных последовательностей разработанного алгоритма шифрования с использованием динамического хаоса при числе итераций $z=8$ (2), $z=64$ (3), алгоритмов DES (4) и AES (5) в режиме CBC

Номер главной компоненты	1000	999	998	997	996	995	994	993
1	0,3530	0,3530	0,3036	0,3035	0,2989	0,2979	0,2934	0,2934
2	0,2203	0,2202	0,2122	0,2118	0,2081	0,2080	0,2028	0,2027
3	0,226	0,2258	0,2250	0,2250	0,2109	0,2108	0,2015	0,2014
4	0,1899	0,1893	0,1880	0,1879	0,1841	0,1840	0,1821	0,1820
5	0,2287	0,2287	0,2179	0,2177	0,2135	0,2134	0,2083	0,2081

Как видно из таблицы, для входных последовательностей (1) уровень главных компонент I превышает значения для показателей исследуемых выходных последовательностей (2–5) более чем на 50%. Сравнительный анализ показывает, что для выходных последовательностей разработанного алгоритма шифрования с использованием динамического хаоса уровень главных компонент I практически совпадает с показателями алгоритмов шифрования AES и DES в режиме CBC. Фазовые диаграммы пар собственных векторов с номерами 1000 и 999, 1000 и 998 для входных последовательностей, выходных последовательностей разработанного алгоритма (число итераций $z=8$) и алгоритма AES приведены на рис. 3.

открытый текст

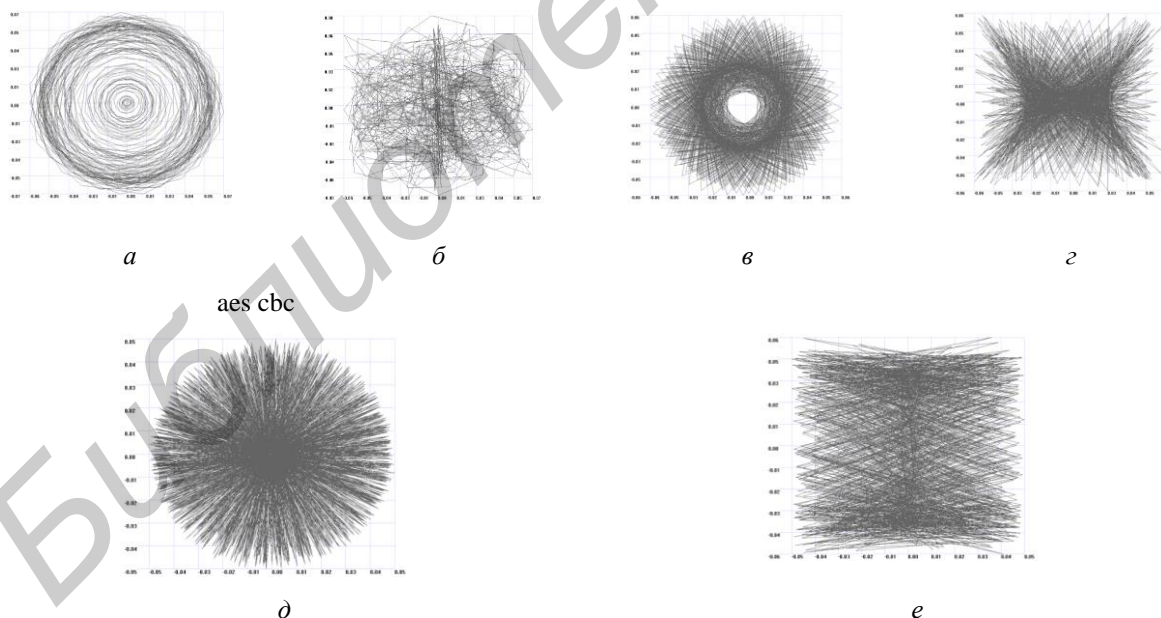


Рис. 3. Фазовые диаграммы пар собственных векторов с номерами 1000 и 999, 1000 и 998: для входных последовательностей (а) и (б); выходных последовательностей разработанного алгоритма с использованием динамического хаоса при числе итераций $z=8$ (в) и (г), выходных последовательностей алгоритма AES (д) и (е) при анализе последовательностей методом сингулярного спектрального анализа

Для фазовых диаграмм выходных последовательностей разработанного алгоритма шифрования и шифра AES (aes cbc) (рис. 3, д, е) характерным, в отличие от диаграмм открытого текста (рис. 3, а, б), является наличие «зашумленности» фигур.

Таким образом, использование метода сингулярного спектрального анализа применительно к входным последовательностям, а также к выходным последовательностям алгоритма шифрования с использованием динамического хаоса, например, в режиме СВС, позволяет установить качественные критерии в виде фазовых диаграмм, а также количественный критерий по уровню главных компонент для определения хаотичности последовательностей алгоритмов шифрования.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что для контроля хаотичности выходных последовательностей алгоритмов шифрования с использованием хаотических сигналов могут быть использованы метод задержанной координаты и метод сингулярного спектрального анализа. Показано, что такие параметры, как корреляционная размерность, энтропия Колмогорова метода задержанной координаты, могут быть использованы в качестве критериев определения степени хаотичности выходных последовательностей, а фазовые портреты – для визуального анализа при применении алгоритма шифрования с использованием хаотических сигналов. Параметр уровня главных компонент метода сингулярного спектрального анализа и фазовые диаграммы рекомендуется применять как средства для определения хаотичности выходных последовательностей алгоритма шифрования с использованием хаотических сигналов.

Сравнительный анализ параметров методов задержанной координаты и сингулярного спектрального анализа входных и выходных последовательностей алгоритмов шифрования с использованием хаотических сигналов, DES и AES показал значимые отличия в параметрах входных и выходных последовательностей; практическое совпадение по уровню главных компонент в режиме СВС; улучшение параметров корреляционной размерности и энтропии Колмогорова для алгоритма шифрования с использованием динамического хаоса, что, в целом, может служить основанием для рекомендаций к использованию указанных методов при разработке требований к обеспечению информационной безопасности.

THE CONTROL OF THE CHAOTIC REGIMES IN ENCRYPTION ALGORITHM BASED ON DYNAMIC CHAOS

A.V. SIDORENKO

Abstract

The paper presents two approaches to control of chaotic regimes in encryption algorithm based on dynamic chaos by delayed coordinate methods and singular spectral analyzing methods. The comparative analysis of the parameters for the input and output sets used in encryption algorithms based on a dynamic chaos with standard AES, DES ciphers was performed. It was shown that the parameters characterizing the output sets for the encryption algorithm based on dynamic chaos are not bad relative to those the standard ciphers.

Список литературы

1. Алферов А.П., Зубов А.Ю., Кузьмин А.С. и др. Основы криптографии. М., 2005.
2. Cuomo R.M., Oppenheim A.V. // Phys. Rev. Let. 1993. P. 65–68.
3. Dmitriev A.A., Dmitriev A.S., Andreev Y.V. // Applications of Chaos and Nonlinear Dynamics in Science and Engineering. 2013. Vol. 3.
4. Птицын Н. Приложение теории детерминированного хаоса в криптографии. М., 2002.
5. Анищенко В.С. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. М., 2003.
6. Alvares G., Montoya F., Romera M. // Phys. Lat. A. 2003. Vol. 319. P. 334–339.
7. Pastor G.A., Romera M., Montoya F. // Physica. 1997. Vol. 107. P. 17–22.
8. Сидоренко А.В., Мулярчик К.С. // Докл. БГУИР. 2013. № 1. С. 62–67.
9. Сидоренко А.В. Информационные аспекты нелинейной динамики. Минск, 2008.
10. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Под ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского. СПб, 1997.

УДК 621.391.7:512.772

КРИПТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОДОВЫХ СТРУКТУР КРИВОЙ ЭРМИТА НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

В.В. ПАНЬКОВА, С.Б. САЛОМАТИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 16 октября 2013

Построение систем защиты информации на базе алгебро-геометрических кодов возможно с применением различных алгебраических структур, обладающих криптографической стойкостью. Приведены результаты исследования свойства кодовых последовательностей, построенных на кривой Эрмита в поле $GF(16)$, проведено тестирование на предмет требований, предъявляемых к криптографическим преобразованиям. Криптографический анализ выполнен с использованием спектральных преобразований. Оцениваются такие показатели качества шифрованных последовательностей, как нелинейность, сбалансированность, линейная сложность.

Ключевые слова: алгебро-геометрический код, кривая Эрмита, криптографический анализ, нелинейность, сбалансированность, линейная сложность.

Введение

Безопасность информационных систем предполагает комплекс мероприятий по защите информации от несанкционированного доступа. В [1, 2] рассмотрены преимущества криптографической защиты, использующей в качестве помехоустойчивых кодов алгебро-геометрические. Первоначально конструкции кодов, основанных на методах алгебраической геометрии, были предложены В. Д. Гоппой. В дальнейшем найдены и другие способы алгебро-геометрического кодирования, позволяющие строить с помощью специальных кривых длинные недвоичные блочные коды, обладающие асимптотически хорошими параметрами [3, 4]. Кодовые структуры, используемые как компоненты систем защиты информации, должны обладать стойкостью к вскрытию, а значит, удовлетворять требованиям, предъявляемым к криптографическим алгоритмам. Оценка свойств шифрующей последовательности позволяет выявить возможный дисбаланс в способе ее формирования и оценить приемлемость с точки зрения устойчивости к криптоанализу. Методы анализа криптографических систем с использованием теории дискретных функций рассмотрены в [5]. Построение систем защиты информации на базе алгебро-геометрических кодов возможно с применением различных алгебраических структур, обладающих криптографической стойкостью. В статье исследуются свойства кодовых последовательностей, построенных на кривой Эрмита, проводится их тестирование на предмет требований, предъявляемых к криптографическим преобразованиям.

Моделирование кодовых структур кривой Эрмита

Алгебро-геометрические коды определяются алгебраическими кривыми над конечными полями. Кривой на аффинной плоскости $\chi_f(F)$, заданной многочленом $f(x, y) = 0$ с коэффициентами из поля F , называют множество точек аффинного пространства $(x, y) \in A^2(F)$, включая точки на бесконечности. Кривая Эрмита задается уравнением $x^{r+1} - y^r - y = 0$ над конечным полем $GF(q)$, где r – степень простого числа и $q = r^2$. Эта

кривая является регулярной и содержит $N=r^3$ рациональных точек. Геном g регулярной кривой, заданной многочленом степени m , можно определить как $g = (m-1) \cdot (m-2)/2$.

Пусть P_1, P_2, \dots, P_n – рациональные точки кривой Эрмита, j – натуральное число, для которого $m-2 \leq j \leq \left\lfloor \frac{n-1}{m} \right\rfloor$, $\varphi_0(x, y), \varphi_1(x, y), \dots, \varphi_\mu(x, y)$ – одночлены $x^a y^b$, упорядоченные относительно порядка общей степени (\leq_T), где $(1,0) <_T (0,1)$, так что $(a,b) \leq_T (0,j)$. Все расчеты проводятся по модулю многочлена, задающего кривую, так что все многочлены могут быть представлены базисом, заданным множеством одночленов $\Phi = \{x^a y^b \mid 0 \leq a \leq q, 0 \leq b \leq j\}$. В соответствии с [6], код $C^*(j)$, заданный матрицей

$$\begin{pmatrix} \varphi_0(P_1) & \dots & \varphi_0(P_n) \\ \varphi_1(P_1) & \dots & \varphi_1(P_n) \\ \dots & \dots & \dots \\ \varphi_\mu(P_1) & \dots & \varphi_\mu(P_n) \end{pmatrix},$$

имеет параметры $k = n - (mj - g + 1)$ и $d_{\min} \geq d^* = mj - 2g + 2$, где d^* – конструктивное расстояние кода. Уникальность генераторной матрицы кода определена набором точек P_1, P_2, \dots, P_n , в которых вычисляются значения генераторных функций (одночленов $x^a y^b$), смена которых, при заданных конструктивных характеристиках кода (n, k, d) , приводит к изменению структуры кодового слова.

Исследуемые конструкции алгебро-геометрического кода образованы кривой Эрмита, которая задается уравнением $f = y^4 + y - x^5$ и в поле $GF(16)$ содержит 64 рациональные точки. Кривая Эрмита и ее точки представлены на рис. 1.

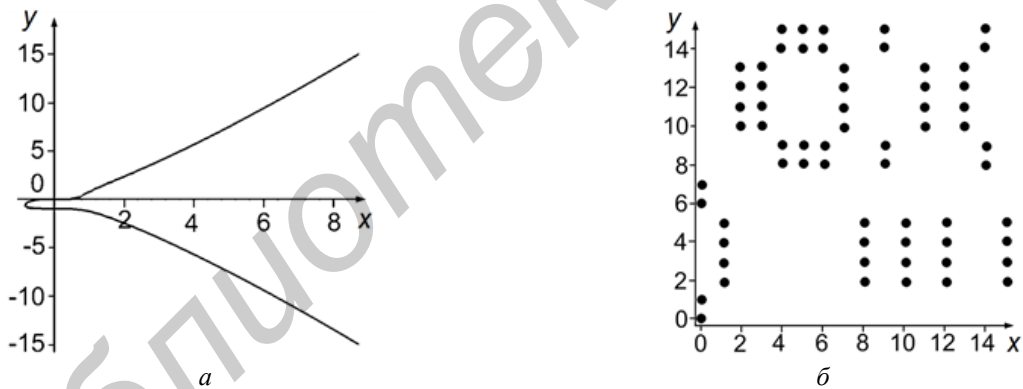


Рис. 1. Кривая Эрмита в поле $GF(16)$ (а) и ее точки (б)

Исследуются кодовые конструкции $C^*(j)$, заданные базисом генераторных функций $x^a y^b$:

- 1) $C^*(10)$, $(64, 19, 40)$, $a + b \leq 6$;
- 2) $C^*(10)$, $(64, 19, 40)$, $a + b \leq 10$;
- 3) $C^*(7)$, $(64, 30, 25)$, $a + b \leq 10$;
- 4) $C^*(5)$, $(64, 44, 15)$, $a + b \leq 10$;
- 5) $C^*(5)$, $(64, 44, 15)$, $a + b \leq 14$.

Анализ криптографических свойств кодовых структур проводится на основе выборки из $i = 100$ сформированных случайным образом шифропоследовательностей каждой кодовой конструкции, полученных как произведение информационного вектора-строки на порождающую матрицу.

Исследование свойств кодированных последовательностей кривой Эрмита

Одним из основных критериев, предъявляемых к разработке и исследованию эффективности криптографических алгоритмов, является такой показатель, как нелинейность преобразований. В качестве основного аппарата анализа и изучения особенностей критериев используется спектральное преобразование Уолша БФ (булевой функции)

$$W_f(\omega) = \sum_{x \in GF(2)^t} f(x) \cdot (-1)^{\langle x, \omega \rangle}, \text{ где } f(x) \text{ – БФ двоичных переменных; } x = (x_1, x_2, \dots, x_t),$$

$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_t)$ – наборы длиной t над полем $GF(2)$; $\langle x, \omega \rangle = \sum_{i=1}^t x_i \omega_i$ – скалярное произведение наборов.

Спектральное преобразование Уолша СФ (сопряженной функции) $\tilde{f}(x)$:

$$W_{\tilde{f}}(\omega) = \sum_{x \in GF(2)^t} (-1)^{f(x) + \langle x, \omega \rangle}.$$

Нелинейность БФ, реализующих некоторое преобразование, показывает степень удаленности БФ от множества аффинных или линейных БФ. В терминах спектрального преобразования значение нелинейности оценивается как

$$N_f = 2^{t-1} - \frac{1}{2} \max_{\omega \in GF(2)^t} |W_f(\omega)|. \quad (1)$$

Для оценки нелинейности БФ следует определить максимальное значение компонент спектра Уолша-Адамара [5]. Верхняя граница значения нелинейности определяется выражением

$$N_f \leq \lfloor 2^{t-1} - 2^{t/2-1} \rfloor. \quad (2)$$

Спектральные преобразования позволяют оценить сбалансированность криптографической функции. Для противодействия прямым статистическим атакам на криптоалгоритмы необходимо, чтобы все компоненты БФ, реализующие преобразование, были сбалансированы, а преобразование в целом носило регулярный характер. Количество единиц в таблице истинности сбалансированной БФ равно количеству нулей [5]. В терминах преобразования Уолша-Адамара сбалансированность эквивалентна выполнению условий $W_f(\omega) = 0$, $W_f(\omega) = 2^{t-1}$, где $\omega = (0, \dots, 0)$. Степень отклонения БФ от сбалансированности определяет значение спектра Уолша-Адамара в точке "0" [5].

Исследование таких критериев как уровень нелинейности и сбалансированность основано на формировании спектра Уолша-Адамара для каждой кодированной последовательности (рис. 2.).

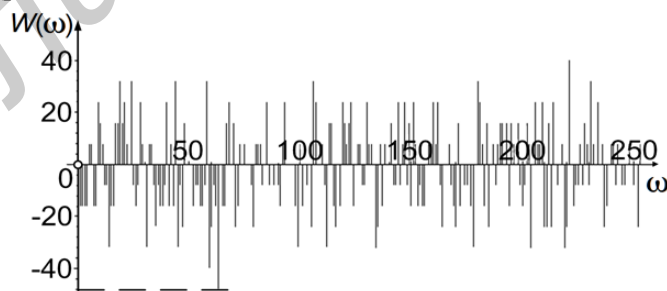


Рис. 2. Спектр Уолша-Адамара кодированной последовательности

Оценка уровня нелинейности использует максимальное значение компонент спектра (рис. 3.), полученных для всех последовательностей каждого исследуемого кода. В соответствии с формулой (1) лучшие показатели уровня нелинейности имеют вектора с меньшим значением максимальной компоненты спектра. Все шифропоследовательности отличается высокий уровень нелинейности (92...110) при верхней границе равной 120, согласно (2). Основная часть кодированных последовательностей расположена в диапазоне от 102 до 108. В табл. 1 приведены полученные при моделировании данные о величине максимальных компонент и соответствующем уровне нелинейности основной части шифропоследовательностей.

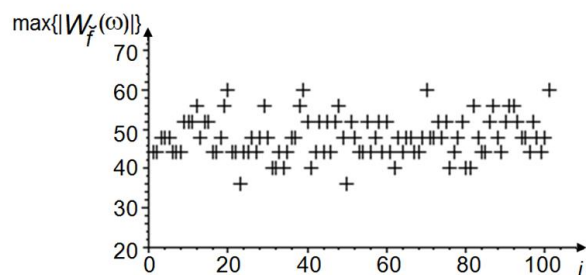


Рис. 3. Значения максимальных компонент спектра Уолша-Адамара кода $C^*(7)$

Таблица 1. Показатели уровня нелинейности шифрованных последовательностей

N_f	$\max\{ W_f(\omega) \}$	Количество шифропоследовательностей кода, %				
		$C^*(10)$ (64,19,40) $a+b \leq 6$	$C^*(10)$ (64,19,40) $a+b \leq 10$	$C^*(7)$ (64,30,25) $a+b \leq 10$	$C^*(5)$ (64,44,15) $a+b \leq 10$	$C^*(5)$ (64,44,15) $a+b \leq 14$
108	40	6	6	9	8	11
106	44	22	21	31	25	26
104	48	29	33	27	28	30
102	52	23	24	20	17	19

Уровень нелинейности кодированных последовательностей выше, если конструктивно они образованы кодами с большей скоростью и генераторными функциями более высоких степеней. Каждый код в своем составе имеет вектора с уровнем нелинейности ниже среднего, т.е. последовательности с диапазоном нелинейности от 100 до 92. При использовании кодов в криптосистемах, в зависимости от конкретных задач, вектора, не удовлетворяющие требованиям к уровню нелинейности, могут отбраковываться как слабые. В целом отмечен высокий уровень нелинейности, что характеризует высокую степень удаленности последовательностей от линейных, а значит, высокую степень устойчивости к линейному криптоанализу при их использовании в криптосистемах.

Оценка сбалансированности использует значение нулевой компоненты спектра. Нулевая компонента сбалансированной шифропоследовательности равна «0», любое другое значение определяет степень отклонения функции от сбалансированности (рис. 4.).

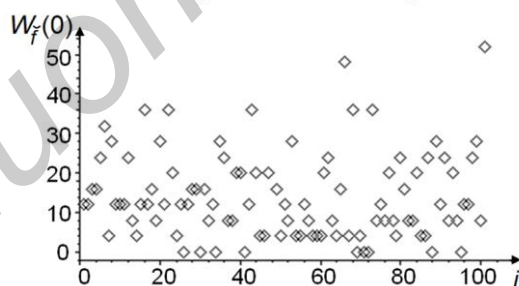


Рис. 4. Значения нулевых компонент спектра Уолша-Адамара кода $C^*(7)$

Полученные при моделировании данные о нулевых компонентах исследуемых кодовых структур занесены в табл. 2.

Таблица 2. Показатели сбалансированности шифрованных последовательностей

Количество кодовых слов с нулевой компонентой спектра $W_f(0) = 0$	Исследуемые кодовые структуры				
	$C^*(10)$ (64,19,40) $a+b \leq 6$	$C^*(10)$ (64,19,40) $a+b \leq 10$	$C^*(7)$ (64,30,25) $a+b \leq 10$	$C^*(5)$ (64,44,15) $a+b \leq 10$	$C^*(5)$ (64,44,15) $a+b \leq 14$
%	8	8	9	8	7

Из 100 кодовых структур каждого исследуемого кода только для 7–9 % выполнено свойство сбалансированности, т.е. менее десятой части векторов имеет нулевую компоненту

спектра равную «0». Можно заключить, что в общем случае свойство сбалансированности не выполнено, а это означает слабость в противодействии прямым статистическим атакам на криптографические преобразования, если не выполнено добалансирование векторов.

Линейную сложность шифрующей последовательности можно оценить с помощью алгоритма Берлекемпа-Мессис (БМ). Под линейной сложностью последовательности понимают длину самого короткого регистра сдвига с линейной обратной связью (РСЛОС), способного породить эту последовательность. Любая последовательность, сформированная конечным аппаратом над конечным полем, имеет конечную линейную сложность. С помощью алгоритма БМ можно воссоздать РСЛОС. Алгоритм БМ позволяет вычислить профиль линейной сложности, который определяет линейную сложность $Ls(x)$ последовательности по мере ее удлинения. Используя значения ее уровней для 100 векторов каждого исследуемого кода, можем оценить линейную сложность криптопоследовательностей (рис. 5.).

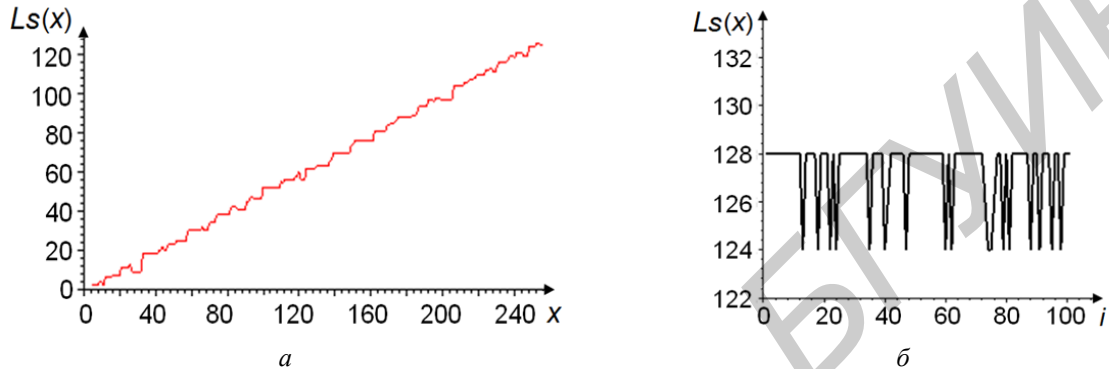


Рис. 5. Профиль линейной сложности кодированной последовательности (а) и уровень линейной сложности кода $C^*(7)$ (б)

Графики профилей исследуемых кодовых структур носят линейную зависимость, а линейная сложность меняется в пределах 120...132 со средним значением уровня равным 128. Результаты моделирования сведены в табл. 3.

Таблица 3. Линейная сложность шифрованных последовательностей

Значения уровней линейной сложности $Ls(x)$	Исследуемые кодовые структуры				
		$C^*(10)$ (64,19,40) $a+b \leq 6$	$C^*(10)$ (64,19,40) $a+b \leq 10$	$C^*(7)$ (64,30,25) $a+b \leq 10$	$C^*(5)$ (64,44,15) $a+b \leq 10$
	124–132	124–132	124–128	120–128	124–132

Каждая бинарная последовательность имеет высокую степень линейной сложности и может быть сформирована с помощью РСЛОС с полиномом обратной связи степени не меньше 120. На рис. 6 приведен усредненный профиль линейной сложности последовательности АГ-кода, который, как видно, совпадает с последовательностью *BBS* [5], тестовой для *NIST*.

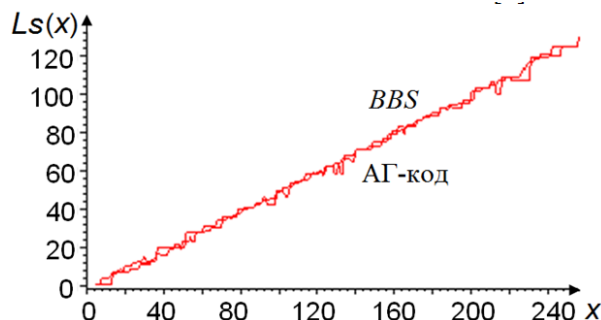


Рис. 6. Усредненный профиль линейной сложности АГ-кода и *BBS*

Высокая степень линейной сложности означает, что криптосистемы, использующие подобные шифропоследовательности, устойчивы к вскрытию, и криптоаналитик не может предсказать ни следующий, ни предыдущий бит последовательности.

Заключение

Криптографический анализ исследуемых кодовых структур кривой Эрмита в поле $GF(16)$ выполнен с использованием спектральных преобразований. Оценены такие показатели качества шифрованных последовательностей, как нелинейность, сбалансированность, линейная сложность. Высокий уровень нелинейности предполагает высокую степень устойчивости к линейному криптоанализу и приемлемость применения подобных структур в криптосистемах. В общем случае свойство сбалансированности остается не выполненным, а значит, возможность противодействия прямым статистическим атакам требует добалансировки криптографических преобразований. Высокая степень линейной сложности и близость к криптографическим стандартам *BBS* и *AES* означает устойчивость к вскрытию и возможность применения таких криптографических алгоритмов в системах защиты информации.

CRYPTOGRAPHIC ANALYSIS OF THE CODE STRUCTURES OF HERMITE CURVE FOR COMPLIANCE WITH THE REQUIREMENTS OF INFORMATION SECURITY SYSTEMS

V.V. PANKOVA, S.B. SALOMATIN

Abstract

Building security systems based on the algebraic-geometric codes is possible with the use of various algebraic structures with cryptographic security. This paper investigates the properties of the code sequences, built on the Hermite curve in the field $GF(16)$, their testing on the subject of the requirements for cryptographic transformations was conducted. Cryptographic analysis is performed using spectral transformations. Encrypted sequences quality metrics such as nonlinearity, balance, linear complexity are evaluated.

Список литературы

1. *Грабчак В.И., Мельник А.П.* // Вісник СумДУ. Сер. технічні науки. 2009. № 4. С. 94–100.
2. *Онанченко Е.Л.* // Системи обробки інформації. 2007. № 7. С. 53–58.
3. *Влэдуц С.Г., Ногин Д.Ю., Цфасман М.А.* Алгебро-геометрические коды. Основные понятия. М., 2003.
4. *Niebuhr R.* Application of algebraic-geometric codes in cryptography. Darmstadt, 2006.
5. *Саломатин С.Б.* Поточные криптосистемы. Минск, 2006.
6. *Justesen J., Larsen K., Havemose A. et al* // *IEEE Transactions Information Theory*. July 1989. P. 811–821.

УДК 004.272 : 004.414

ПОСТРОЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ

К.С. КУРОЧКА, О.Д. АСЕНЧИК, Е.Г. СТАРОДУБЦЕВ

*Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого
пр. Октября, 48, Гомель, 246746, Беларусь*

Поступила в редакцию 5 октября 2013

Приведены результаты разработки и исследования созданного на основе свободно распространяемого программного обеспечения высокопроизводительного программно-аппаратного вычислительного комплекса для моделирования распределения электромагнитных полей в ближней зоне металлических и диэлектрических наночастиц. В качестве сравнения приведены примеры расчета аналитического и численного значения полей вблизи сферических наночастиц.

Ключевые слова: распределенные вычисления, математическое моделирование, электромагнитное поле.

Введение

Для решения задач расчета распределения электромагнитного поля оптического диапазона в ближней и дальней зонах наночастиц предложено и используется немало различных аналитических и численных методов [1–3]. Особую вычислительную трудность вызывает расчет трехмерного распределения поля в ближней зоне металлических наночастиц на частотах, близких к частотам плазмонного резонанса [3]. Большие градиенты диэлектрической проницаемости, электрического и магнитного полей вблизи границ частиц, необходимость точной аппроксимации формы частицы вблизи границы раздела требует выбора малого размера расчетного элемента. Это приводит к необходимости решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) значительных размерностей [4–6]. Если требуется решать задачу подбора оптимального параметра структуры, то решение СЛАУ требуется повторить многократно. Эффективное решение данной проблемы возможно посредством использования технологий организации распределенных вычислений и (или) параллельных вычислений, позволяющих уменьшить количество выполняемых операций на каждом вычислительном узле [7] и тем самым значительно снизить время нахождения решения.

Создаваемый программно аппаратный комплекс предназначен для компьютерного моделирования оптических свойств нанокompозитов и метаматериалов на основе наночастиц металлов с целью последующего получения структур с заданными функциональными характеристиками, перспективными для использования в качестве сенсорных элементов, преобразователей, усилителей излучения, управляющих оптических и оптоэлектронных элементов [8]. Исходя из этого, он должен поддерживать расчет распределений электромагнитных полей оптического диапазона: в ближней зоне внутри и вне диэлектрической и металлической однородных или неоднородных (магнитных и немагнитных) наночастиц произвольной формы; созданного одним или несколькими точечными источниками (диполями), вблизи наночастиц.

В качестве программного обеспечения для решения указанных задач было выбрано программное обеспечение с открытым исходным кодом МЕЕР [8, 9], реализующее универсальный метод – метод конечных разностей во временной области (FDTD) [6, 8, 9]. К достоинствам пакета МЕЕР можно отнести возможность эффективного моделирования распределения электромагнитных полей и наличие поддержки параллельных вычислений на базе интерфейса MPI (MPICH) [10].

Архитектура программно-аппаратного вычислительного комплекса

Доступ к создаваемой вычислительной среде необходимо было обеспечить с любых компьютерных устройств и из различных точек доступа. Для этих целей наиболее эффективным является использование современных Web-технологий на базе GRID-систем [11].

В качестве базового программного обеспечения организации автономного сегмента GRID-среды был выбран дистрибутив программного обеспечения промежуточного уровня Unicore [12]. Предлагаемая архитектура представлена на рис. 1. Вычислительный кластер реализован на базе технологии MPI под управлением ОС Ubuntu.

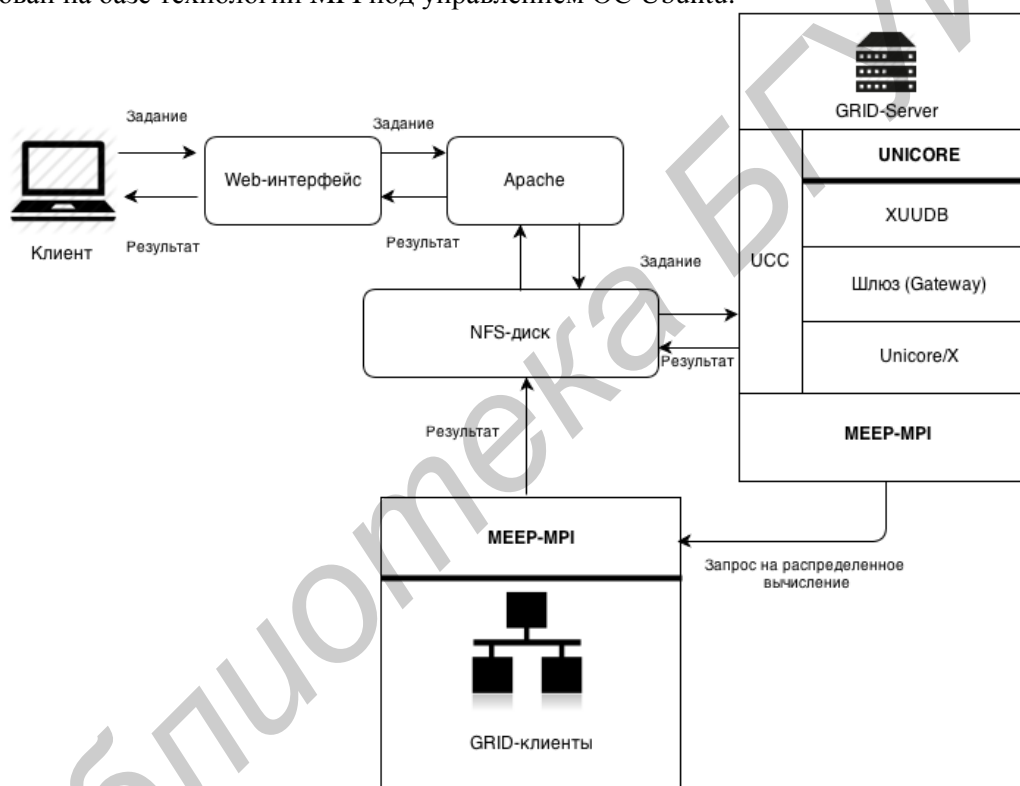


Рис. 1. Архитектура программно-аппаратного вычислительного комплекса

Web-интерфейс (рис. 1) реализует основные функции взаимодействия с пользователем (клиентом) и позволяет практически с любого устройства, поддерживающего доступ к Web-ресурсам по протоколу HTTPS, размещать свои задания для выполнения в вычислительной среде. Так же через Web-интерфейс осуществляется регистрация и авторизация пользователей. Для каждого пользователя на сервере создается отдельная домашняя папка, предназначенная для загрузки файлов заданий и хранения конечных результатов расчетов. Web-интерфейс самостоятельно генерирует скрипт инициализации и файл задания для UNICORE, а так же автоматически задает пути для хранения файлов. Имя выходного архива с результатами указывается пользователем вручную.

После получения и обработки задания UNICORE генерирует архив с результатом и помещает его в домашнюю папку пользователя, после чего пользователь может скачать архив с результатом через Web-интерфейс. Для реализации были использованы веб-сервер Apache и язык PHP для написания серверной части (реализация загрузки файлов заданий, а также мониторинг результатов). Сами страницы имеют простое оформление, созданное средствами HTML и CSS.

Техническая реализация архитектуры программно-аппаратного вычислительного комплекса

Реализация предлагаемой архитектуры программно-аппаратного вычислительного комплекса заключается в интеграции программы МЕЕР с распределенной вычислительной средой с одной стороны, и с Unicore Server – с другой. Т.о. выделяются две подзадачи:

- запуск МЕЕР в распределенной вычислительной среде;
- запуск МЕЕР из задания Unicore.

Для решения первой задачи используется распределенная версия пакета МЕЕР-MPI и интерфейс MPI MPICH. Поскольку работа в вычислительном кластере сопряжена с удаленным запуском пользовательских программ, назначение которых заранее не известно, имеется вероятность неправильного или злонамеренного использования доступа к системам. Все действия в кластере пользователи должны совершать только от имени специально созданной непривилегированной учетной записи.

MPICH использует удаленный доступ к узлам по протоколу SSH. Концепция безопасности SSH запрещает доступ к этому каталогу любых других пользователей кроме «владельца». Механизм авторизации по умолчанию предполагает ввод пароля учетной записи на удаленной системе, что крайне неудобно в случае большого количества процессов. Поэтому предлагается использовать авторизацию посредством RSA-ключей без пароля. Пара ключей создается от имени ранее созданной учетной записи.

Для запуска распределенной программы в кластере все его узлы должны иметь доступ к исполняемому файлу, а также, если того требует программа, к файлам со входными данными. Организовать совместный доступ всех узлов к общим файлам можно с помощью сетевой файловой системы (Network File System, NFS). Для этого в таблицу монтирования /etc/fstab добавляется соответствующая строка. Монтирование будет происходить автоматически при загрузке системы. При этом для хранения своих локальных данных каждый вычислительный узел имеет отдельный каталог.

Для запуска МЕЕР из задания Unicore используется командный интерпретатор Bash, в котором формируется скрипт. Генерирование скриптового файла с необходимыми параметрами осуществляет разработанный планировщик. Для того, чтобы отправить созданное задание, используется консольный клиент UCC (Unicore Commandline Client), который запускается на стороне WEB-сервера.

Вычислительный эксперимент на примере решения задачи о распределении ЭМП в ближней зоне металлической и диэлектрической сферических частиц

Для проверки адекватности и тестирования быстродействия вычислительного комплекса было выбрано две физических задачи о моделировании электромагнитного поля (ЭМП) вблизи сферической металлической и диэлектрической наночастицы (НЧ) радиусом $R = 40$ нм. НЧ находятся в воздухе ($\epsilon = 1$), их центры совпадают с центром декартовой системы координат. Возбуждение осуществлялось плоской, линейно поляризованной вдоль оси X волной с длиной волны 405 нм. Моделирование осуществлялось методом рассеянного поля [6] до момента времени установления стационарного распределения поля в расчетной области. Выбирались значения диэлектрической проницаемости материала металлической $\epsilon_{NP} = -3,5191 + 0,5798i$ (близкое к значению этой величины для серебра [13]) и диэлектрической наночастиц $\epsilon_{NP} = 3,5191 + 0,5798i$.

Для моделирования использовалась пространственная расчетная область в форме куба с ребром 240 нм. После установления стационарного распределения поля результаты моделирования практически не зависели от толщины согласующего слоя (Perfectly Matched Layer, PML [6, 9]) вокруг расчетной области с толщиной превышающей 10 нм. При верификации использовалось разрешение 600 точек на 1 мкм (около 1,67 нм) в направлениях всех координатных осей, а для тестирования быстродействия – 200 точек на 1 мкм.

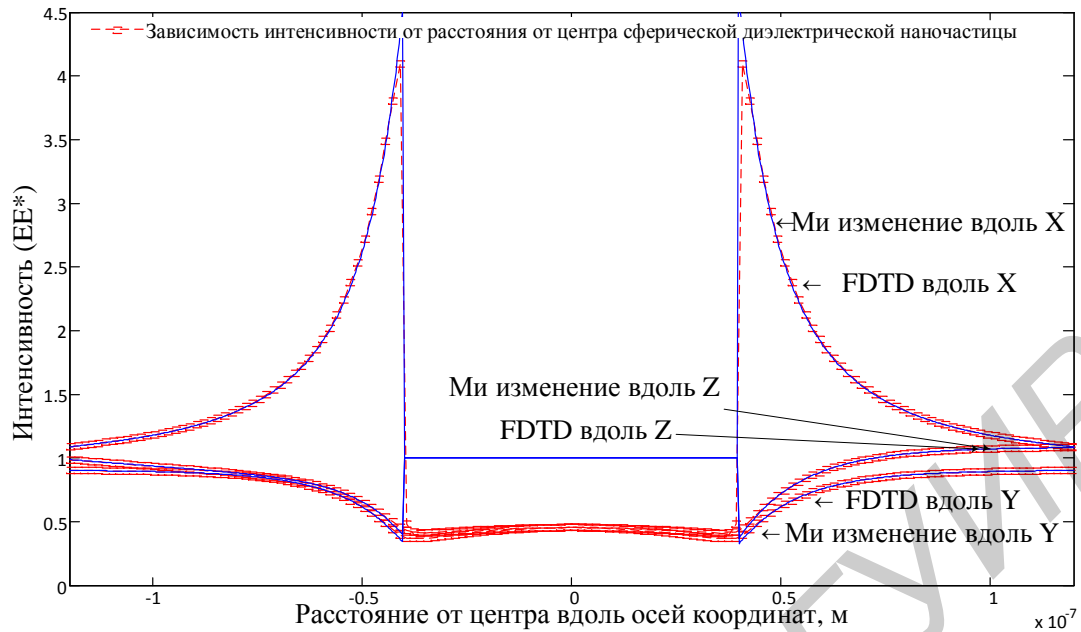


Рис. 2. Зависимость интенсивности электромагнитного поля от координат вблизи поглощающей диэлектрической сферической наночастицы

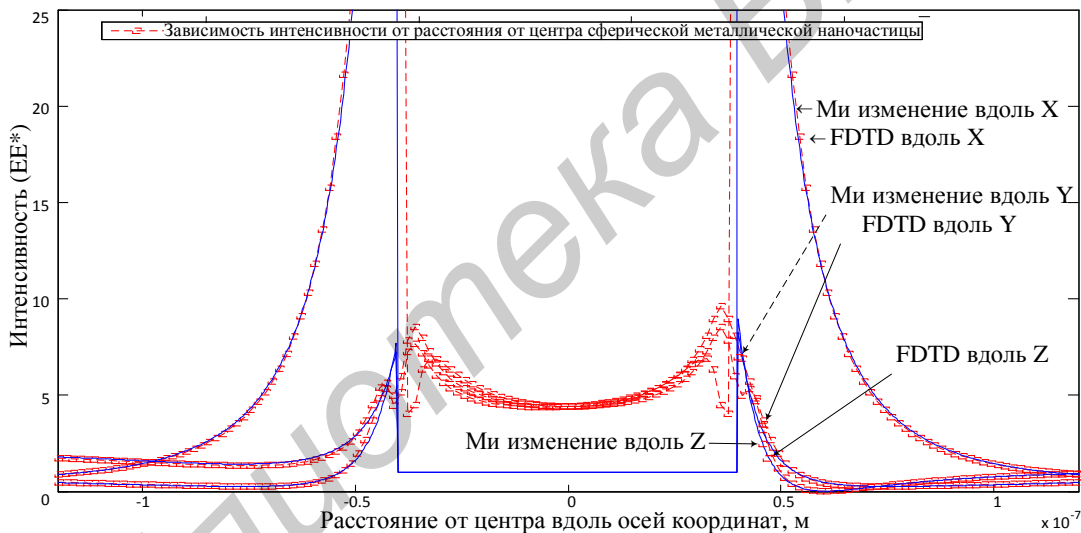


Рис. 3. Зависимость интенсивности электромагнитного поля от координат вблизи поглощающей сферической металлической наночастицы

Решение этой задачи может получено аналитически на основе теории Ми [14]. На рис. 2 и 3 приведены распределения квадрата амплитуды электрической составляющей электромагнитного поля вне трехмерных сферических металлической и диэлектрической наночастиц размером 40 нм, находящихся в воздухе в центре декартовой системы координат.

Тестирование быстродействия вычислительного комплекса осуществлялось при использовании различного оборудования. Изначально в качестве среды передачи данных была выбрана локальная вычислительная сеть на базе протокола 100baseTX [15] (рис. 4) и решались модельные задачи с разрешением 200 точек на 1 мкм. Из рис. 4 видно, что ускорение фактически происходит только для случая использования двух узлов, далее производительность кластера падает. Очевидно, что такая картина наблюдается из-за того, что время расчета сопоставимо со скоростью передачи данных по сети. Для увеличения производительности требуется модернизация среды передачи данных.

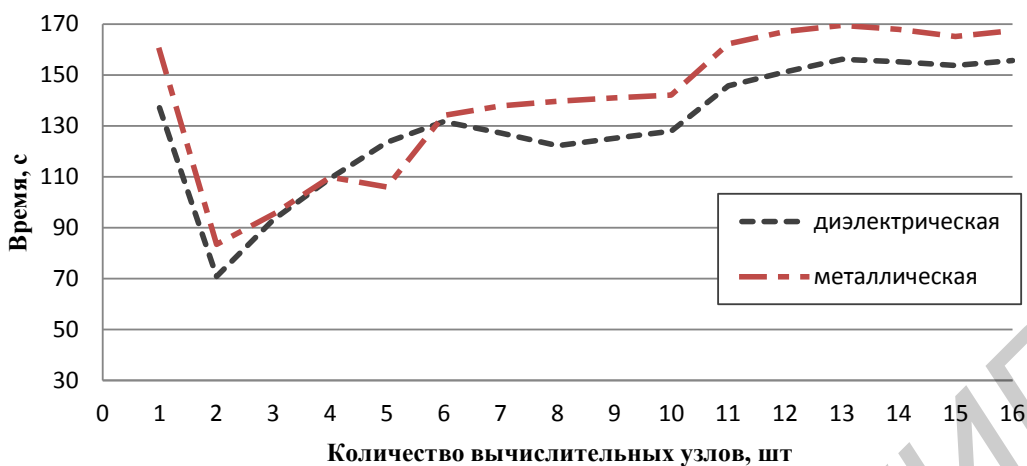


Рис. 4. Время решения модельных задач в кластере на базе сети 100baseTX

Модернизацию аппаратно-программного вычислительного комплекса можно осуществлять по трем основным направлениям. В первую очередь – это обеспечение минимального времени обработки каждого отдельного задания. Во вторую – реализация максимально эффективной загрузки вычислительных узлов. В третью – повышение производительности с точки зрения количества выполненных заданий за определенный временной интервал.

Первое направление может быть улучшено только за счет повышения и модернизации аппаратной части комплекса. Здесь можно выделить следующие ключевые элементы:

- среда передачи данных – локальная сеть – ограничена в росте имеющимся на рынке сетевых оборудованием и существующими стандартами построения сетевых систем;
- мощность ядра процессора отдельного вычислительного узла;
- объем оперативной памяти каждого вычислительного узла;
- количество используемых вычислительных узлов.

Как правило, увеличение производительности для решения отдельного задания приходится наращивать за счет повышения скорости среды передачи и увеличения количества узлов. Однако, как было показано ранее, увеличение количества узлов не всегда приводит к увеличению скорости выполнения задания.

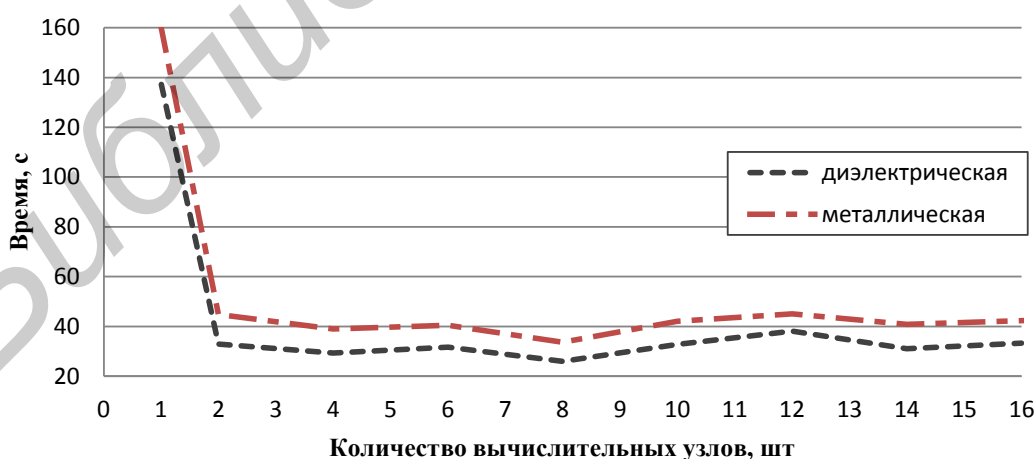


Рис. 5. Время решения модельных задач в кластере на базе сети 1000base-T

Второе направление в основном реализуется программными средствами – в частности, планировщиками заданий, эффективность которых зависит как от используемых алгоритмов планирования, так и от структуры заданий, находящихся в очереди обработки.

Третье направление может реализовываться совместно на аппаратном и программном уровнях. Для каждого задания в данной вычислительной среде существует эффективное число узлов, при котором добавление новых для решения задачи не приводит к уменьшению скорости обработки. Эффективное число узлов зависит как от самой задачи, так и от технических характеристик вычислительного узла. При реализации третьего направления необходимо обеспечить запуск всех заданий только на эффективном числе узлов, а остальные узлы использовать для запуска других заданий, что должен реализовать планировщик.

Осуществим модернизацию среды передачи данных до протокола 1000base-T [15] и проведем повторно вычислительный эксперимент (рис. 5). Анализируя рис. 4 и 5 видно, что эффективное число узлов возросло с 2 до 8, а минимальное время решения задачи уменьшилось с 93 секунд до 25 с.

Проведем вычислительный эксперимент при решении модельных задач с разрешением 500 точек на 1 мкм (рис. 6). Из рисунка следует, что с увеличением вычислительной сложности задания эффективное число узлов также возрастает.

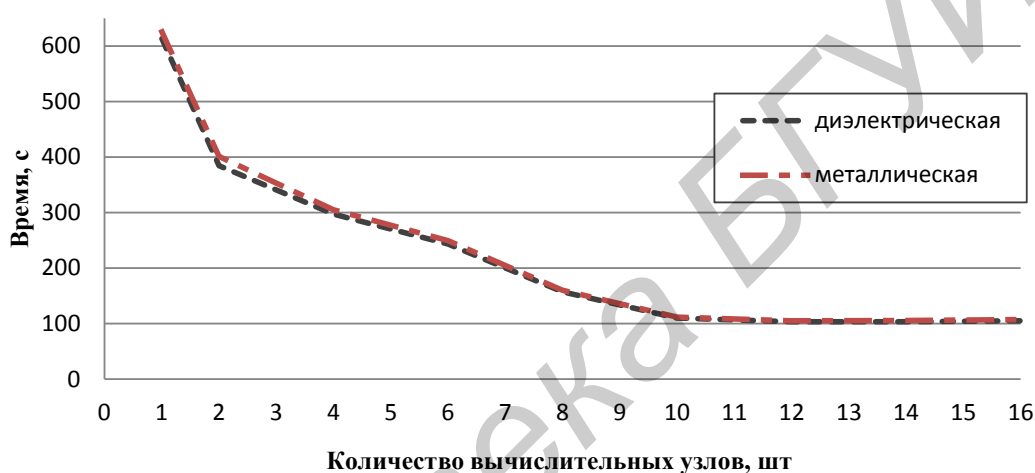


Рис. 6. Время решения модельных задач с разрешением 500 точек на 1 мкм

Заключение

В результате проделанной работы был создан программно-аппаратный комплекс для исследования распределения электромагнитного поля в ближней зоне сферических частиц, отличающийся:

- использованием свободно распространяемого программного обеспечения;
- быстрым развертыванием и низким требованием к аппаратному обеспечению;
- простотой использования и интеграции в существующие вычислительные системы и сети;
- возможностью легкого масштабирования и наращивания функций;
- повторяемостью и воспроизводимостью.

Вычислительные эксперименты показали, что для обеспечения максимальной производительности наиболее целесообразным является увеличение пропускной способности среды передачи данных и количества вычислительных узлов. Для наибольшей эффективности это стоит предпочесть увеличению вычислительной мощности отдельных узлов.

Предлагаемая методика создания программно-аппаратного комплекса позволяет легко консолидировать неиспользуемые вычислительные ресурсы для решения сложных вычислительных задач и может быть легко распространена на другие классы ресурсоемких задач.

Работа выполнена при поддержке программы ГКПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы» (задание 2.4.02) Республики Беларусь.

PROGRAM-SOFTWARE COMPLEX FOR CALCULATIONS OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD DISTRIBUTION IN THE NEAR FIELD OF DIELECTRIC AND METAL NANOPARTICLES

K.S. KURACHKA, O.D. ASENCHIK, E.G. STARODUBTSEV

Abstract

The results of research and development of high-performance hardware and software computer system for modeling the distribution of electromagnetic fields in the near field of metallic and dielectric nanoparticles of the analyzed. The complex is based on free software. The calculation results of the analytical and numerical values of electromagnetic fields in the vicinity of spherical nanoparticles are shown for comparison.

Список литературы

1. *Novotny L., Hecht B.* Principles of Nano-Optics. Cambridge, 2006.
2. *Климов В.В.* Наноплазмоника. Москва, 2010.
3. *Karamehmedovic M., Schuh R., Schmidt V. et. al.* // Opt. Exp. 2011. № 19. P. 8939–8953.
4. *Jianming J.* Theory And Computation Of Electromagnetic Fields. New York, 2010.
5. *Bossavit A.* Computational Electromagnetism: variational formulations, complementarity, edge elements. New York, 1997.
6. *Kunz K.S., Luebbers R.J.* The Finite difference time domain method for electromagnetics. London, 1993.
7. *Курочка К.С.* // Изв. ГГУ им. Ф. Скорины. 2008. № 5 (50). С. 69–73.
8. *Асенчик О.Д., Курочка К.С., Стародубцев Е.Г.* // Матер. III Междунар. научн. конф. «Проблемы взаимодействия излучения с веществом». Гомель, 9–11 ноября 2011. С. 173–178.
9. *Oskooi A.F., Roundy D., Ibanescu M.* // Computer Physics Communications. 2010. № 181. P. 687–702.
10. *Snir M., Otto S., Huss-Lederman S.* MPI: The Complete Reference. Massachusetts, 1996.
11. *Foster I., Kesselman C., Tuecke S.* // Int. J. of Supercomputer Applications. 2001. № 15. P. 200–222.
12. *Erwin D.* UNICORE Plus final Report — Uniform Interface to Computing Resources. Hamburg, 2003.
13. *Rakic A.D., Djuricic A.B., Elazar J.M.* // Applied Optics. 1998. Vol. 37. № 22. P. 5271–5283.
14. *Quinten M.* Optical Properties of Nanoparticle Systems: Mie and beyond. Germany, 2011.
15. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети: принципы, технологии, протоколы. СПб, 2008.

УДК 621.391, 621.384.3

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ВРЕМЯ ЗАДЕРЖКИ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ПРИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

С.Р. ГЕЙСТЕР, ЧАН ТАЙ ЧОНГ

Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь
Калиновского 4, Минск 220103, Беларусь

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 29 января 2014

Рассматривается математическая модель временной структуры отражений в приложении к гидроакустическому синтезу апертуры антенны. Модель обеспечивает разработку алгоритмов прямого синтеза апертуры антенны, позволяющих получить изображение поверхности дна с высоким разрешением в условиях ревербераций. Приведены оценки времени задержки, фазового сдвига и доплеровской частоты для различных точек на поверхности дна.

Ключевые слова: гидроакустика, временная структура, синтез апертуры антенны.

Введение

Повышение качества изображения дна и предметов на нем основано на повышении разрешающих способностей и, в первую очередь, в азимутальной плоскости. Наиболее распространенные подходы к повышению разрешающей способности в азимутальной плоскости связаны с увеличением размеров антенны и уменьшением длины волны зондирующего сигнала. Однако на практике размеры гидроакустических антенн ограничены, а уменьшение длины волны сопровождается существенным затуханием акустических волн при распространении [1]. Поэтому отмеченные подходы обеспечивают получение изображения дна (объектов) с высоким разрешением лишь на малых расстояниях (глубинах), ограниченных значением 300–500 метров. Ограничение дальности действия является не единственной проблемой гидролокаторов (ГЛ) построения изображения дна. Другой проблемой является защита от ревербераций, принимаемых по боковым лепесткам диаграммы направленности гидроакустической антенны в ходе перемещения ГЛ. Заметим, что уровень боковых лепестков гидроакустических антенн велик ($-20...-10$ дБ) по сравнению с антеннами радиолокационного диапазона, что, соответственно, выводит проблему защиты от ревербераций в ГЛ построения изображения дна на первое место.

Обозначенные проблемы сравнительно успешно могут быть решены [2] в ГЛ с синтезом апертуры антенны (САА). Основой успешной разработки алгоритмов САА в ГЛ является математическая модель отраженного сигнала, учитывающая особенности распространения гидроакустических волн, излучаемых и принимаемых антенной движущегося ГЛ.

Модель зондирующего сигнала

В ГЛ с синтезом апертуры антенны, обеспечивающем повышение углового разрешения за счет формирования большой апертуры вдоль линии перемещения, возникает возможность использования сравнительно невысоких несущих частот (например, $f_0 = 75$ кГц). Это

позволяет увеличить дальность действия ГЛ благодаря снижению потерь на трассе распространения.

Кроме того, увеличение дальности действия ГЛ традиционно связано с увеличением длительности импульса T_0 зондирующего сигнала (ЗС), что в совокупности с необходимостью обеспечения требуемой разрешающей способности по радиальной дальности $\Delta r = c_v / 2\Delta f_0$ диктует применение сложных законов внутриимпульсной модуляции, где c_v – скорость распространения звука в воде, а Δf_0 – ширина спектра закона модуляции ЗС.

Заметим, что в рассматриваемых ГЛ построения изображения дна значение Δf_0 определяет не только разрешающую способность по дальности Δr , но и разрешающую способность по прямоугольной координате на горизонтальной поверхности дна (координата Y), перпендикулярной линии движения носителя ГЛ. Эта разрешающая способность поясняется рисунком и определяется выражением:

$$\Delta y = \frac{\Delta r}{\sin \varepsilon}. \quad (1)$$

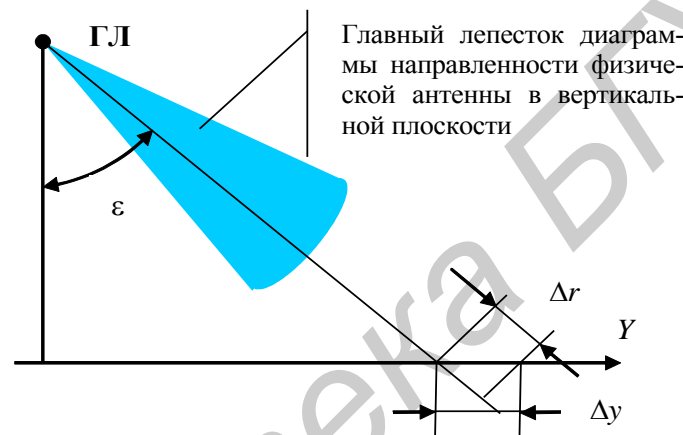


Рис. 1. Пояснения разрешающей способности

Размер синтезированной апертуры L_{SAA} напрямую определяется скоростью носителя ГЛ V_N и длительностью T_{KN} когерентной пачки сигналов, принятых в ходе синтеза апертуры, или временем синтеза апертуры антенны T_{SAA} :

$$L_{SAA} = V_N T_{SAA}. \quad (2)$$

Поэтому в ГЛ с САА необходимо использовать когерентные последовательности ЗС, временная модель которой на входе гидроакустической антенны описывается выражением

$$u_0(t) = \begin{cases} E_0 \sum_{n=1}^{N_T} U_0 [t - (n-1)T_r] e^{i(\omega_0 t + \varphi_0)}, & 0 \leq t \leq N_T T_r; \\ 0, & (t < 0) \vee (t > N_T T_r), \end{cases} \quad (3)$$

где E_0 , ω_0 , φ_0 – амплитуда, круговая частота и начальная фаза несущего колебания; $U_0(t)$ – закон модуляции одиночного ЗС; N_T – число одиночных ЗС в последовательности; T_r – период повторения ЗС.

Модель гидроакустического сигнала, отраженного от точечного объекта, при синтезе апертуры антенны

В основе сверхразрешения по азимуту (по прямоугольной координате, ориентированной вдоль линии перемещения ГЛ) при САА лежат различия в изменениях

радиальных дальностей элементов поверхности дна относительно фазового центра физической антенны движущегося ГЛ.

В приложении к САА зона обзора (зона построения изображения) разбивается на трехмерные блоки в прямоугольной системе координат X, Y, Z , причем ось OX ориентирована вдоль прямой линии перемещения фазового центра физической антенны ГЛ, а ось OZ ориентирована вертикально. В ходе интервала САА длительностью $T_{САА}$ строится один блок (см. рис. 2), имеющий размеры $X_{ОБЗ}, Y_{ОБЗ}, Z_{ОБЗ}$ и состоящий из разрешаемых объемов с размерами, соответствующими разрешающим способностям $\Delta x, \Delta y, \Delta z$. Количество элементов разрешения в блоке по соответствующим осям координат обозначим N_x, N_y, N_z . Произвольный разрешаемый объем в блоке обозначим номером (j, g, h) , причем $j = \overline{1; N_x}, g = \overline{1; N_y}, h = \overline{1; N_z}$. Носитель ГЛ перемещается прямолинейно со скоростью V_N , причем $x_N(t) = x_{0N} + V_N t$, а остальные его координаты неизменны ($y_N = 0, z_N = 0$).

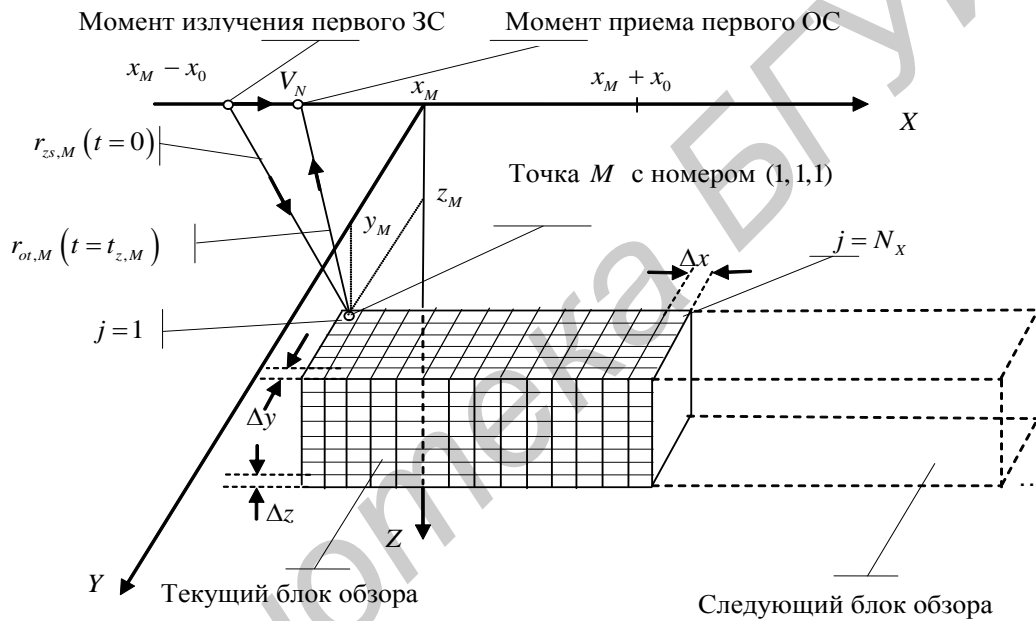


Рис. 2. Геометрическое представление САА в ГЛ

В качестве примера на рис. 2 обозначен разрешаемый объем с центром в точке M и номером $(1,1,1)$. Для этой точки САА выполняется при движении ГЛ в интервале $[x_M - x_0; x_M + x_0]$ по координате X с центром в точке с координатами (x_M, y_M, z_M) . Первый ЗС в начале САА для точки M излучается в момент времени $t = 0$. При этом радиальное расстояние между ГЛ и точкой M равно $r_{zs,M}(t = 0)$. Соответствующий отраженный сигнал проходит расстояние $r_{ot,M}(t = t_{z,M})$ от точки M до ГЛ и принимается в момент времени

$$t = t_{z,M} = \frac{r_{zs,M}(0) + r_{ot,M}(t_{z,M})}{c_v}.$$

Математическая модель сигнала, отраженного от (j, g, h) -го разрешаемого объема в текущем блоке обзора, описывается [3, 4] выражением:

$$u_{s,(j,g,h)}(t) = \sum_{n=1}^{N_r} E_{s,(j,g,h)}(t) U_0(t - t_{z,(j,g,h)}(t) - (n-1)T_r) e^{i[2\pi f_0(t - t_{z,(j,g,h)}(t) - (n-1)T_r) + \varphi_{0,(j,g,h)}]}, \quad (4)$$

где $t_{z,(j,g,h)}(t)$ – задержка сигнала, отраженного от (j, g, h) -го разрешаемого объема, относительно ЗС; n – номер периода повторения ЗС; $E_{s,(j,g,h)}$, $\Phi_{0,(j,g,h)}$ – амплитуда и случайная начальная фаза сигнала, отраженного от (j, g, h) -го разрешаемого объема.

При использовании ЗС с линейной частотной модуляцией в n -м зондировании задержанный закон модуляции в выражении (4) имеет вид:

$$U_0\left(t-t_{z,(j,g,h)}(t)-(n-1)T_r\right)=\begin{cases} \exp\left(i\frac{\pi\Delta f_m\left(t-t_{z,(j,g,h)}(t)-(n-1)T_r\right)^2}{T_0}\right), & 0\leq t-t_{z,(j,g,h)}(t)-(n-1)T_r\leq T_0, \\ 0, & \left(t-t_{z,(j,g,h)}(t)-(n-1)T_r < 0\right)\vee\left(t-t_{z,(j,g,h)}(t)-(n-1)T_r > T_0\right). \end{cases}$$

Определение времени задержки и фазового сдвига отраженного сигнала в каждом периоде зондирования

Носитель ГЛ движется прямолинейно со скоростью V_N , которая является вещественной положительной константой.

Вначале рассмотрим отражения от реперной точки M , находящейся в центре первого разрешаемого объема с номером $(1, 1, 1)$ в блоке (см. рис. 2). Будем полагать, что в момент начала САА переменная $t=0$, а фазовый центр антенны ГЛ находится в точке с координатой $x_G(0)=(x_M-x_0)$, где $x_0=\frac{V_N T_{SAA}}{2}$ – половина пространственного интервала САА. После начала САА в произвольный момент t , когда излучается ЗС, расстояние между ГЛ и точкой M описывается выражением

$$r_{zs,M}(t)=\sqrt{z_M^2+y_M^2+(x_G(t)-x_M)^2}. \quad (5)$$

Так как $x_G(t)=x_G(0)+V_N t$, а $x_G(0)=(x_M-x_0)$, выражение (5) преобразуется к виду

$$r_{zs,M}(t)=\sqrt{z_M^2+y_M^2+(-x_0+V_N t)^2}, \quad 0\leq t\leq T_{SAA}. \quad (6)$$

Установим, что произвольный по счету ЗС в последовательности излучен в момент времени t , когда ГЛ находился в точке $x_G(t)=(x_M-x_0+V_N t)$. Отраженный от точки M сигнал, соответствующий этому ЗС, будет принят через интервал времени $t_{z,M}(t)$ после момента начала излучения ЗС. Тогда соответствующее этому ЗС расстояние $r_{ot,M}(t)$, которое проходит отраженный сигнал от точки M до ГЛ, можно описать выражением:

$$r_{ot,M}(t)=\sqrt{z_M^2+y_M^2+(x_G(t)+V_N t_{z,M}(t)-x_M)^2}, \quad 0\leq t\leq T_{SAA}. \quad (7)$$

С учетом того, что $x_G(t)=(x_M-x_0+V_N t)$, выражение (7) преобразуется к виду

$$r_{ot,M}(t)=\sqrt{z_M^2+y_M^2+(-x_0+V_N t+V_N t_{z,M}(t))^2}, \quad 0\leq t\leq T_{SAA}. \quad (8)$$

Связь между радиальными расстояниями $r_{zs,M}(t)$, $r_{ot,M}(t)$ и временем запаздывания отраженного сигнала $t_{z,M}(t)$ от точки M относительно момента начала излучения ЗС определяется выражением:

$$r_{zs,M}(t)+r_{ot,M}(t)=c_v t_{z,M}(t). \quad (9)$$

С использованием (6), (8) и (9) получим выражение для искомой задержки $t_{z,M}(t)$

отраженного от точки M сигнала, соответствующей моменту t начала излучения ЗС:

$$t_{z,M}(t) = \frac{2}{c_v^2 - V_N^2} (c_v r_{zs,M}(t) + V_N^2 t) - \frac{2V_N x_0}{c_v^2 - V_N^2}, [\text{с}]. \quad (10)$$

Рассмотрим произвольный разрешаемый объем с номером (j, g, h) . Для (j, g, h) -го разрешаемого объема с координатами центра $(x_{(j,g,h)}, y_{(j,g,h)}, z_{(j,g,h)})$ САА выполняется при движении ГЛ в интервале $[x_{(j,g,h)} - x_0; x_{(j,g,h)} + x_0]$ по координате X . Выполним описание задержек сигналов относительно координат реперной точки M , что позволит уменьшить количество новых переменных. С учетом этого координаты центра (j, g, h) -го объема определяются в виде:

$$x_{(j,g,h)} = x_M + (j-1)\Delta x; \quad y_{(j,g,h)} = y_M + (g-1)\Delta y; \quad z_{(j,g,h)} = z_M + (h-1)\Delta z. \quad (11)$$

Расстояние между ГЛ и центром (j, g, h) -го объема в момент начала излучения произвольного ЗС описывается выражением:

$$r_{zs,(j,g,h)}(t) = \sqrt{z_{(j,g,h)}^2 + y_{(j,g,h)}^2 + (x_G(t) - x_{(j,g,h)})^2}. \quad (12)$$

Так как $x_G(t) = (x_M + (j-1)\Delta x - x_0 + V_N t)$, то выражение (11) с учетом (12) в интервале САА ($0 \leq t \leq T_{\text{САА}}$) можно представить в виде:

$$r_{zs,(j,g,h)}(t) = \sqrt{(z_M + (h-1)\Delta z)^2 + (y_M + (g-1)\Delta y)^2 + (-x_0 + V_N t)^2}, \quad 0 \leq t \leq T_{\text{САА}}.$$

Расстояние $r_{ot,(j,g,h)}(t)$ и задержка $t_{z,(j,g,h)}(t)$ описываются выражениями:

$$r_{ot,(j,g,h)}(t) = \sqrt{(z_M + (h-1)\Delta z)^2 + (y_M + (g-1)\Delta y)^2 + (V_N t + V_N t_{z,(j,g,h)}(t) - x_0)^2}, \quad 0 \leq t \leq T_{\text{САА}},$$

$$t_{z,(j,g,h)}(t) = \frac{2}{c_v^2 - V_N^2} (c_v r_{zs,(j,g,h)}(t) + V_N^2 t) - \frac{2V_N x_0}{c_v^2 - V_N^2}.$$

Выражение для фазового сдвига $\varphi_{(j,g,h)}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} (r_{zs,(j,g,h)}(t) + r_{ot,(j,g,h)}(t))$, соответствующего задержке отраженного сигнала, для (j, g, h) -го объема при длине волны λ имеет вид

$$\varphi_{(j,g,h)}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} c_v t_{z,(j,g,h)}(t) = \frac{4\pi c_v}{\lambda (c_v^2 - V_N^2)} \left[(c_v r_{zs,(j,g,h)}(t) + V_N^2 t) - V_N x_0 \right].$$

Соответствующее выражение для линейной доплеровской частоты

$$f_{d,(j,g,h)}(t) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi_{(j,g,h)}(t)}{\partial t} \text{ имеет вид}$$

$$f_{d,(j,g,h)}(t) = \frac{2c_v}{\lambda (c_v^2 - V_N^2)} \left[c_v \frac{V_N (x_0 - V_N t)}{\sqrt{(z_M + (h-1)\Delta z)^2 + (y_M + (g-1)\Delta y)^2 + (V_N t - x_0)^2}} - V_N^2 \right].$$

На рис. 3 представлены законы изменения задержки, фазового сдвига и доплеровской частоты сигналов, отраженных от точки M , для следующих исходных условий: $\lambda = 0,02$ м, $V_N = 5$ м/с, $c_v = 1500$ м/с, $x_0 = 15$ м, $y_M = 600$ м, $z_M = 1375$ м, $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,5$ м. На рис. 4 приведены графики временных зависимостей задержки и фазового сдвига для разрешаемых

объемов, у которых имеются различия только по координате X . Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, характерные точки законов изменения времени задержки, фазового сдвига и доплеровской частоты отраженных сигналов сдвинуты относительно анализируемой точки. Это объясняется тем, что скорость распространения волн сопоставима со скоростью движения носителя ГЛ, и, соответственно, расстояния между фазовым центром антенны ГЛ и анализируемой точкой в момент передачи ЗС и приема отраженного сигнала неодинаковы. Во-вторых, закон изменения доплеровской частоты $f_{d(j,g,h)}(t)$ является нелинейным. В момент $t=0$ начала САА для (j,g,h) -го разрешаемого объема (ГЛ находится в точке $x_N=(x_{(j,g,h)}-x_0)$) доплеровская частота $f_{d(j,g,h)}(0)$ имеет наибольшее значение

$$f_{d(j,g,h)}(0) = f_{d\max(j,g,h)} = \frac{2c_v}{\lambda(c_v^2 - V_N^2)} \left[c_v \frac{V_N x_0}{\sqrt{(z_M + (h-1)\Delta z)^2 + (y_M + (g-1)\Delta y)^2 + (x_0)^2}} - V_N^2 \right]$$

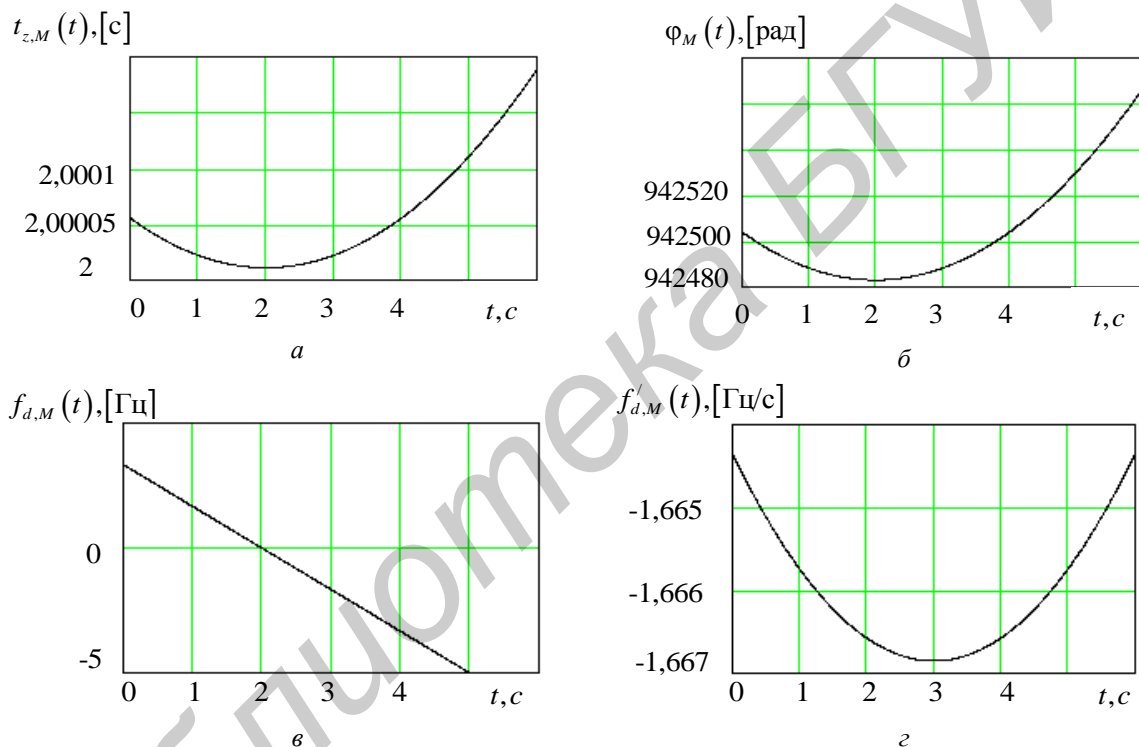


Рис. 3. Временные зависимости параметров отраженного сигнала для точки M : a – задержка; $б$ – фазовый сдвиг; $в$ – доплеровская частота; $г$ – первая производная доплеровской частоты

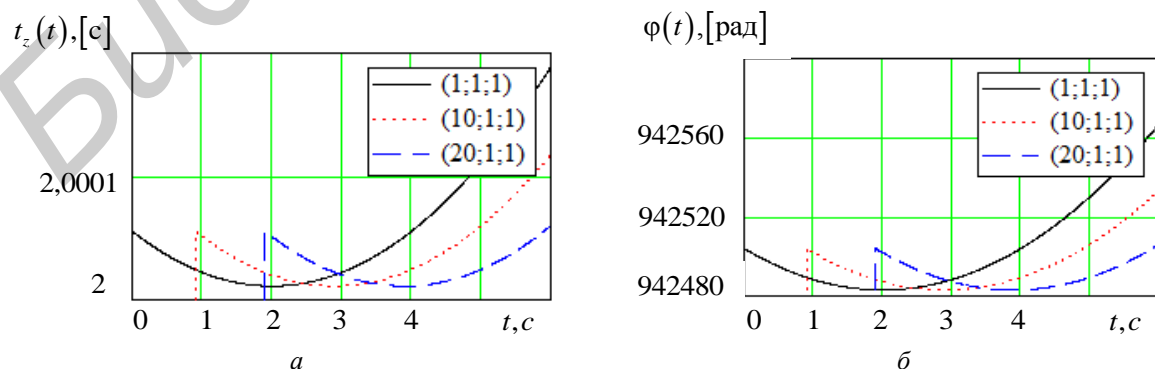


Рис. 4. Временные зависимости параметров отраженных сигналов для разрешаемых объемов с номерами $(1;1;1)$, $(10;1;1)$ и $(20;1;1)$: a – задержка; $б$ – фазовый сдвиг

Доплеровская частота отраженного сигнала в процессе САА убывает и принимает нулевое значение в момент времени $t = t_{\min}$, когда задержка $t_{z,(j,g,h)}(t)$ будет минимальной:

$$t_{z_{\min},(j,g,h)} = \frac{2}{c_v^2 - V_N^2} \left(c_v r_{zs,(j,g,h)}(t = t_{\min}) + V_N^2 t_{\min} \right) - \frac{2V_N x_0}{c_v^2 - V_N^2}.$$

Этот момент времени $t = t_{\min}$ описывается выражением:

$$t_{\min} = \frac{1}{V_N} \left[x_0 - \sqrt{\frac{V_N^4 \left((z_M + (h-1)\Delta z)^2 + (y_M + (g-1)\Delta y)^2 \right)}{c_v^2 V_N^2 - V_N^4}} \right].$$

Заключение

Отличия САА в гидролокации по сравнению с САА в радиолокации возникают из-за существенного снижения отношения скорости распространения используемой акустической волны к скорости движения носителя гидролокатора. Это привело в гидролокации к появлению существенных различий в расстояниях между фазовым центром антенны гидролокатора и анализируемой точкой в момент передачи зондирующего сигнала и в момент приема соответствующего отраженного сигнала. Выражение для суммарной задержки отраженного сигнала относительно момента зондирования позволило описать соответствующий нелинейно изменяющийся во времени фазовый сдвиг сигнала, отраженного от произвольного анализируемого разрешаемого объема. Полученное выражение для фазового сдвига является основой для разработки алгоритмов синтеза апертуры антенны, которые обеспечат построение изображения дна с высоким качеством на сравнительно больших дальностях (глубинах) при использовании относительно небольших значений длины волны и размера апертуры физической антенны.

MATHEMATICAL MODEL AND DELAY TIME OF REFLECTED SIGNAL IN SYNTHETIC APERTURE SONAR

S.R. HEISTER, TRAN TAI TRONG

Abstract

A mathematical model of time structure of the reflected signals in the synthetic aperture sonar is considered. The model provides the algorithm design of direct synthesis of antenna aperture, which allows to obtain high resolution image of seabed surface in reverberation conditions. The evaluation results of the delay time, the phase shift and the Doppler frequency for the different points of seabed surface are represented.

Список литературы

1. Гейстер С.Р., Чан Тай Чонг. // Докл. БГУИР. 2013. № 5 (75). С.72–78.
2. Золотарев В.В. // Подводные аппараты, робототехнические комплексы, их системы и технологии. 2007. № 1 (3). С. 21–26.
3. Чан Тай Чонг, Гейстер С.Р. // Матер. XVII междунар. науч.-тех. конф. «Современные средства связи». Минск, 16–18 октября 2012. С. 79.
4. Чан Тай Чонг, Гейстер С.Р. // Матер. XVII междунар. науч.-тех. конф. «Современные средства связи». Минск, 16–18 октября 2012. С. 80.

УДК 621.396.96

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ БОКОВЫХ ОСТАТКОВ В ЛЕСТНИЧНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТОТНО-МАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛАХ С ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫМИ ДИСКРЕТАМИ

Е.Н. БУЙЛОВ, С.А. ГОРШКОВ

Военная академия Республики Беларусь
Минск-57, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 14 февраля 2014

Проведен анализ свойств функций неопределенности лестничных дискретных частотно-манипулированных сигналов при использовании в качестве парциальных дискретов линейно-частотно-модулированных радиоимпульсов. Рассмотрены возможности снижения уровня боковых лепестков такого широкополосного сигнала.

Ключевые слова: дискретные частотно-манипулированные сигналы, лестничная манипуляция частоты, тело неопределенности, весовая обработка.

Введение

Среди большого многообразия широкополосных сигналов особый интерес вызывают дискретные частотно-манипулированные сигналы (ДЧМС). Такие сигналы при радиолокационном наблюдении позволяют обеспечивать возможность сверхразрешения по радиальной дальности Δr [1–9]. Формирование рассматриваемых дискретных сигналов оказывается технически проще, чем непрерывных линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов с той же шириной спектра [10]. Наиболее широкое практическое распространение получили частотно-манипулированные сигналы на основе парциальных простых прямоугольных импульсов. Такие сигналы характеризуются постоянной несущей частотой f_0 внутри парциального импульса и междуимпульсной перестройкой частоты $1/T_d$ (T_d – длительность одиночного дискрета), равной ширине спектра дискрета. Рассматриваемые сигналы, обеспечивая высокое разрешение по дальности, исключают возможность независимого управления частотными и временными параметрами сигнала. Следует отметить, что при использовании лестничных ДЧМС с модулированными парциальными дискретами (например, ЛЧМ) данный недостаток может быть устранен. В связи с этим определенный интерес представляет анализ свойств функций неопределенности (ФН) рассматриваемых сигналов и возможность снижения их уровня боковых лепестков, что и является целью настоящей статьи.

Одиночные лестничные дискретные частотно-манипулированные сигналы с ЛЧМ дискретами

На современном этапе развития техники генерирования и обработки радиолокационных сигналов большое внимание уделяется широкополосным сигналам, получаемым путем «синтеза» их спектра частот. В качестве таких сигналов, как правило, рассматриваются разомкнутые по времени частотно-манипулированные радиоимпульсы или их пачки [11]. Закон изменения несущей частоты парциального дискрета может быть как лестничным, так и псевдохаотическим. В рамках статьи рассматриваются особенности ФН лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами.

Лестничная частотная манипуляция предполагает равномерный интервал изменения несущей частоты дискретов [5]:

$$F_k = \left(k - \frac{M+1}{2} \right) \delta f, \quad (k = 1, 2, \dots, M),$$

где M – число частотных ступеней, а δf – шаг изменения несущей частоты.

На рис. 1 приведена диаграмма Габора для сигнала с лестничной манипуляцией несущей частоты.

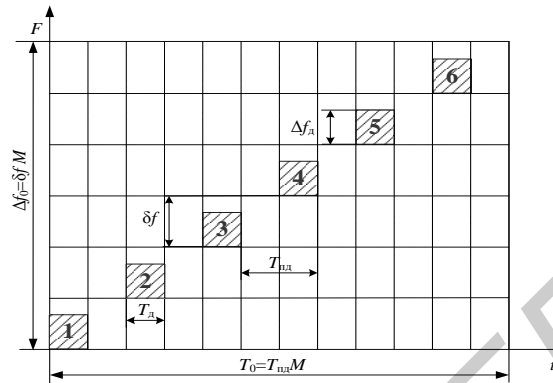


Рис. 1. Частотно-временная диаграмма Габора лестничных ДЧМС

Протяженные во времени сигналы с внутриимпульсной лестничной частотной манипуляцией, характеризующиеся большим числом парциальных дискретов, позволяют обеспечивать высокую разрешающую способность не только по радиальной дальности $\Delta r = c / (2M \cdot \delta f)$, но и по скорости $\Delta V_r = c / 2T_0 (f_0 + F_k)$. Отмеченный факт является немаловажным при решении задач классификации радиолокационных объектов.

Анализ свойств ФН проводится на примере лестничного ДЧМС с ЛЧМ дискретами при длине кода $M = 1020$ со скачком частоты $\delta f = 1$ МГц, периодом повторения ЛЧМ дискретов $T_{пд} = 20$ мкс, длительностью дискрета $T_д = 10$ мкс, девиацией частоты дискрета $\Delta f_м = \Delta f_д = 1$ МГц. Общая ширина полосы такого сигнала составляет $\Delta f_0 = 1020$ МГц, потенциальная разрешающая способность по дальности $\Delta r \approx 0,15$ м, длительность сигнала $T_0 = 20,4$ мс, потенциальное разрешение по частоте Доплера – $\Delta F_д \approx 50$ Гц. На рис. 2 приведены сечения ФН такого сигнала вертикальными $F = 0$, $F > 0$ и горизонтальной $\rho(\tau, F) = \text{const}$ плоскостями.

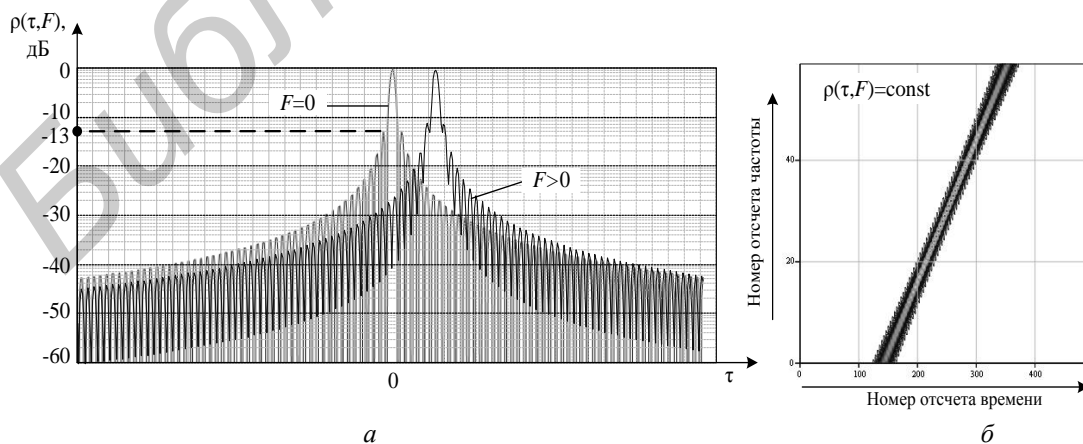


Рис. 2. Сечения ФН ДЧМС с длиной кода $M = 1020$: а – плоскостями $F = 0$, $F > 0$; б – горизонтальной плоскостью $\rho(\tau, F) = \text{const}$

Анализ полученных результатов показывает, что рассматриваемые ДЧМС характеризуются весьма значимым уровнем боковых лепестков (порядка -13 дБ), уменьшающимся по закону функции $[\sin(x)/x]^2$ (рис. 2, а). При линейном изменении несущей частоты наличие расстройки по частоте определяет величину временного сдвига сжатого импульса (рис. 2, б).

Весовая обработка лестничного дискретного частотно-манипулированного сигнала с ЛЧМ дискретами

Известно [12], что использование весовой обработки (ВО) сжатого сигнала позволяет существенно снижать уровень его боковых лепестков. С целью подтверждения отмеченного факта, на рис. 3 приведены сечения ФН ДЧМС с ЛЧМ парциальными дискретами плоскостями $F=0$, $F_{\Pi}/2 < F < F_{\Pi}$ и $F=F_{\Pi}$.

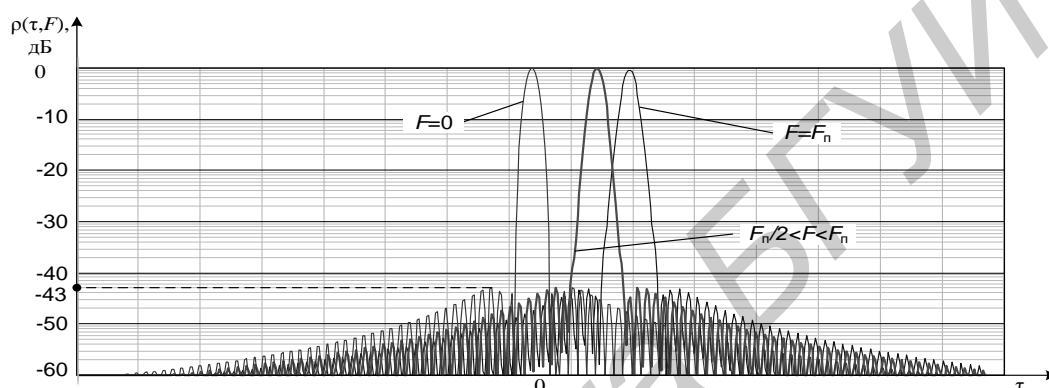


Рис. 3. Сечения ФН плоскостями $F=0$, $F_{\Pi}/2 < F < F_{\Pi}$ и $F=F_{\Pi}$ одиночного лестничного ДЧМС с ЛЧМ дискретами, ВО функцией Хемминга и длиной кода $M=1020$

Приведенный результат подтверждает, что использование весовой функции существенно снижает уровень боковых лепестков (например, для функции Хемминга -43 дБ), что полностью согласуется с теоретическими данными [12].

Когерентная последовательность дискретных частотно-манипулированных сигналов

Для улучшения энергетического потенциала радиолокационных станций, селекции движущихся целей на фоне пассивных помех и повышения точности сопровождения объектов по радиальной скорости используют зондирующие сигналы в виде когерентной последовательности ДЧМС [5]. На рис. 4 приведена диаграмма Габора такого сигнала с лестничной частотной манипуляцией.

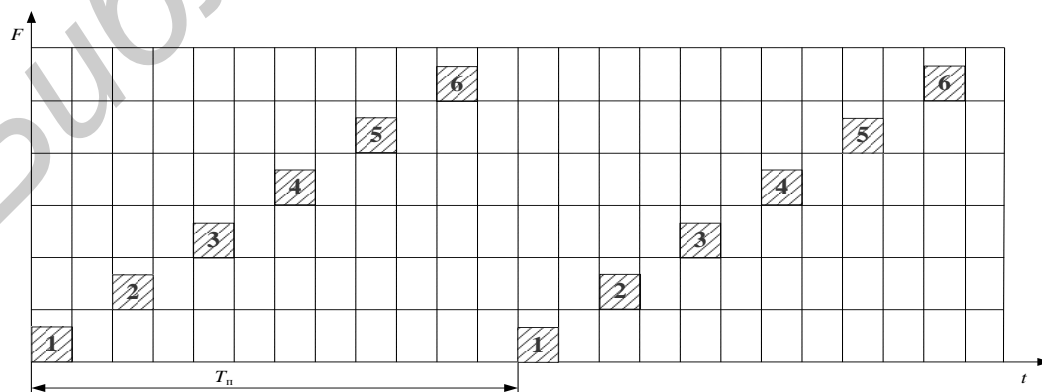


Рис. 4. Диаграмма Габора когерентной последовательности из двух лестничных ДЧМС

Анализ характеристик ФН приведен на примере когерентной последовательности из 10 ($N=10$) лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами и длиной кода $M=102$, величиной скачка

частоты $\delta f = 10$ МГц, шириной спектра ЛЧМ дискрета $\Delta f_d = 10$ МГц, длительностью импульса $T_d = 10$ мкс и периодом повторения $T_{пд} = 20$ мкс. Общая ширина спектра сигнала $\Delta f_0 = 1020$ МГц, длительность когерентной последовательности $T_0 = 20,4$ мс.

На рис. 5 приведены сечения ФН вертикальными плоскостями $F = 0; F_{п}/2; F_{п}$.

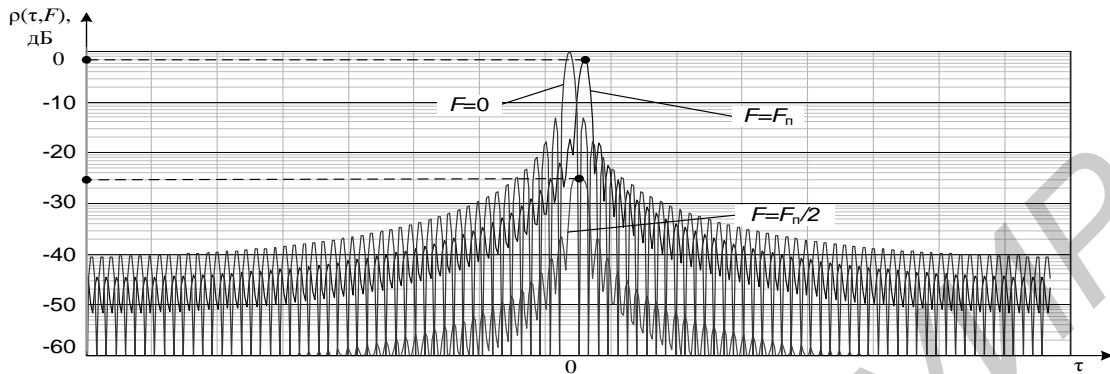


Рис. 5. Сечения ФН плоскостями $F = 0, F = F_{п} / 2$ и $F = F_{п}$ когерентной последовательности из 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами и длиной кода $M = 102$

Результаты анализа подтверждают известные факты о том, что на частотах кратных $\pm F_{п}$ наблюдаются максимумы сечения ФН, которые смещены относительно главного лепестка в соответствии с существующей для данного сигнала время-частотной зависимостью. При этом, амплитуды данных максимумов практически равны величине главного лепестка. Отмеченный факт является весьма существенным при решении задачи классификации радиолокационных целей с использованием их дальностно-частотных радиолокационных портретов.

Применительно к рассматриваемому сигналу на рис. 6 представлены фрагмент тела неопределенности (ТН) и его сечение горизонтальной плоскостью $\rho(\tau, F) = \text{const}$.

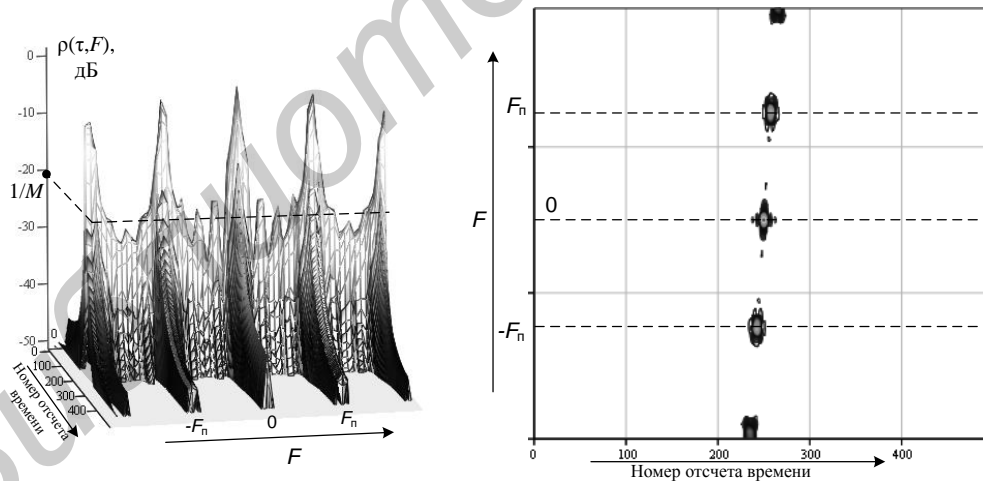


Рис. 6. Фрагмент ТН и его сечение горизонтальной плоскостью $\rho(\tau, F) = \text{const}$ когерентной последовательности из 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами и длиной кода $M = 102$

Анализ полученных результатов показывает, что вдоль оси частот располагаются ярко выраженные пики (на частотах кратных $\pm F_{п}$). При этом каждый частотный пик характеризуется высоким уровнем боковых лепестков вдоль оси времени (порядка -13 дБ), а уровень боковых лепестков вдоль оси частот определяется значением $1/M$.

Весовая обработка когерентной последовательности лестничных дискретных частотно-манипулированных сигналов с ЛЧМ дискретами

Определенный интерес вызывает исследование возможности снижения уровня боковых остатков, при использовании зондирующего сигнала в виде когерентной последовательности лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами. С этой целью целесообразно использовать известные функции ВО [5].

Особый интерес представляет возможность ВО каждого одиночного ДЧМС из когерентной последовательности (рис. 7 и рис. 8, а). На рис. 7 приведены сечения ФН вертикальными плоскостями при различных расстройках по частоте.

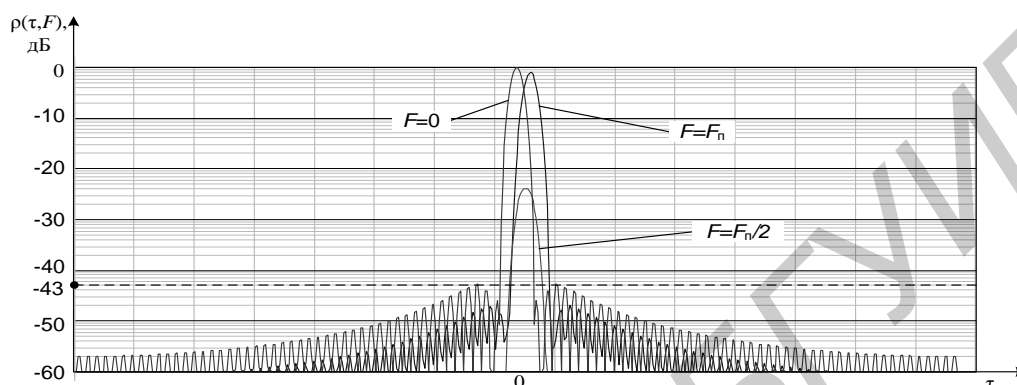


Рис. 7. Сечения ФН плоскостями $F = 0$, $F = F_n / 2$ и $F = F_n$ когерентной последовательности из 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами, ВО функцией Хемминга и длиной кода $M = 1020$

Анализ показывает, что при использовании функции Хемминга уровень боковых остатков ДЧМС не превышает -43 дБ (согласуется с теоретическими данными [12]).

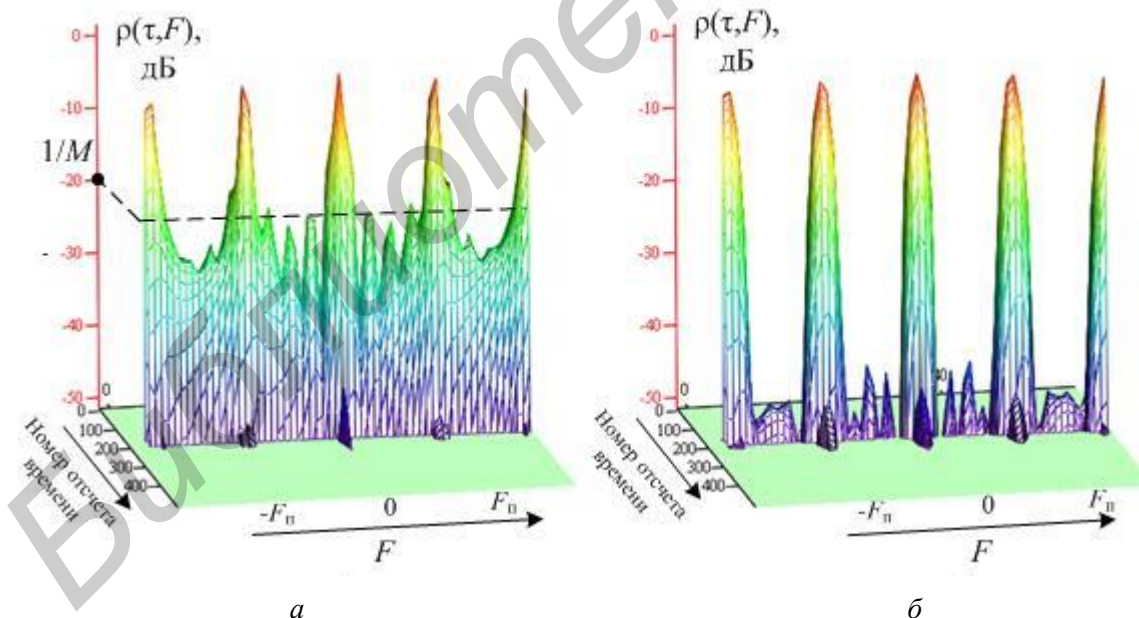


Рис. 8. Фрагмент ТН когерентной последовательности из 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами и длиной кода $M = 102$ при: а – ВО каждого ДЧМС в отдельности; б – дополнительной ВО всей последовательности импульсов

На рис. 8, а показан фрагмент ТН когерентной последовательности из 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами, при использовании ВО для каждого ДЧМС в отдельности. На данном рисунке наблюдается существенное снижение уровня боковых остатков вдоль временной оси. Однако уровень боковых лепестков частотных сечений определяется величиной $1/M$.

На рис. 8, б показан фрагмент ТН когерентной последовательности из 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами при ВО каждого сигнала в отдельности и дополнительной ВО всей последовательности (двойная ВО). Такой подход позволяет снизить уровень боковых остатков сжатого сигнала, как вдоль оси времени, так и вдоль оси частот до теоретического (например, для функции Хемминга -43 дБ).

На рис. 9 показан вид двойной весовой функции, обеспечивающей минимизацию боковых остатков сигнала в сечениях по времени и частоте, при использовании зондирующего сигнала в виде когерентной последовательности лестничных ДЧМС.

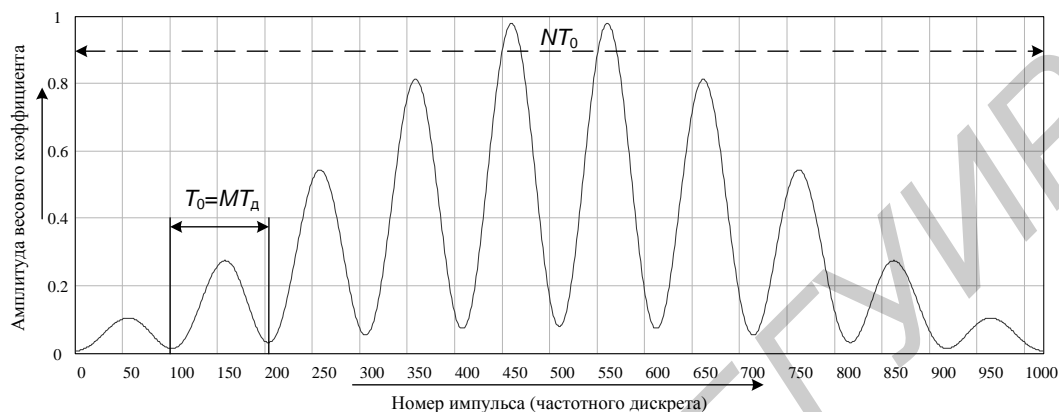


Рис. 9. Двойная весовая функция, обеспечивающая ВО функцией Хемминга когерентной последовательности 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами и длиной кода $M = 102$

Проведенный анализ показывает, что использование двойной весовой функции (функция Хемминга) позволяет снизить уровень боковых остатков когерентной последовательности лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами до теоретического (порядка -43 дБ).

Заключение

Проведенный анализ свойств ФН лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами подтверждает наличие высокого уровня боковых лепестков сжатого сигнала (порядка -13 дБ). Одним из способов уменьшения их уровня является использование двойной весовой обработки. Рассмотренный подход позволяет снизить уровень боковых остатков сжатого сигнала как вдоль оси времени, так и вдоль оси частот, до теоретически известного (например, для функции Хемминга -43 дБ). При этом на частотах кратных $\pm F_{\Pi}$ наблюдаются выраженные максимумы сечения ФН, которые смещены относительно главного лепестка в соответствии с существующей время-частотной зависимостью, присущей данному сигналу. Амплитуды максимумов практически соответствуют величине главного лепестка.

LEVEL DECREASING OF THE LATERAL RESTS IN THE LADDER DISCRETE IN FREQUENCY MANIPULATED SIGNALS WITH THE LINEARLY-FREQUENCY-MODULATED IMPULSES

E.N. BUILOV, S.A. GORSHKOV

Abstract

The analysis of uncertainty functions properties of the ladder discrete frequency-manipulated signals is carried out, at use in quality discrete the linearly-frequency-modulated radio impulses. Possibilities of decrease in level of lateral petals of such broadband signal are considered.

Список литературы

1. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. Теория и применение. М., 1971.
2. Плекин В.Я. Широкополосные дискретно-кодированные сигналы в радиотехнике и радиолокации. М., 2005.
3. *Levanon N., Mozeson E.* Radar Signals. New Jersey, 2004.
4. *James D. Taylor.* Ultra-Wideband Radar Technology. New York, 2000.
5. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник. М., 2007.
6. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М., 1985.
7. *Shirman Ya.D., Gorshkov S.A., Leshchenko S.P. et. al.* Computer simulation of aerial target radar scattering, recognition, detection, and tracking/ Boston–London, 2002.
8. *Wehner D.* High Resolution Radar. Norwood, 1987.
9. Орленко В.М., Ширман Я.Д. // Электромагнитные волны и электронные системы. 1999. № 4. С. 86–89.
10. Гомозов В.И. Теория и техника формирования сложных СВЧ сигналов с высокой скоростью угловой модуляции для радиотехнических систем. Харьков, 2002.
11. Орленко В.М., Ширман Я.Д. Тенденции повышения радиолокационного разрешения. Космическая радиофизика. 1998. № 3. С. 44–51.
12. Марпл С.Л. мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М., 1990.

УДК 621.37.46

МЕТОДИКА И ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ МИКРОДИСПЛЕЙНОГО МОДУЛЯ ВИДЕОПРОЕКЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ПЕРСОНАЛЬНОГО ТИПА

А.С. МОХАММЕД, Е.В. МУХА, А.А. СТЕПАНОВ, А.В. ПАСЫНКОВ, А.Г. СМИРНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 31 марта 2014

Представлены методика и программно-аппаратный комплекс функционального контроля микродисплейного модуля видеопроекционного устройства персонального типа. Основным звеном комплекса является формирователь видеоизображения (генератор испытательных сигналов) Video Pattern Generator VPG 170, который позволяет создавать тестовые поля изображений с различными параметрами и характеристиками. В качестве микродисплейного модуля использовали либо активно-матричный SVGA микродисплей, выполненный по LCOS-технологии, либо тестовый модуль светоизлучающего типа на основе Шоттки структуры нанопористый кремний/Al, контроль функционирования которых осуществляется визуально. Разработана специальная оптическая система, включающая поляризационный куб с антиотражающими и антибликовыми покрытиями, светодиодную подсветку по RGB составляющим, управляемую контроллером. Управление генератором испытательных сигналов VPG 170 осуществляется с помощью специально разработанного программного обеспечения, установленного на персональном компьютере с операционной системой Windows XP.

Ключевые слова: видеопроекционное устройство, устройства отображения информации, микродисплей, контроль функционирования.

Введение

Дисплей – это устройство, отображающее изменяющуюся текстовую, графическую или видео информацию. Поскольку в современном мире основной поток информации человек получает через электронные средства коммуникации, то именно дисплей является главным связующим звеном между ними и человеком (оператором).

Ежегодно в мире производятся миллиарды дисплеев, которые подразделяются на множество типов, видов и подвидов, связанных с особенностями их конструкций, технологий и применения (см. рис. 1). Как следует из рисунка, наиболее очевидно различие дисплеев по размеру, однако их классификацию корректнее проводить не по размеру, а по связанным с ним и назначением дисплея параметрам, называемым дистанцией наблюдения D , разрешающей способности M и линейным размером элемента отображения (пикселя) A . Оптимальная дистанция наблюдения – это расстояние, с которого человек видит на дисплее четкое, но не дискретное изображение, для полноценного просмотра которого ему не надо напрягать зрение или вращать головой (комфортным считается движение глаза в пределах 24° по вертикали и горизонтали, т.е. 34° по диагонали). Оптимальная дистанция наблюдения связана с особенностями человеческого зрения: человеческий глаз перестает различать отдельные точки изображения, которые расположены на расстоянии меньше угловой минуты. Если дистанция наблюдения больше оптимальной, то пиксели сливаются, изображение размывается и информационная способность дисплея падает, а если дистанция наблюдения меньше оптимальной, то становится видна дискретная пиксельная структура. Соответственно, для

нормальной остроты зрения, дистанция наблюдения D выражается формулой $D = 3500 A$, где A – линейный размер пикселя.

С учетом этой зависимости на рис. 1 классифицированы различные типы дисплейных устройств в зависимости от оптимальной дистанции их наблюдения, геометрических размеров каждого пикселя и разрешающей способности дисплея в мегапикселях.

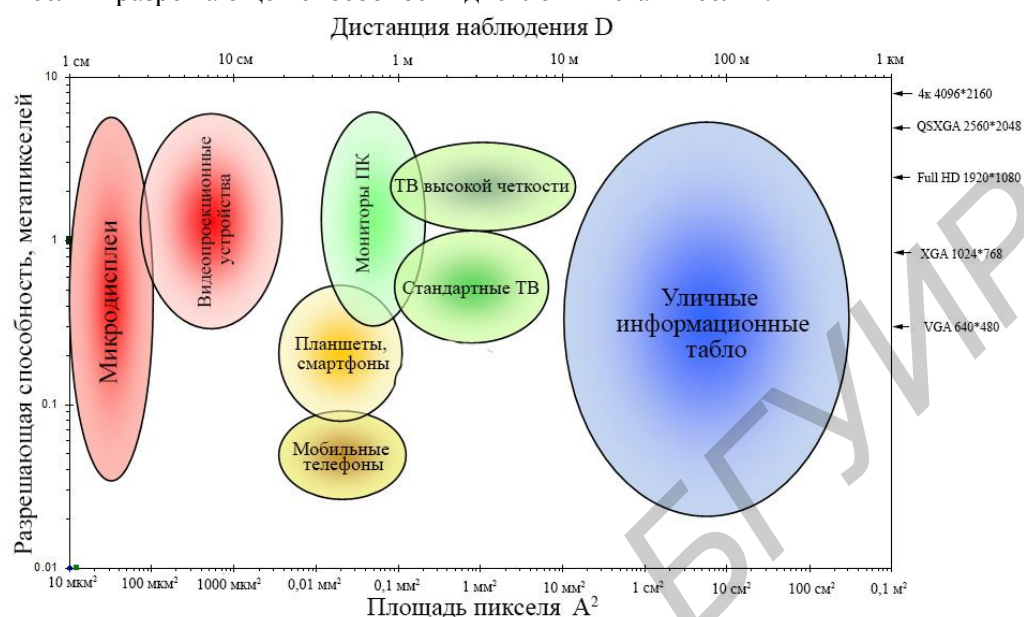


Рис. 1. Классификация дисплеев

Особый интерес представляют микроминиатюрные дисплеи или микродисплеи [1]. Дистанция наблюдения в микродисплеях обычно не превышает нескольких сантиметров, а сами они зачастую выглядят как уменьшенные копии «больших дисплеев». Микродисплеи могут использоваться как в проекционных системах группового типа, так и в персональных видеопроекционных системах, формирующих мнимое (виртуальное) изображение.



Рис. 2. Структура и внешний вид микродисплея

В таблице приведены конструктивно-технологические варианты и основные параметры микродисплеев, освоенных промышленностью в настоящее время. Как видно из приведенных данных, ни один из рассмотренных вариантов не отвечает всей совокупности требований.

Основной акцент в данной работе сделан на исследовании микродисплеев отражательного типа, выполненных по наиболее распространенной в настоящее время технологии LCOS (Liquid Crystal on Silicon) (рис. 2), и микродисплеях светоизлучающего типа LED (Light Emitting Diode) [2, 3].

Конструктивно-технологические варианты микродисплеев

Технология	LCOS	OLED	μLED	DLP	LBS	Por-Si LED
Эффективность	средняя	низкая	высокая	низкая	низкая	не высокая
Яркость свечения	3000 кд/м ² (полноцветная) ~104 кд/м ² (зеленый)	1500 кд/м ² (полноцветная) ~10 ³ кд/м ² (желтый)	~10 ⁵ кд/м ² (полноцветная) ~10 ⁷ кд/м ² (синий/зеленый)	~1000 кд/м ² (полноцветная)	~1000 кд/м ² (полноцветная)	~100 кд/м ²
Контраст	200:1	очень высокий > 10000:1	очень высокий > 10000:1	высокий	высокий	очень высокий >1000:1
Время отклика	мс	мкс	нс	мс	мс	нс
Рабочая температура	0...60 °C (требуется нагрев)	-50...70 °C	-100...70 °C	не определена	не определена	-100...80 °C
Ударостойкость	низкая	средняя	высокая	средняя	средняя	высокая
Время жизни	среднее	среднее	длительное	среднее	короткое	длительное
Стоимость	низкая	низкая	низкая	высокая	высокая	низкая

Методика и программно-аппаратный комплекс для функционального контроля микродисплеев

Структурная схема и внешний вид программно-аппаратного комплекса для контроля функционирования микродисплейных устройств, состоящего из ряда узлов, соединенных между собой различными интерфейсами, представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

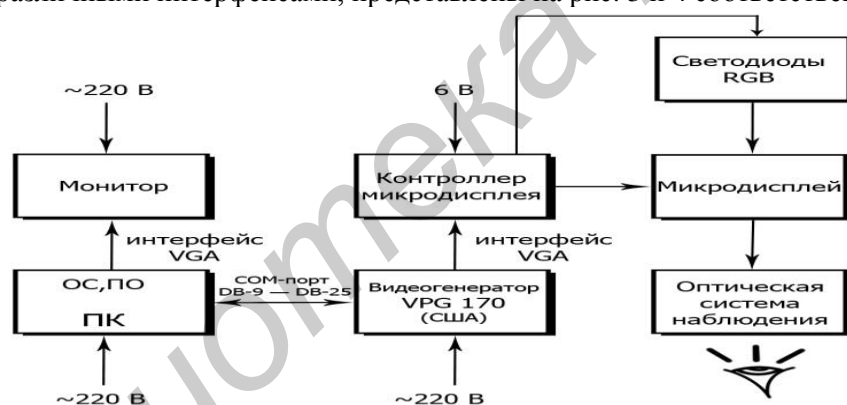


Рис. 3. Структурная схема программно-аппаратного комплекса контроля функционирования видеопроекционного устройства

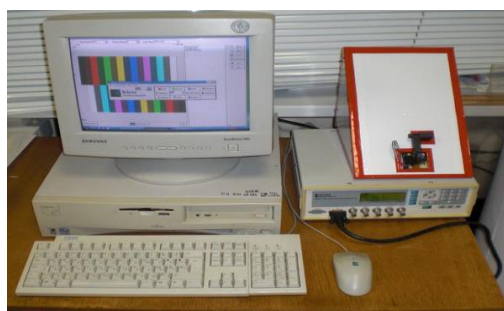


Рис. 4. Внешний вид программно-аппаратного комплекса

Основным звеном комплекса является генератор испытательных сигналов Video Pattern Generator типа VPG 170 производства компании KLEIN Instruments (США), выполняющий функции формирователя видеоизображений, который позволяет создавать тестовые поля изображений с различными характеристиками (рис. 5). Оптический модуль, внешний вид которого показан на рисунке 6, предназначен для визуального контроля функционирования

исследуемого микродисплея и включает линзовую систему, поляризационный куб со светоотражающими покрытиями, светодиодную подсветку по трем составляющим – RGB, – напряжение на которые подается с контроллера в строго синхронизированном порядке.

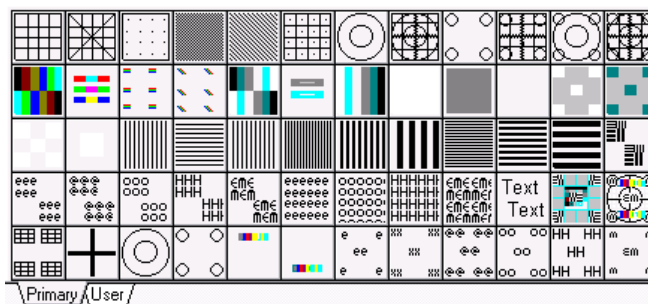


Рис. 5. Диалоговое окно для выбора тестового изображения



Рис. 6. Внешний вид оптического модуля

При разработке и отладке комплекса в качестве контрольного микродисплейного устройства мы использовали активно-матричный микродисплей типа DC 28 SVGA разрешения производства американской компании MicroDisplay.

Испытываемый микродисплей через корпус типа BGA (Ball Grid Array) и шлейф типа DC Flex Cable 12 подключен к контроллеру ЕК4, который связан с генератором испытательных сигналов через VGA интерфейс (рис. 7). Входящие в его состав микроконтроллеры А220/А221 – это высокоинтегрированные большие интегральные схемы (БИС), которые поддерживают управление цветными микродисплейными устройствами. Они предназначены для приема цифрового видеосигнала в формате BT656 и преобразования его в аналоговый RGB сигнал для микродисплея. Микродисплеи получают три различных видеосигнала – по красному, зеленому и синему каналам. Вдобавок, для корректной работы также необходимы строчный и кадровый синхросигналы. Контроллеры А220/А221 содержат по три 8-битных ЦАП, видеоусилитель и одну схему 5-вольтовой зарядки для аккумулятора микродисплея, имеют встроенную функцию преобразования YCbCr в RGB, а также горизонтального и вертикального масштабирования. Контроллер А220 поддерживает 3-проводной последовательный интерфейс, а А221 поддерживает 2- и 3-проводной последовательный интерфейс. Кроме того, контроллер А221 дополнительно содержит широтно-импульсный модулятор управления яркостью подсветки.

Предусмотрено также управление генератором тестовых сигналов VPG 170 с помощью специально разработанного программного обеспечения, которое установлено на персональный компьютер, работающий под операционной системой Windows XP.



Рис. 7. Внешний вид контроллера ЕК4

Методика проведения визуального функционального контроля

Общий принцип использования комплекса и генератора испытательных сигналов VPG можно вкратце описать следующим образом: генератор используется для всех типов микродисплеев, подключается по интерфейсу VGA- или BNC-коаксиальным кабелям и подает тестовые изображения с различными характеристиками на испытываемый микродисплей. Генератор испытательных сигналов, в свою очередь, контролируется с помощью программного обеспечения, установленного на персональном компьютере, и обладает возможностями создания новых изображений и хранением данных измерений.

Заключение

Разработан простой и эффективный метод и программно-аппаратный комплекс функционального контроля микродисплейного модуля видеопроекционного устройства персонального типа. Основным звеном комплекса является формирователь видеоизображения VPG 170, который позволяет создавать тестовые поля изображений с различными параметрами и характеристиками. В качестве микродисплейного модуля использован либо активно-матричный SVGA микродисплей, выполненный по LCOS-технологии, либо тестовый модуль светоизлучающего типа, контроль функционирования которых осуществляется визуально. Комплекс включает также специальную оптическую систему с поляризационным кубом и светодиодной RGB подсветкой, управляемой контроллером ЕК4. Управление генератором испытательных сигналов VPG 170 осуществляется с помощью специально разработанного программного обеспечения, установленного на персональном компьютере с операционной системой Windows XP.

HARD/SOFTWARE FUNCTIONAL CONTROL METHOD OF MICRODISPLAY MODULES FOR PERSONAL VIDEO-PROJECTION SYSTEMS

A.S. MOHAMMED, E.V. MUKHA, A.A. STSIAPANAU, A.V. PASYNKOV, A.G. SMIRNOV

Abstract

The hard- and software functional control method of microdisplay modules for personal videoprojection systems is presented. The basic components comprise of an active matrix SVGA LCOS microdisplay or a LED microdisplay based on Schottky diodes nanoporous silicon-nanostructured aluminium, a Video Pattern Generator VPG 170 which generates test images with different parameters and characteristics. It's included also the specialized optical system containing a polarizing cube with antiglare coatings and RGB backlit system. The control of the generator test signals is accomplished using a specially developed software installed in a PC using Windows XP operating system.

Список литературы

1. *Smirnov A., Mohammed Abubakar Saddiq* // Матер. 19-го междунар. симпозиума «Перспективные технологии дисплеев и полупроводниковой осветительной техники. Логойск, 2011 г. С. 170–182
2. *Smirnov A., Stsiapanau A., Mohammed A.S. et. al.* // Proc. SID Symposium «Display Week-2011». Los-Angeles, May 2011. P. 1385–1387
3. *Войтенков С., Саддик Мохаммед А., Мусаев С. и др.* // Abstracts of 19th Advanced Display Technologies int. Symp. ADLT-2011. Logoisk, February 2011. P. 15.

УДК 621.382.2/3

ПРЕЦИЗИОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ПОЛЯРНОСТИ С НИЗКИМ ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ И ЗАЩИТОЙ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗРЯДА СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Ю.Н. КРИВОШЕЯ

Филиал «Транзистор» ОАО «Интеграл»
Корженевского, 16, Минск, 220108, Беларусь

Поступила в редакцию 11 октября 2013

Приведены результаты разработки и исследования конструкции прецизионных стабилизаторов напряжения положительной полярности с низким значением падения напряжения и защитой от воздействия разрядов статического электричества (К1254ЕН3АП1) с выходным напряжением 1,8 В, 2,5 В, 2,85 В, 3,3 В и 5 В в пластмассовых корпусах КТ-28 (ТО-220), КТ-27 (ТО-126, КТ-89 (D-PAK).

Ключевые слова: стабилизатор напряжения, статическое электричество.

Введение

Электростатический разряд (ЭСР) является одной из самых главных причин выхода из строя интегральных схем в процессе монтажа и эксплуатации приборов. Как правило, от 1/3 до половины отказов микросхем происходит из-за воздействия ЭСР либо электрического перенапряжения. Для того чтобы увеличить надежность микросхемы и свести разрушительное воздействие ЭСР к минимуму, требуется, кроме обеспечения известных технологических приемов снижения величины статического заряда, вводить в конструкцию микросхем специальные элементы защиты.

При производстве полупроводниковых изделий электростатический заряд чаще всего возникает из-за трения поверхностей различных материалов. Величина заряда зависит от способа, качества и степени давления при контакте между материалами. Значительные по величине заряды могут возникать непосредственно на поверхности прибора. Такие заряды бывают подвижными, если они накапливаются на проводящих элементах конструкции, или неподвижными, когда они образуются на изолированных деталях. Собственно, наличие и накопление заряда на любом изделии, как правило, не ведет к его повреждению или изменению характеристик до тех пор, пока через это изделие не пройдет электростатический разряд, возникающий при соединении тел с различными электростатическими потенциалами. В момент, когда тот или иной вывод прибора касается проводящего тела, происходит импульсный разряд, который может полностью или частично повредить прибор [1].

Электрическое перенапряжение в микросхеме может возникать вследствие таких явлений, как электростатический разряд, электромагнитный импульс, молния, приводящих к электрическому пробую и грубому повреждению в интегральной схеме. Механизмы отказа при электрическом перенапряжении можно разделить на две категории: отказы под действием температуры и отказы из-за усиления электрического поля. Продолжительность воздействия электрического напряжения может быть от одной наносекунды до одной миллисекунды и дольше. Длительное воздействие электрического перенапряжения может привести к таким повреждениям, как вздутие металлических поверхностей, повреждение кремния из-за перегревания отдельных областей пластины. Эти повреждения приводят к сокращению срока службы микросхемы (например, увеличение тока утечки на одном или более выводах), или выходу микросхемы из строя [2].

Функциональным назначением стабилизаторов напряжения является поддержание постоянного выходного напряжения независимо от изменяющихся во времени температуры, входного напряжения или тока нагрузки с минимальными потерями мощности. Поэтому основными параметрами, характеризующими стабилизаторы напряжения, являются: точность поддержания выходного напряжения, дрейф при изменении входного напряжения, тока нагрузки и температуры окружающей среды, значение остаточного напряжения, коэффициент сглаживания пульсаций.

Методика эксперимента

Испытания на устойчивость к воздействию статического электричества проводились согласно ГОСТ 18727-83 и ОСТ 11 073.013 метод 502-1а. На выводы микросхемы подавался статический разряд сначала положительной, а потом отрицательной полярности последовательно величиной 65 В, 150 В, 350 В, 750 В, 1500 В, 2500 В до появления отказов. Годность изделий оценивалась по соответствию значений электрических параметров (см. в таблице) в нормальных условиях требованиям ТУ (АДКБ.431420.913ТУ).

Таблица 1. Основные электрические параметры K1254

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Норма параметра		Режим измерения	Температура корпуса, °С
		K1254ЕН3АП K1254ЕН3АП1 K1254ЕН3АТ			
		Не менее	Не более		
Выходное напряжение, В	U_0	3,267	3,333	$U_1 = 5,3 \text{ В}, I_0 = 10 \text{ мА}$	25±10
		3,250	3,350	$U_1 = (4,75 \div 12,0) \text{ В}, I_0 = (0 \div 1) \text{ А}$ $U_1 = 14,5 \text{ В}, I_0 = 10 \text{ мА}$	
		3,240	3,360	$U_1 = (4,75 \div 12,0) \text{ В}, I_0 = (0 \div 1) \text{ А}$	-10÷100
Изменение выходного напряжения при изменении входного напряжения, мВ	$U_0 (U)$	-	7	$U_1 = (4,75 \div 12,0) \text{ В}, I_0 = 0 \text{ мА}$	25±10
		-	10	$U_1 = (5,3 \div 14,5) \text{ В}, I_0 = 10 \text{ мА}$ $U_1 = (4,75 \div 12,0) \text{ В}, I_0 = 0 \text{ мА}$	-10÷100
Изменение выходного напряжения при изменении тока нагрузки, мВ	$U_0 (I)$	-	12	$U_1 = 5,3 \text{ В}, I_0 = (0 \div 1) \text{ А}$	25±10
		-	24		-10÷100
Ток потребления, мА	$I_{\text{пот}}$	-	10	$U_1 = (12 \div 15,0) \text{ В}, I_0 = 0 \text{ мА}$	25±10
Остаточное напряжение, В	U_{ds}	-	1,3	$I_0 = 1 \text{ А}$	25±10
Максимальный выходной ток, А	$I_{0 \text{ макс}}$	1,0	-	$U_1 = 8,3 \text{ В}$	25±10
Коэффициент подавления пульсаций, дБ	K_{RR}	60	-	$U_1 = 6,3 \text{ В}, I_0 = 1 \text{ А}$	25±10

Для испытаний микросхемы K1254ЕН3АП1 использовалась модель человеческого тела. Это наиболее широко используемая модель испытаний на устойчивость к электростатическому разряду (ЭСР). Она используется для описания чувствительности электронных элементов к повреждениям вследствие ЭСР. Электрическая принципиальная схема устройства для проведения испытаний полупроводниковых приборов приведена на рисунке 1. На схеме: G – регулируемый источник постоянного напряжения; V – испытуемый полупроводниковый прибор; R1 – резистор 100–200 МОм; R2 – резистор 1,5 кОм; C – конденсатор 100 пФ; S1, S2 – переключатели.

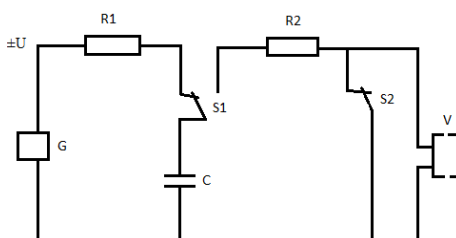


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная устройства для проведения испытаний полупроводниковых приборов на чувствительность к воздействию статического электричества

Результаты и их обсуждение

В испытаниях на воздействие статического электричества было задействовано 15 микросхем. Выход годных микросхем при $U = \pm 65$ В, $U = \pm 150$ В, $U = \pm 350$ В, $U = \pm 750$ В и $U = \pm 2500$ В составил 0 штук, при $U = \pm 1500$ В – 6 штук. Экспериментально было установлено, что допустимое значение статического электричества для микросхемы К1254ЕН3АП1 составило 2000 В. Максимальный ток нагрузки микросхем соответствует 1,0 А. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Принцип действия прецизионных стабилизаторов напряжения положительной полярности с низким остаточным напряжением и защитой от воздействия разряда статического электричества основан на использовании стабильного напряжения запрещенной (энергетической) зоны кремния. Структурная схема микросхемы представлена на рис. 2. Микросхема состоит из следующих компонентов: 1) источник опорного напряжения 1,25 В; 2) узел подгонки опорного напряжения (резисторы R9, R10, R11, R12); 3) узел масштабирования опорного напряжения (резисторы R23, R24); 4) усилитель ошибок; 5) мощный выходной транзистор VT27; 6) схема защиты выходного транзистора от тока короткого замыкания и от превышения предельных входных напряжений; 7) схема защиты микросхемы от перегрева (схема тепловой защиты); 8) генератор режимных токов микросхемы; 9) блоки защиты от статического электричества (БЗСЭ).

Таблица 2. Электрические параметры микросхемы К1254ЕН3АП1

Наименование параметра	Тип микросхемы	Режим измерения	Норма параметра		Температура корпуса, °С
			Мин.	Макс.	
1	2	3	4	5	6
Выходное напряжение, В	К1254ЕН3АП1 – 1,8	$U_I = 3,8$ В, $I_0 = 10$ мА	1,782	1,818	25±10
		$U_I = 3,3 \div 12$ В, $I_0 = 0 \div 1$ А	1,773	1,827	
		$U_I = 14,5$ В, $I_0 = 10$ мА	1,764	1,836	
		$U_I = 3,3 \div 12$ В, $I_0 = 0 \div 1$ А	1,764	1,836	
	К1254ЕН3АП1 – 2,5	$U_I = 4,5$ В, $I_0 = 10$ мА	2,475	2,525	25±10
		$U_I = 4,0 \div 12$ В, $I_0 = 0 \div 1$ А	2,463	2,537	
		$U_I = 14,5$ В, $I_0 = 10$ мА	2,450	2,550	
	К1254ЕН3АП1 – 2,85	$U_I = 4,0 \div 12$ В, $I_0 = 0 \div 1$ А	2,450	2,550	-10÷100
		$U_I = 4,85$ В, $I_0 = 10$ мА	2,821	2,879	
		$U_I = 4,4 \div 12$ В, $I_0 = 0 \div 1$ А	2,807	2,893	
		$U_I = 14,5$ В, $I_0 = 10$ мА	2,791	2,910	
	К1254ЕН3АП1 – 3,3	$U_I = 4,4 \div 12$ В, $I_0 = 0 \div 1$ А	2,791	2,910	-10÷100
		$U_I = 5,3$ В, $I_0 = 10$ мА	3,267	3,333	
		$U_I = 4,75 \div 12$ В, $I_0 = 0 \div 1$ А	3,250	3,350	
	К1254ЕН3АП1 – 5,0	$U_I = 14,5$ В, $I_0 = 10$ мА	3,250	3,350	25±10
		$U_I = 4,75 \div 12$ В, $I_0 = 0 \div 1$ А	3,240	3,260	
		$U_I = 7,0$ В, $I_0 = 10$ мА	4,950	5,050	
		$U_I = 6,5 \div 12$ В, $I_0 = 0 \div 1$ А	4,900	5,100	
Изменение выходного напряжения при изменении входного напряжения, мВ	К1254ЕН3АП1 – 1,8	$U_I = 16,3$ В, $I_0 = 10$ мА	4,900	5,100	-10÷100
		$U_I = 6,5 \div 12$ В, $I_0 = 0 \div 1$ А	4,900	5,100	
		$U_I = 6,5 \div 12$ В, $I_0 = 0 \div 1$ А	4,900	5,100	
	К1254ЕН3АП1 – 1,8	$U_I = 3,3 \div 12$ В, $I_0 = 0$ А	–	7,0	25±10
		$U_I = 3,8 \div 14,5$ В, $I_0 = 10$ мА	–	10	
		$U_I = 3,3 \div 12$ В, $I_0 = 0$ А	–	10	
	К1254ЕН3АП1 – 2,5	$U_I = 4,0 \div 12$ В, $I_0 = 0$ А	–	7,0	25±10
		$U_I = 4,5 \div 14,5$ В, $I_0 = 10$ мА	–	10	
		$U_I = 4,0 \div 12$ В, $I_0 = 0$ А	–	10	
	К1254ЕН3АП1 – 2,85	$U_I = 4,4 \div 12$ В, $I_0 = 0$ А	–	7,0	25±10
		$U_I = 4,85 \div 14,5$ В, $I_0 = 10$ мА	–	10	
		$U_I = 4,4 \div 12$ В, $I_0 = 0$ А	–	10	
	К1254ЕН3АП1 – 3,3	$U_I = 4,75 \div 12$ В, $I_0 = 0$ А	–	7,0	25±10
		$U_I = 5,3 \div 14,5$ В, $I_0 = 10$ мА	–	10	
		$U_I = 4,75 \div 12$ В, $I_0 = 0$ А	–	10	
	К1254ЕН3АП1 – 5,0	$U_I = 6,5 \div 12$ В, $I_0 = 0$ А	–	7,0	25±10
		$U_I = 7,0 \div 14,5$ В, $I_0 = 10$ мА	–	10	
		$U_I = 6,5 \div 12$ В, $I_0 = 0$ А	–	10	

Продолжение таблицы 2

Ток потребления, мА	K1254EH3AP1 – 1,8	$U_I = 6,8 \div 15 \text{ В}, I_0 = 0 \text{ А}$	–	10	25 ± 10
	K1254EH3AP1 – 2,5	$U_I = 7,5 \div 15 \text{ В}, I_0 = 0 \text{ А}$	–	10	25 ± 10
	K1254EH3AP1 – 2,85	$U_I = 7,85 \div 15 \text{ В}, I_0 = 0 \text{ А}$	–	10	25 ± 10
	K1254EH3AP1 – 3,3	$U_I = 12,0 \div 15 \text{ В}, I_0 = 0 \text{ А}$	–	10	25 ± 10
	K1254EH3AP1 – 5,0	$U_I = 12,0 \div 16,3 \text{ В}, I_0 = 0 \text{ А}$	–	10	25 ± 10
Изменение выходного напряжения при изменении тока нагрузки, мВ	K1254EH3AP1 – 1,8	$U_I = 3,8 \text{ В}, I_0 = 0 \div 1 \text{ А}$	–	10	25 ± 10
			–	20	$-10 \div 100$
	K1254EH3AP1 – 2,5	$U_I = 4,5 \text{ В}, I_0 = 0 \div 1 \text{ А}$	–	10	25 ± 10
			–	20	$-10 \div 100$
	K1254EH3AP1 – 2,85	$U_I = 4,85 \text{ В}, I_0 = 0 \div 1 \text{ А}$	–	10	25 ± 10
			–	20	$-10 \div 100$
	K1254EH3AP1 – 3,3	$U_I = 5,3 \text{ В}, I_0 = 0 \div 1 \text{ А}$	–	10	25 ± 10
			–	20	$-10 \div 100$
	K1254EH3AP1 – 5,0	$U_I = 7,0 \text{ В}, I_0 = 0 \div 1 \text{ А}$	–	10	25 ± 10
			–	20	$-10 \div 100$
Остаточное напряжение, В	K1254EH3AP1 – 1,8	$I_0 = 1,0 \text{ А}$	–	1,3	25 ± 10
	K1254EH3AP1 – 2,5				
	K1254EH3AP1 – 2,85				
	K1254EH3AP1 – 3,3				
	K1254EH3AP1 – 5,0				
Максимальный выходной ток, А	K1254EH3AP1 – 1,8	$U_I = 6,8 \text{ В}$	1,0	–	25 ± 10
	K1254EH3AP1 – 2,5	$U_I = 7,5 \text{ В}$			
	K1254EH3AP1 – 2,85	$U_I = 7,85 \text{ В}$			
	K1254EH3AP1 – 3,3	$U_I = 8,3 \text{ В}$			
	K1254EH3AP1 – 5,0	$U_I = 10,0 \text{ В}$			
Коэффициент подавления пульсаций, дБ	K1254EH3AP1 – 1,8	$U_I = 4,8 \text{ В}, I_0 = 1 \text{ А}$	60	–	25 ± 10
	K1254EH3AP1 – 2,5	$U_I = 5,5 \text{ В}, I_0 = 1 \text{ А}$			
	K1254EH3AP1 – 2,85	$U_I = 5,85 \text{ В}, I_0 = 1 \text{ А}$			
	K1254EH3AP1 – 3,3	$U_I = 6,3 \text{ В}, I_0 = 1 \text{ А}$			

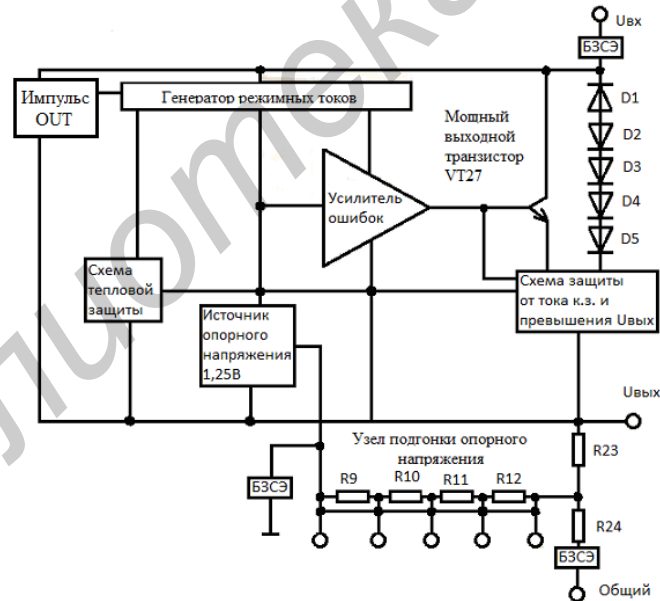


Рис. 2. Структурная схема микросхемы K1254EH3AP1

Для реализации источника опорного напряжения в микросхеме используется широко известная схема, работа которой основана на использовании напряжения, равного ширине запрещенной зоны кремния. Узел подгонки опорного напряжения обеспечивает устойчивость источника опорного напряжения к технологическим разбросам параметров элементной базы микросхемы. Масштабирование опорного напряжения для получения заданного ряда выходных напряжений осуществляется с помощью прецизионного делителя R23, R24 путем изменения сопротивления резистора R24. Усилитель ошибок представляет собой усилитель постоянного тока. Выходной транзистор VT27 спроектирован таким образом, чтобы были достигнуты требуемые параметры при максимально допустимых плотностях тока эмиттера и предельной

удельной мощности рассеивания, т.е. при минимальных геометрических размерах транзистора. Цепь защиты по мощности состоит из схемы защиты выходного транзистора от тока короткого замыкания и от превышения предельных входных напряжений, стабилитрона D1 и диодов D2, D3, D4, D5. Защита выходного транзистора осуществляется путем ограничения выходного тока микросхемы. Если температура кристалла повышается до 165–180 °С, то срабатывает схема защиты от перегрева, которая обесточивает источник опорного напряжения. Для минимизации влияния изменений входного напряжения и выходного тока на стабильность параметров микросхемы режимы работы основных узлов микросхемы задаются генератором стабильных режимных токов.

На рис. 3 условно показан блок защиты от статического электричества. Защита схемы от воздействия статического электричества реализована путем включения диодов D6, D7 и D8, сформированных включением мощных горизонтальных *p-n-p* транзисторов в диодный режим, в цепи питания, земли, а также проходной емкости C2 (рис. 3). В случае попадания на любой из выводов разряда статического электричества величиной, превышающей напряжение пробоя коллектор-эмиттер *p-n-p* транзистора, последний открывается и импульс статического электричества «сбрасывается» на землю, что предотвращает его воздействие на саму схему K1254ЕН3АП1.

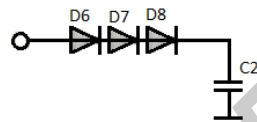


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная блока защиты от статического электричества

Заключение

По результатам проведенных исследований разработана конструкция и технология прецизионных стабилизаторов напряжения положительной полярности с низким остаточным напряжением и защитой от воздействия разрядов статического электричества. Разработаны несколько конструктивных вариантов приборов:

- в корпусе КТ-28 с выходными напряжениями 1,25, 1,8, 2,5, 2,85, 3,3 и 5,0 В;
- в корпусе КТ-27 с выходными напряжениями 1,25, 1,8, 2,5, 2,85, 3,3 и 5,0 В;
- в корпусе КТ-89 с выходными напряжениями 1,25, 1,8, 2,5, 2,85, 3,3 и 5,0 В;
- бескорпусные приборы с выходными напряжениями 1,25, 1,8, 2,5, 2,85, 3,3 и 5,0 В.

PRECISION VOLTAGE STABILIZERS OF POSITIVE POLARITY WITH THE LOW RESIDUAL VOLTAGE AND PROTECTING FROM ELECTROSTATIC DISCHARGE

Y.N. KRYVASHEYA

Abstract

Results of research and design of precision voltage stabilizers of positive polarity with low value of power failure and protecting from electrostatic discharge (K1254EN3AP1) with output voltage of 1,8 V, 2,5 V, 2,85 V, 3,3 V and 5 V, given in plastic cases КТ-28 (ТО-220), КТ-27 (ТО-126, КТ-89 (D-PAK) are reduced.

Список литературы

1. Горлов М.И. // Природа. 2006. № 12. С. 27–36.
2. Stephen G. Beebe. Characterization, modeling, and design of ESD protection circuits. California, 1998.

УДК 355.58:519.816

ОЦЕНКА ВЫБОРА РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА

Л.П. ПИЛИНЕВИЧ, Е.В. ГОНЧАРИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 12 декабря 2013

Данная работа посвящена разработке метода оценки устойчивости системы управления в условиях чрезвычайных ситуаций, позволяющей прогнозировать опасности и величину их воздействия на человека и материальные ценности. Рассмотрен учет основных факторов на примере оценки устойчивости системы управления при чрезвычайных ситуациях техногенного характера. Проанализированы оценочные функции и соответствующие им исходные позиции, такие как: оптимистическая, пессимистическая, позиция нейтралитета и позиция относительного пессимизма.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, опасные факторы, оценка, система управления, устойчивость работы.

Введение

На современном этапе развития цивилизации наблюдается рост количества чрезвычайных ситуаций (ЧС), в которых погибает все большее число людей, наносится ущерб их здоровью и имуществу [1]. Поэтому проблема предупреждения ЧС и минимизации ущерба от них является актуальной и своевременной. Опыт высокоразвитых стран показал, что предупреждение ЧС позволяет сократить в 10–15 раз затраты на ее ликвидацию [2]. Одним из основных путей предупреждения ЧС является оценка устойчивости системы управления при ЧС (оценка риска, уязвимости, ущерба, ресурсов и потенциала для предупреждения и ликвидации ЧС). В связи с этим целью данной работы является разработка метода оценки устойчивости системы управления в условиях ЧС, позволяющего прогнозировать опасности и величину их воздействия на человека и материальные ценности.

Теоретический анализ

Основные особенности, которые заложены в данной работе, заключаются в следующем:

- техногенная опасность считается основной;
- опасности по своей природе вероятностны;
- все источники техногенных опасностей, приводящих к ЧС, разделены по природе возникновения на три класса: 1) человеческий фактор; 2) технический (технологический) фактор; 3) фактор окружающей природной среды;
- мерой опасности является риск, одновременно учитывающий возможность возникновения ЧС и оценку, в той или иной форме, величины риска;
- устойчивость системы управления интерпретируется свойством системы выполнять заданные функции не только в нормальных условиях, но и в ЧС.

Оценка устойчивости объекта в условиях техногенных ЧС является комплексной величиной и основана на оценке технического состояния оборудования, техники, технологии, человеческого фактора и внешних опасных и вредных условий. В соответствии с поставленной целью в данной работе рассмотрим эти факторы на примере оценки устойчивости системы

управления при ЧС техногенного характера. Устойчивость системы управления в ЧС можно условно разбить на две составляющие: принятие решения о переходе в режим управления работой промышленного объекта в ЧС и управление объектом с помощью систем оповещения. В настоящее время все чаще возникает потребность в принятии сложных решений. В связи с этим целесообразно рассмотреть некоторые условия, которые формализуют этот процесс и придают решениям большую надежность. Критерием оценки устойчивости системы управления при ЧС будем считать величину риска R .

Поскольку в технике существенную роль играют количественные оценки событий (например, что произойдет событие A (ЧС)), то определение риска должно учитывать, как оценку (в той или иной форме) риска, так и оценку вероятности его наступления P .

$$R = P(A), \quad (1)$$

где A – множество событий, включающее события $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$, при которых может возникнуть ЧС.

Тогда $P(A) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot P(A_3) \cdot \dots \cdot P(A_n)$. Риск в общем случае подразделяется на две большие группы: 1) риск для материальных ценностей; 2) риск для жизни или здоровья. Структурная схема оценки риска при принятии решения представлена на рис. 1. Каждой группе присуще свое представление риска. При угрозе материальным ценностям последствия (значения оценки) риска часто представляют в денежном выражении.



Рис. 1 Структурная схема оценки риска при принятии решения

При угрозе материальным ценностям и невозможности количественно выразить возможный ущерб, можно этот ущерб оценить приблизительно и продолжать рассмотрение проблемы на основе недостаточной информации.

Поскольку целесообразно идти на сколь угодно большие затраты, чтобы устранить риск полностью, нужно в первую очередь оценивать угрозу людям [2]. Однако субъективные оценки тех или иных нежелательных событий сильно различаются. Например, значения риска привлекательной деятельности обычно занижаются [3]. Риск события, на которое трудно или невозможно оказать влияние, наоборот, обычно переоценивается. Риск события катастрофического характера, как правило, тоже получает более высокую оценку. Поэтому субъективные оценки не могут быть положены в основу решений в системе управления при ЧС. Сравнение данной рискованной ситуации с возникавшими в прошлом аналогичными ситуациями дает для оценки риска более надежные исходные предпосылки. Однако проблема оценки этим не решается. В некоторых случаях можно довольствоваться требованием, чтобы допустимый риск был заведомо ниже имевшего место в аналогичных ситуациях ранее. Но

тогда в других случаях, особенно при очень высоком уровне затрат, проблема остается нерешенной.

В нашем случае любой математический алгоритм оценки риска должен исходить из того, что установлен экономический эквивалент угрозы. Этот эквивалент может быть обоснован в том смысле, что он соответствует затратам, которые общество при данных условиях может себе позволить, чтобы предотвратить или уменьшить угрозу. Необходимо воспрепятствовать тому, чтобы, с одной стороны, ценой больших затрат был уменьшен и без того незначительный риск, а с другой – чтобы оставался большой риск, который можно было устранить при небольших затратах. Но установление экономического эквивалента еще не означает достижения успеха. Чаще всего эквивалент такого типа не удается получить без влияния субъективных факторов. Тем не менее эти эквиваленты делают более ясным риск при принятии решения и помогают лучше определить ответственность за сделанную оценку.

В общем, процедура принятия решения с риском подразделяется на последовательную реализацию трех вариантов решений: с уменьшением риска; с минимизацией риска; с оптимизацией риска.

Границы оправданного риска при решении расчетных или эксплуатационных технических задач трудно рационально обосновать. В этих случаях стараются использовать сравнение с риском в аналогичных ситуациях. При этом следует принимать в расчет наиболее неблагоприятный случай.

Риск летального исхода в народном хозяйстве существует на уровне 10^{-6} и ниже на человека в год [3]. Таким образом, при проектировании эксплуатации технических устройств риск на уровне 10^{-6} на человека в год может быть принят допустимым при выполнении следующих требований к анализу риска:

- проблема риска проанализирована, т.е. оценена вероятность наступления неблагоприятного события, вероятность его перерастания в ЧС, рассмотрены все поражающие факторы ЧС и т.д.;

- анализ проведен до принятия решения и подтвержден имеющимися данными в определенном временном интервале;

- после наступления неблагоприятного события анализ и заключение о риске, полученные на основании имевшихся данных, не меняются;

- анализ показывает, и результаты контроля все время подтверждают, что угроза не может быть уменьшена ценой оправданных затрат.

Однако это значение не следует рассматривать как оправданный предел – оно должно служить лишь основой относительной шкалы принимаемых решений. Из сказанного также следует, что нецелесообразно задавать детерминированную границу риска. Таким образом, более приемлемыми параметрами являются вероятность P_v , отделяющая оправданный риск летального исхода от условно оправданного, и вероятность P_u , отделяющая условно оправданный риск, т.е. соответствующий определенным условиям, от неоправданного риска. Условия, при которых вероятность риска летального исхода P_i находится в диапазоне $P_v < P_i \leq P_u$, обеспечиваются указанными выше четырьмя требованиями к анализу риска. Принимающий решения должен соблюдать эти требования, соотнося изменяющийся риск, например, с повышением максимально достижимой эффективности, исключением неблагоприятных ситуаций и т.п. Для риска летального исхода значение вероятности оправданного риска P_v принимают равным 10^{-8} , а значение неоправданного риска P_u – равным 10^{-5} . Таким образом, если речь идет исключительно о риске материальных потерь, метод сравнения при оценке риска не вызывает сомнений. В этом случае можно принимать решения, оценивая лишь экономический эффект.

Вместе с тем ситуация принятия (выбора) решения содержит элементы, влияющие как на саму процедуру, так и на качество решения. Факторы, влияющие на принятие решения, занимают диапазон от крайне субъективных, определяемых осведомленностью лица, принимающего решение, и проявляющихся в ускоренном выборе или затягивании решения, до таких объективных условий как технические данные, характеристики, модели, всевозможные вспомогательные средства. Наблюдения показывают, что при принятии технико-экономических решений часто исходят из интуиции и жизненного опыта [4].

По используемым для принятия решения способам оптимизации решения можно разбить на три группы: 1) эмпирические; 2) опирающиеся на некоторые количественные сравнительные оценки; 3) принятые на основании построенной с исчерпывающей полнотой модели.

Значение возможной ошибки находится в обратной зависимости от степени точности описания задачи и затраченным на выбор решения усилиям и является наибольшим при эмпирических решениях.

Процесс принятия решения, как правило, имеет следующие последовательные этапы: 1) появление проблемы; 2) описание проблемы; 3) анализ ситуации, постановка задачи; 4) анализ имеющейся информации; 5) дискретизация и комбинирование внешних условий; 6) выработка альтернатив (и тем самым управление риском); 7) расчет и оценка последствий; 8) выбор рациональных альтернатив; 9) проверка результатов; 10) оформление решения.

Ситуации принятия решения могут характеризоваться единственной или множественными целями. К ориентированным на единственную цель относятся решения, последствия которых могут быть описаны единственной, например финансовой, категорией параметров, таких как цена, затраты, прибыль или ущерб. При многоцелевых решениях оценить и сравнить отдельные цели в единых универсальных единицах нельзя.

Для оценки устойчивости системы управления в ЧС следует учитывать, что существуют такие факторы как недостаток времени и недостаток информации для принятия рационального решения. Поэтому приходится считаться с возможностью различных результатов для одного и того же решения, т. е. принятие решения не является чисто рациональным процессом.

Для ситуации выбора решений часто характерна неопределенность имеющейся информации, которая может быть следствием погрешности в определении параметра.

Принятие решения представляет собой выбор одного решения E_i из некоторого множества рассматриваемых вариантов, т.е. $E_i \in E$. Наиболее часто встречается случай, характеризующийся конечным числом вариантов (причем обычно не слишком большим) $E_1, E_2, E_3 \dots E_i, E_m$. Предполагается, что каждым вариантом E_i однозначно определяется некоторый результат e_i . Эти результаты должны допускать количественную оценку. Для простоты оценки будем отождествлять с соответствующими результатами, обозначая их тем же символом e_i . Как правило, задача состоит в поиске наилучшего варианта с наибольшим значением результата, т. е. целью выбора является нахождение $\max e_i$. При этом предполагается, что оценки e_i характеризуют такие, например, величины, как полезность, надежность, выигрыш (преимущество) и др. Оценку затрат или потерь можно исследовать путем минимизации этих потерь, как это делается чаще, рассматривая отрицательные значения полезности, надежности и др.

Тогда выбор оптимального варианта решения согласно работе [4] будем производить с помощью критерия E_0 :

$$E_0 = \{E_{i0} \mid E_{i0} \in E \wedge e_{i0} = \max_i e_i\}. \quad (2)$$

Множество E_0 оптимальных вариантов состоит из тех вариантов E_{i0} , которые принадлежат множеству E всех вариантов и оценка e_{i0} которых максимальна среди всех оценок e_i . Выбор оптимального варианта в соответствии с критерием (2) не является однозначным, поскольку максимальный результат e_i может достигаться многократно. Необходимость выбирать одно из нескольких одинаково приемлемых решений на практике обычно не создает дополнительных трудностей.

Рассмотренный случай принятия решений, при котором каждому варианту решения соответствует единственное состояние системы (и тем самым однозначно определяется единственный результат) и который может быть назван случаем детерминированных решений, с точки зрения его практических применений является простейшим, хотя и весьма частым. Детерминированные решения, несмотря на некоторую элементарность, могут лежать в основании реальных процедур принятия более сложных решений. В этих случаях каждому допустимому варианту решения E_i вследствие различных внешних условий могут соответствовать различные внешние состояния (условия) F_j и результаты e_{ij} решений, которые представлены в табл. 1. Семейство решений описывается матрицей [4].

Таблица 1. Семейство принятия сложных решений

Допустимый вариант решения E_i	Различные внешние состояния (условия) F_j и результаты e_{ij} решений						
	F_1	F_2	F_3	...	F_j	...	F_n
E_1	e_{11}	e_{12}	e_{13}	...	e_{1j}	...	e_{1n}
E_2	e_{21}	e_{22}	e_{23}	...	e_{2j}	...	e_{2n}
...
E_i	e_{i1}	e_{i2}	e_{i3}	...	e_{ij}	...	e_{in}
...
E_m	e_{m1}	e_{m2}	e_{m3}	...	e_{mj}	...	e_{mn}

Чтобы прийти к однозначному и по возможности наивыгоднейшему варианту решения даже в том случае, когда каким-то вариантам решений E_i могут соответствовать различные условия F_j , вводят подходящие оценочные (целевые) функции. При этом матрица решений $\|e_{ij}\|$ сводится к одному столбцу. Каждому варианту E_i приписывается, таким образом, некоторый результат e_{ir} , характеризующий в целом все последствия этого решения. Результат в дальнейшем обозначается тем же символом e_{ir} . Процедура выбора можно теперь представить по аналогии с применением критерия (2). Однако возникает вопрос о смысле результата e_{ir} . Если, например, последствия каждого из альтернативных решений характеризовать комбинацией из его наибольшего и наименьшего результатов, то

$$e_{ir} = \min_i e_{ij} + \max_j e_{ij}. \quad (3)$$

Наилучший в этом смысле вариант имеет вид: $\max_i e_{ir} = \max_i (\min_j e_{ij} + \max_j e_{ij})$. (4)

Теперь решение можно вновь искать в соответствии с критерием (2). Формируя таким образом желаемый результат, можно исходить из компромисса между оптимистическим и пессимистическим подходами. Рассмотрим некоторые оценочные функции и соответствующие им исходные позиции.

Оптимистическая позиция представляется следующим образом:

$$\max_i = \max_i (\max_j e_{ir}). \quad (5)$$

Из матрицы результатов решений e_{ij} табл. 1 выбирается вариант (строка), содержащий в качестве возможного следствия наилучший из всех возможных результатов.

Позиция нейтралитета имеет несколько отличный вид:

$$\max_i e_{ir} = \max_i \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \right). \quad (6)$$

Здесь мы исходим из того, что все встречающиеся отклонения результата решения от среднего случая допустимы, и с учетом этого выбирает оптимальные варианты (в этом случае риск минимален).

Пессимистическая позиция представляется выражением

$$\max_i e_{ir} = \max_i (\min_j e_{ij}). \quad (7)$$

В этом случае исходим из того, что необходимо ориентироваться на наименее благоприятный случай и приписываем каждому из альтернативных вариантов наихудший из возможных результатов (риск получения «ошибочного» результата максимален). После этого выбираем самый выгодный вариант, т.е. ожидаем наилучшего варианта в наихудшем случае. Для каждого иного внешнего состояния результат может быть только равным этому или лучшим.

Позиция относительного пессимизма:

$$\min_i e_{ir} = \min_i \max_j (\max_i e_{ij} - e_{ij}). \quad (8)$$

Результаты и их обсуждение

Для каждого варианта решения оцениваем потери, сравнивая результат с определенным по каждому варианту наилучшим результатом, а затем из совокупности наихудших результатов

выбирает наилучший согласно соответствующей оценочной функции. В табл. 2 представлена оценка решения и оценочные функции принятия решения для всех позиций.

Таблица 2. Оценка решения и оценочные функции принятия решения для всех позиций

№ п/п	Оценочная функция	Оценка решения
1	$\max_i \min_j e_{ij}$	$A = k S_{\max}$
2	$\max_i \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij}$	$A = k \sqrt{\frac{1}{3}(S_{\max}^2 + S_{\max} S_{\min}) + S_{\min}^2}$
3	$\min_j \max_i (\max_i e_{ij} - e_{ij})$	$A = k \sqrt{S_{\max} S_{\min}}$
4	$\max_i \min_j e_{ij}$	$A = k S_{\min}$

Полученные результаты принятия решения по оптимистической позиции и позициям нейтральной, пессимистической и относительного пессимизма сведены в табл. 2. Здесь показан пример выбора параметра A при неизвестной величине S с использованием всех четырех оценочных функций. Получаемые результаты зависят только от максимального S_{\max} и минимального S_{\min} значений; k – коэффициент пропорциональности.

Предложенный ряд таких оценочных функций может быть продолжен. Некоторые из них получили достаточно широкое практическое применение. Так, если условия эксплуатации заранее неизвестны, ориентируются обычно на наименее благоприятную ситуацию. Это соответствует оценочной функции (7). Однако нередко используются также функции (6) и (8). Оценочная функция (3) до настоящего времени в приложениях применялась крайне редко.

Структура таблицы соответствует упорядочению по росту влияния величины S_{\min} (это влияние нарастает от строки к строке). При этом выбор определяется исключительно позицией руководителя, т. е. на основе его личной профессиональной подготовленности, производственного опыта и интуиции.

Заключение

Рассмотрев оценочные функции и оценки решения можно сделать вывод, что при оценке принятия решения управлением работой промышленного объекта в ЧС при недостатке информации о последствиях воздействия поражающих факторов источников ЧС и недостатке времени для принятия решения следует ориентироваться на наименее благоприятную ситуацию, т.е. на позицию пессимизма (№ 1 табл. 2). Такой подход позволит минимизировать последствия ЧС для экономики и здоровья людей, а также для окружающей среды.

EVALUATION OF THE DECISION MAKING OF THE CONTROL SYSTEM DURING EMERGENCIES OF MAN-INDUCED NATURE

L.P. PILINEVICH, A.V. HANCHARYK

Abstract

This work is devoted to the development of the evaluation method of the control system sustainability during the emergencies that will allow to predict the hazards and their affect scope on human and tangible assets. The account of the principal factors has been considered on the basis of the control system sustainability evaluation during the emergencies of man-induced nature. The evaluation functions have been analysed as well as the corresponding starting positions such as optimistic, pessimistic, neutral and relatively pessimistic.

Список литературы

1. Дорошко С.В., Ролевич И.В., Пустовит В.Т. Защита населения и объектов в чрезвычайных ситуациях. Радиационная безопасность. Часть 1. Чрезвычайные ситуации и их предупреждение. Минск, 2010.
2. Левкевич В.Е. Экологический риск – закономерности развития, прогноз и мониторинг. Минск, 2004.
3. Инженерная экология / Под ред. В.Т. Медведева. М., 2002.
4. Беляев Л.С. Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределенности. Новосибирск, 1978.

УДК 537.876.23+543.42:621.373

ФОТОЛИТОГРАФИЯ НА ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ КСЕРОГЕЛЬ/ПОРИСТЫЙ АНОДНЫЙ ОКСИД АЛЮМИНИЯ, СФОРМИРОВАННЫХ В РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Л.С. ХОРОШКО, А.М. АШАРИФ, Т.И. ОРЕХОВСКАЯ, М.В. МЕЛЕДИНА, В.А. СОКОЛ,
Б.С. КОЛОСНИЦЫН, Н.В. ГАПОНЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 31 марта 2014

Приведены результаты исследования морфологии микроструктурированных пленок пористого анодного оксида алюминия, сформированных с применением электрохимического анодирования, золь-гель синтеза, фотолитографии и химического травления. Для выполнения фотолитографии защитная металлическая маска не использовалась за счет формирования сплошной пленки ксерогеля. Обсуждаются перспективы применения таких структур в планарной оптоэлектронике и фотокатализе.

Ключевые слова: пористый анодный оксид алюминия, золь-гель, фотолитография.

Введение

С применением фотолитографии на пористом анодном оксиде алюминия (ПАОА) малой толщины (~5 мкм) можно получить микроструктурированные пленки с различной конфигурацией рисунка в соответствии с фотошаблоном [1, 2]. Изготовление микроструктур требует формирования на поверхности оксида защитной металлической маски, что является технологически сложной и достаточно дорогостоящей операцией. В качестве защитного покрытия перед нанесением фоторезиста как альтернативу металлической маске можно использовать пленки, сформированные золь-гель методом (ксерогели) различного состава, способные планаризовать рабочую поверхность [3]. В качестве таких материалов могут использоваться, например, ксерогели оксидов титана, кремния, алюминия, алюмоиттриевые композиты и др. Селективное травления в окнах литографической маски также позволяет создать структуры с конфигурацией, содержащей канавки травления – волновода, а легирование ксерогелей ионами с различной длиной волны люминесценции расширяет область их возможного применения.

При изготовлении таких структур предусмотрено выполнение ряда операций:

- непосредственно изготовление упорядоченной матрицы ПАОА;
- нанесение легированных и/или нелегированных ксерогелей, формирующих на ПАОА ровную поверхность;
- нанесение фоторезиста и фотолитография с формированием рисунка согласно фотошаблону;
- химическое травление в окнах литографической маски с использованием селективных травителей;
- удаление фоторезиста.

В данной работе приведены результаты морфологического анализа микроструктурированных пленок пористого анодного оксида алюминия, сформированных с применением электрохимического анодирования, золь-гель синтеза, фотолитографии и химического травления и обсуждается маршрут изготовления подобных структур.

Методика эксперимента

При подготовке образцов микроструктурированных пленок анодного оксида алюминия выполнялись следующие операции.

I. Синтез ПАОА с требуемой морфологией в различных режимах: для повышения упорядоченности оксида использовался двухстадийный процесс анодного окисления в различных электролитах – ортофосфорной кислоте с концентрацией 9,8 %, щавелевой кислоте с концентрацией 3,6 %, смеси серной и щавелевой кислот.

II. Формирование ксерогеля на поверхности анодного оксида: золи наносились центрифугированием с промежуточной сушкой каждого слоя на воздухе при температуре 100-200 °С, нанесением 8–10 слоев достигалось полное закрытие устьев пор и планаризация поверхности образца.

III. Нанесение фоторезиста и выполнение фотолитографии.

IV. Анизотропное травление в окнах фотолитографической маски: осуществлен выбор травителя, температуры процесса и времени травления – раствор на основе хромового ангидрида и ортофосфорной кислоты, раствор фторида аммония в соляной кислоте, раствор плавиковой кислоты.

В таблице приведены изображения, поясняющие описанные этапы синтеза микроструктурированных пленок.

Последовательность операций формирования микроструктурированной пленки пористого анодного оксида алюминия

№ п/п	Операция	Условное графическое отображение
1	Формирование высокоупорядоченного пористого анодного оксида алюминия	
2	Нанесение ксерогеля: – заполнение пор; – планаризация поверхности	
3	Формирование маски фоторезиста	
4	Выполнение фотолитографии согласно фотошаблону	
5	Анизотропное травление в окнах литографической маски	
6	Удаление фоторезиста	

ПАОА получали электрохимическим анодированием алюминиевой фольги, процесс проходил в две стадии, полученный на первой стадии анодный оксид селективно стравливали в растворе, содержащем хромовый ангидрид и ортофосфорную кислоту при температуре 60–70 °С. Вторая стадия анодирования проходила в условиях, идентичных первой. Выбирались следующие режимы анодирования: в фосфорнокислом электролите температура процесса

поддерживалась на уровне 10–12 °С при напряжении 100 В; в щавелевокислом электролите – 12–15 °С при напряжении 30 В, в комбинированном электролите 12–15 °С при напряжении 20 В. Готовые пленки сушили на воздухе при температуре 100 °С в течение получаса.

Для формирования пленок ксерогелей состава 40%TiO₂/60%Eu₂O₃, а также нелегированных зольей диоксида титана использовали золи на основе раствора тетраэтокситатана [3]. Золи наносились на готовые подложки центрифугированием (скорость 2700 об/мин, продолжительность операции 30 сек), каждый слой высушивался на воздухе при температуре 100–200 °С в течение 10–15 мин, затем формировался следующий. Окончательно структуры ксерогель/ПАОА отжигались в течение 30 мин при температуре 400–500 °С.

Для проведения фотолитографии в соответствии с рисунком тестового фотошаблона на поверхность образцов наносили позитивный фоторезист FP-S 1831. Селективное травление оксида алюминия в окнах литографической маски проводили в течение 3–6 мин в зависимости от типа и температуры травителя. Полученные структуры исследовались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Результаты и их обсуждение

При анодировании в ортофосфорной кислоте в описанных выше режимах, получается пористый оксид с достаточно большим (90–100 нм) диаметром пор [4], что затрудняет формирование однородной пленки ксерогеля: даже при формировании 10 слоев не удается полностью закрыть устья пор и планаризовать поверхность оксида. Анизотропное травление такой структуры через маску фоторезиста приводит к образованию неровного края канавки травления вследствие затекания травителя под маску. Частичное проникновение фоторезиста в каналы пор затрудняет его удаление при последующих операциях фотолитографии (рис. 1).

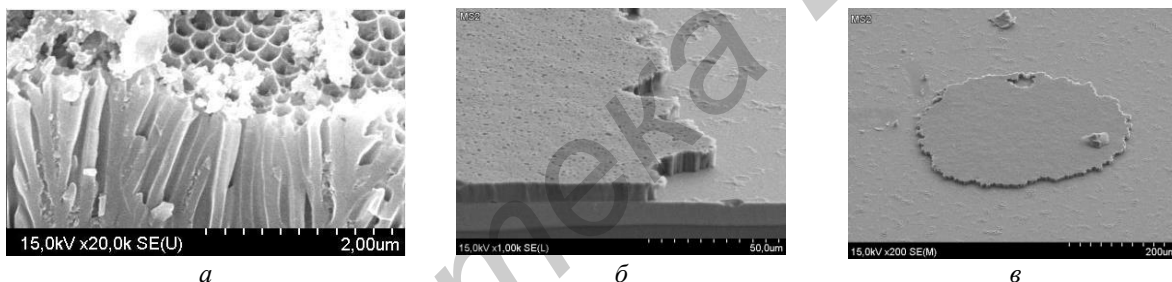


Рис. 1. Микроструктурированные пленки ПАОА, сформированного в фосфорнокислом электролите на разных этапах синтеза: *а* – после формирования 10 слоев ксерогеля диоксида титана; *б, в* – после фотолитографии и анизотропного травления в растворе на основе хромового ангидрида и ортофосфорной кислоты и удаления фоторезиста

При использовании других электролитов диаметр пор анодного оксида может варьироваться в диапазоне 30–50 нм (щавелевокислый электролит) и 20–30 нм (комбинированный электролит), что позволяет планаризовать поверхность оксида при формировании 8 слоев ксерогеля оксида титана. На рис. 2 представлены РЭМ-снимки пленок ПАОА, полученных в комбинированном электролите (10–15 % серной кислоты с прибавлением 2–5 % щавелевой) после фотолитографии и травления в растворе, содержащем хромовый ангидрид и фосфорную кислоту. При меньшем диаметре пор по-прежнему наблюдается затекание травителя под маску фоторезиста.

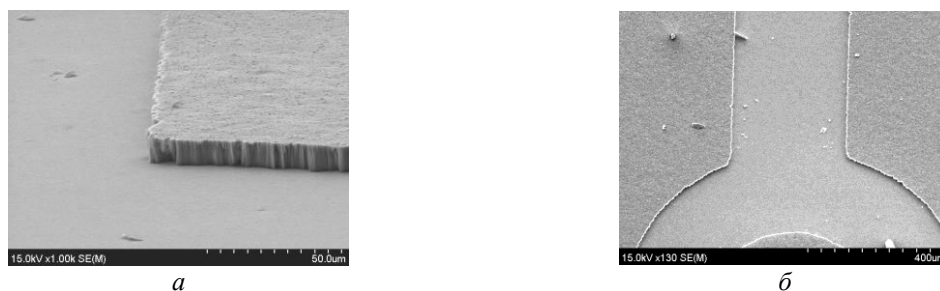


Рис. 2. Микроструктурированные пленки ПАОА, полученные в комбинированном электролите после фотолитографии и анизотропного травления в растворе на основе хромового ангидрида и ортофосфорной кислоты при температуре 90–95 °С в течение 3–5 мин

При использовании алюминия с меньшим диаметром пор возможно получить более ровную вертикальную стенку канавки травления. Использование селективных травителей, содержащих фторид-ионы, также дает лучший по сравнению с хромсодержащими травителями результат (рис. 3).

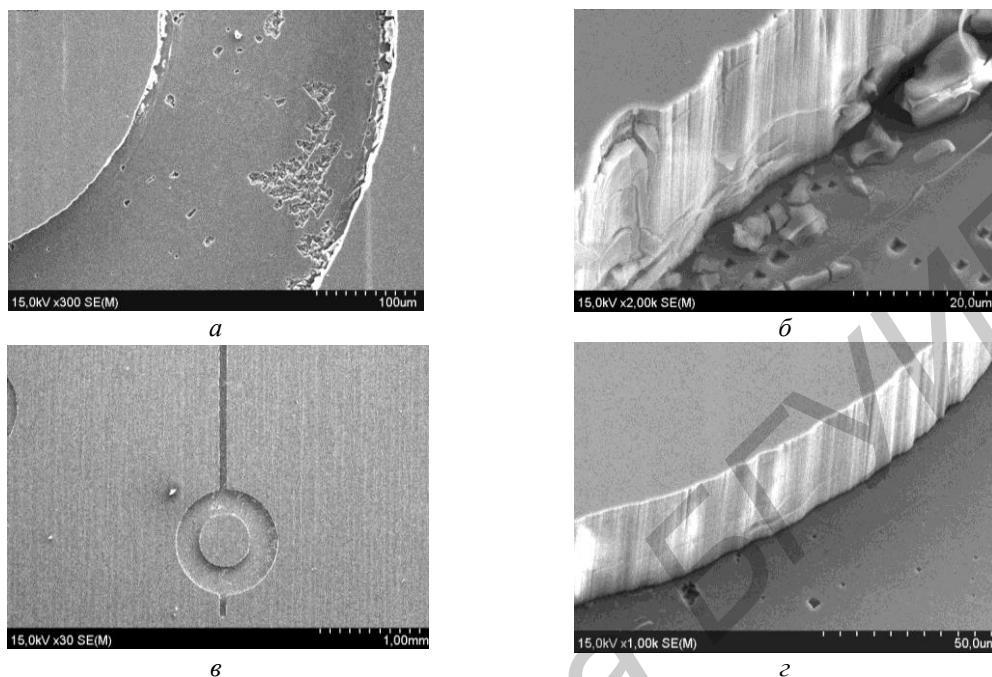


Рис. 3. Микроструктурированные пленки ПАОА, полученные в комбинированном электролите после фотолитографии и анизотропного травления:

а, б – в 2%-ном растворе плавиковой кислоты при температуре 21 °С в течение 4 мин;
в, г – в 5%-ном растворе фторида аммония в соляной кислоте при температуре 21 °С в течение 5 мин

Таким образом, для эффективной планаризации поверхности ПАОА ксерогелем оксида титана целесообразно использовать ПАОА с диаметром поры до 50 нм: при этом формирование восьми слоев ксерогеля приводит к заполнению устьев пор оксидом титана. Вертикальные стенки с меньшим числом дефектов получаются при травлении ПАОА через литографическую маску в растворе фторида аммония в соляной кислоте по сравнению с травлением в растворе плавиковой кислоты и травителем на основе хромового ангидрида и ортофосфорной кислоты.

Подобные структуры, содержащие продольные канавки травления и ксерогели оксида титана в фазе анатаза, с нашей точки зрения, являются перспективными для экологического фотокатализа благодаря развитой поверхности, увеличивающей плоскость контакта оксида титана с загрязненным раствором. На рис. 4 представлены РЭМ-снимки таких структур, содержащих дополнительные слои оксида титана. Ксерогель формируется как на поверхности образца, так и в канавке травления.

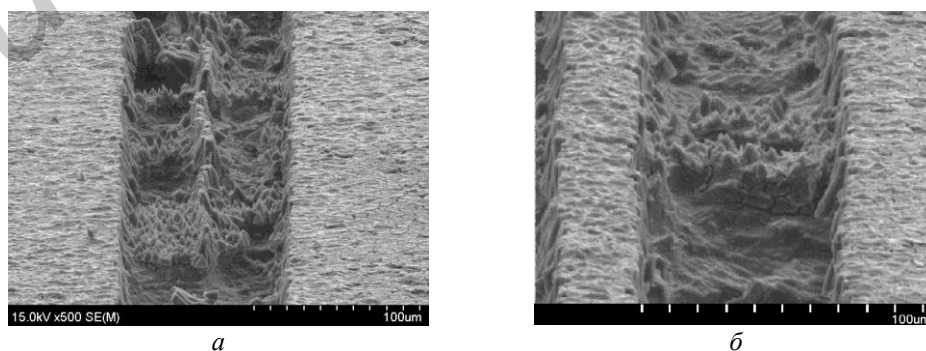


Рис. 4. Микроструктурированные пленки ПАОА, сформированные с применением золь-гель синтеза, фотолитографии и анизотропного травления, содержащие дополнительные слои ксерогеля диоксида титана: *а* – двоянная канавка травления; *б* – кластер ксерогеля в канавке травления

Дальнейшее улучшение технологии будет направлено на улучшение качества канавок травления и исследование их влияния на деградацию органических соединений в водных растворах при фотокатализе [5].

Заключение

Методом растровой электронной микроскопии проведен анализ морфологии микроструктурированных пленок ПАОА, сформированных электрохимическим анодированием на алюминиевой фольге с дальнейшим применением золь-гель технологии, фотолитографии и химического травления структуры ксерогель/ПАОА без использования защитной металлической маски. Получены элементы, которые могут в дальнейшем исследоваться в качестве планарных волноводных структур и резонаторов в форме микродисков для применения в планарной оптоэлектронике. Учитывая возможность легирования ксерогелей лантаноидами со спектром люминесценции в оптическом диапазоне, такие микроструктурированные пленки интересны с точки зрения распространения в них электромагнитного излучения и формирования резонансных мод. Синтезированные образцы, содержащие канавки травления в структурах ксерогель оксида титана/ПАОА также представляют интерес для проведения дальнейших исследований по фотокаталитической очистке воды.

PHOTOLITHOGRAPHY OF FILM STRUCTURES XEROGEL/POROUS ANODIC ALUMINA PREPARED IN VARIOUS ELECTROLYTES

L.S. KHOROSHKO, A.M. ASHARIF, T.I. OREKHOVSKAYA, M.V. MELEDINA, V.A. SOKOL,
B.S. KOLOSNITSIN, N.V. GAPONENKO

Abstract

The results of study the morphology of the microstructured porous anodic alumina films formed using electrochemical anodization, sol-gel synthesis, photolithography and chemical etching are given. The metal mask was not used in photolithography, because of fabrication the continuous xerogel film. The perspective of application of these structures in planar optoelectronics and photocatalyses are discussed.

Список литературы

1. *Лыньков Л.М., Мухуров Н.И.* Микроструктуры на основе анодной алюмооксидной технологии. Минск, 2002.
2. *Сокол В.А.* Анодные оксиды алюминия: монография. Минск, 2011.
3. *Гापоненко Н.В.* Пленки, сформированные золь-гель методом на полупроводниках и в мезопористых матрицах. Минск, 2003.
4. *Хорошко Л.С., Ашариф А.М., Меледина М.В. и др.* // Матер. 50 МНТК БГУИР. Ч. 2. Минск, 18–19 марта 2014 г. С. 28–29.
5. *Khoroshko L., Nikolaenko I., Asharif A. et al.* // Proceedings of the International conference «Nanomeeting-2013», Minsk. May 28–31 2013. P. 503–505.

УДК 616.711

ОБЪЕКТИВИЗАЦИЯ НАРУШЕНИЙ БИОМЕХАНИКИ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА ПО ДАННЫМ ВИДЕОАНАЛИЗА У ПАЦИЕНТОВ С НЕВРОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЯВЛЕНИЯМИ ОСТЕОХОНДРОЗА

С.А. ЛИХАЧЕВ, С.В. ЕЛЕНСКАЯ *, В.В. ВАЩИЛИН, И.С. ГУРСКИЙ

ГУ «РНПЦ неврологии и нейрохирургии»
Скорины, 24, 220030, Минск, Беларусь

*ГУ «Республиканский госпиталь Департамента финансов и тыла МВД Республики Беларусь»
Золотая Горка, 4, 220005, Минск, Беларусь

Поступила в редакцию 1 апреля 2014

Разработан новый метод объективизации движений в поясничном отделе позвоночника. Метод осуществляется за счет видеорегистрации цветowych маркеров, размещенных на коже над остистыми отростками позвонков поясничного отдела позвоночника. Приведен математический инструмент для обработки полученных данных.

Ключевые слова: позвоночник, остеохондроз, функциональные пробы, видеорегистрация, видеоанализ движений.

Введение

Оценка движений позвоночника важна для диагностики вертеброгенных заболеваний, сопровождающихся поясничными или шейными болевыми синдромами, повышением мышечного тонуса, ограничением объема движений. В клинической практике оценка движений в позвоночнике проводится врачом путем визуального наблюдения за движениями анатомических ориентиров при выполнении пациентом определенных функциональных проб, таких как наклоны вперед, назад, вправо и влево [1]. Подобная оценка движений позвоночника в значительной степени субъективна.

Используемые угломеры требуют затраты времени и оценка углов также субъективна. Для измерения подвижности позвоночника во фронтальной плоскости может использоваться транспортер со стрелкой [2]. Широко используются в объективизации патологии позвоночника рентгенологические методы, в которых положение позвонков в процессе выполнения функциональных проб оценивают, просвечивая рентгеновскими лучами соответствующий отдел позвоночника [3]. Однако частое применение рентгенологических методов ограничено допустимой лучевой нагрузкой.

Целью работы явилась разработка метода объективизации движений поясничного отдела позвоночника во фронтальной плоскости у пациентов с неврологическими проявлениями поясничного остеохондроза (НППО) с помощью видеоанализа. Сущность способа заключается в регистрации видеокамерой максимальных наклонов пациента вправо и влево (функциональных проб), с последующей обработкой на компьютере полученных видеоизображений.

Методика исследования

Способ реализуют следующим образом: на коже пациента над остистыми отростками Th12, L1, L2, L3, L4, L5, S1 позвонков закрепляют маркеры, выполненные в виде окрашенных в красный цвет полимерных сфер на плоском основании. Исследование проводят в обычных условиях освещенности рассеянным светом. Посредством цифровой видеокамеры с частотой

30 кадров в секунду с расстояния 1 м регистрируют цветное видеоизображение маркеров в процессе выполнения следующих функциональных проб: наклоны влево и наклоны вправо.

Для выполнения наклона влево пациент из исходной позиции с максимально комфортной скоростью наклоняется влево, скользя левой рукой вдоль бедра (насколько возможно, без ротации и наклонов вперед и назад), до ощущения боли или достижения максимально возможного объема движений в этом направлении. Затем пациент медленно возвращается в исходную позицию. После этого он выполняет наклон вправо аналогичным образом (рис. 1).



Рис. 1. Динамика движений пациента

Способ обработки полученных данных

На полученном с камеры изображении цвет каждого пикселя задается тремя числами: R , G , B , характеризующими интенсивность красного, зеленого и синего компонентов соответственно.

Для сравнения цвета пикселей изображения с известным цветом маркера изображение представляют в цветовом пространстве HSV.

Значение H («оттенок») рассчитывают по формуле:

$$H = \begin{cases} H_0 + \pi, & \text{при } (2R - G - B) = 0 \text{ AND } (G - B) = 0, \\ \arctan\left(\frac{0,866025404 \cdot (G - B)}{0,5 \cdot (2R - G - B)}\right), & \text{при } (2R - G - B) \neq 0 \text{ OR } (G - B) \neq 0, \end{cases}$$

где H_0 – известный оттенок цвета маркера; R , G и B – интенсивность красного, зеленого и синего компонентов пикселя соответственно.

Значение S («насыщенность») рассчитывают по формуле:

$$S = \begin{cases} 0, & \text{при } \max(R, G, B) = 0, \\ \frac{(\max(R, G, B) - \min(R, G, B))}{\max(R, G, B)}, & \text{при } \max(R, G, B) \neq 0, \end{cases}$$

где R , G и B – интенсивность красного, зеленого и синего компонентов пикселя соответственно; $\max(R, G, B)$ – наибольшее из значений R , G и B ; $\min(R, G, B)$ – наименьшее из значений R , G и B .

Величину D , характеризующую степень соответствия цвета пикселя известному цвету маркера, рассчитывают по формуле:

$$D = \frac{255 \cdot S}{1 + 4 \cdot (\sin(H_0) - \sin(H))^2 + 4 \cdot (\cos(H_0) - \cos(H))^2},$$

где S и H – значения насыщенности и оттенка цвета пикселя, H_0 – значение оттенка цвета маркера. Чем больше величина D , тем больше цвет пикселя соответствует цвету маркера.

Значение функции $W(x, y, r)$, характеризующей степень соответствия изображению маркера с координатами центра (x, y) и радиусом r рассчитывают по формуле:

$$W(x, y, r) = r \cdot \left(\frac{\sum_{(i-x)^2+(j-y)^2 \leq r^2} D_{i,j}}{\sum_{(i-x)^2+(j-y)^2 \leq r^2} 1} - \frac{\sum_{(i-x)^2+(j-y)^2 \in [r^2, (2r)^2]} D_{i,j}}{\sum_{(i-x)^2+(j-y)^2 \in [r^2, (2r)^2]} 1} \right),$$

где i, j – целые числа; $D_{i,j}$ – значение величины D (характеризующей степень соответствия цвета пикселя известному цвету маркера) для пикселя с координатами i, j ; r – радиус маркера; x и y – координаты центра маркера.

Координату x_m центра маркера рассчитывают по формуле: $x_m = \arg \max_x W(x, y, r)$, где

$W(x, y, r)$ – функция, характеризующая степень соответствия изображению маркера с координатами центра (x, y) и радиусом r . При этом $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$, $y \in [y_{\min}, y_{\max}]$, $r \in [r_{\min}, r_{\max}]$, где x_{\min} и x_{\max} – минимальное и максимальное значения координаты x , задающие область поиска маркера на изображении, y_{\min} и y_{\max} – минимальное и максимальное значения координаты y , задающие область поиска маркера на изображении, r_{\min} и r_{\max} – минимальное и максимальное возможные значения радиуса маркера r .

Координату y_m центра маркера рассчитывают по формуле: $y_m = \arg \max_y W(x, y, r)$, где

$W(x, y, r)$ – функция, характеризующая степень соответствия изображению маркера с координатами центра (x, y) и радиусом r . При этом $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$, $y \in [y_{\min}, y_{\max}]$, $r \in [r_{\min}, r_{\max}]$, где x_{\min} и x_{\max} – минимальное и максимальное значения координаты x , задающие область поиска маркера на изображении; y_{\min} и y_{\max} – минимальное и максимальное значения координаты y , задающие область поиска маркера на изображении; r_{\min} и r_{\max} – минимальное и максимальное возможные значения радиуса маркера r .

Измерив на каждом изображении в последовательности из N изображений координаты каждого маркера, получают ряды данных:

- 1) $Th12x_i$ – координата x центра маркера над $Th12$ позвонком, $Th12y_i$ – координата y центра маркера над $Th12$ позвонком, где $i = 0 \dots (N-1)$ – номер изображения;
- 2) $L1x_i$ – координата x центра маркера над $L1$ позвонком, $L1y_i$ – координата y центра маркера над $L1$ позвонком, где $i = 0 \dots (N-1)$ – номер изображения;
- 3) $L2x_i$ – координата x центра маркера над $L2$ позвонком, $L2y_i$ – координата y центра маркера над $L2$ позвонком, где $i = 0 \dots (N-1)$ – номер изображения;
- 4) $L3x_i$ – координата x центра маркера над $L3$ позвонком, $L3y_i$ – координата y центра маркера над $L3$ позвонком, где $i = 0 \dots (N-1)$ – номер изображения;
- 5) $L4x_i$ – координата x центра маркера над $L4$ позвонком, $L4y_i$ – координата y центра маркера над $L4$ позвонком, где $i = 0 \dots (N-1)$ – номер изображения;
- 6) $L5x_i$ – координата x центра маркера над $L5$ позвонком, $L5y_i$ – координата y центра маркера над $L5$ позвонком, где $i = 0 \dots (N-1)$ – номер изображения;
- 7) $S1x_i$ – координата x центра маркера над $S1$ позвонком, $S1y_i$ – координата y центра маркера над $S1$ позвонком, где $i = 0 \dots (N-1)$ – номер изображения.

Время t_i , когда было получено i -ое изображение, рассчитывают по формуле $t_i = i / fps$, где $fps = 30$ Гц – частота следования кадров.

Таким образом получают зависимость координат центров маркеров $(Th12x_i, Th12y_i)$, $(L1x_i, L1y_i)$, $(L2x_i, L2y_i)$, $(L3x_i, L3y_i)$, $(L4x_i, L4y_i)$, $(L5x_i, L5y_i)$, $(S1x_i, S1y_i)$ от времени t_i , отражающую движения исследуемого отдела позвоночника.

Для оценки движений позвонков в смежных сегментах рассчитывают значения углов $Th12L1L2$, $L1L2L3$, $L2L3L4$, $L3L4L5$, $L4L5S1$, образованных прямыми, соединяющими центры трех маркеров над тремя соседними позвонками поясничного отдела позвоночника (например, угол $L2L3L4$, образованный центрами маркеров над позвонками $L2$, $L3$ и $L4$ на рис. 2).

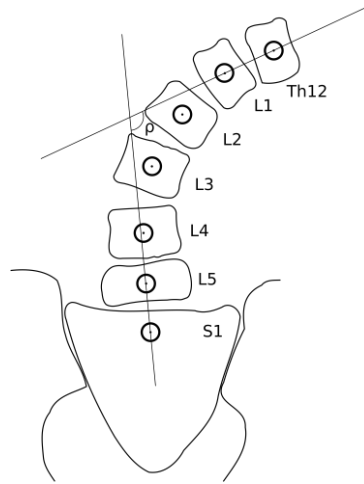


Рис. 2. Схема движений отделов позвоночника

Обозначим как $\varphi(A_x, A_y, B_x, B_y, C_x, C_y)$ угол, образованный центрами маркеров A, B и C с координатами $(A_x, A_y), (B_x, B_y), (C_x, C_y)$ соответственно, причем B – вершина угла (рис. 2). Точки A, B и C образуют треугольник ABC , стороны которого AB, BC и AC рассчитывают по формулам:

$$AB = \sqrt{(B_x - A_x)^2 + (B_y - A_y)^2}, BC = \sqrt{(B_x - C_x)^2 + (B_y - C_y)^2}, AC = \sqrt{(C_x - A_x)^2 + (C_y - A_y)^2}.$$

Значение $\varphi(A_x, A_y, B_x, B_y, C_x, C_y)$ (в градусах) рассчитывают по формуле:

$$\varphi(A_x, A_y, B_x, B_y, C_x, C_y) = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \cdot \arccos \frac{AB^2 + BC^2 - AC^2}{2 \cdot \sqrt{AB^2 \cdot BC^2}}, & \text{при } ((B_y - A_y) \cdot (C_x - A_x) - (B_x - A_x) \cdot (C_y - A_y)) > 0, \\ 360 - \frac{180}{\pi} \cdot \arccos \frac{AB^2 + BC^2 - AC^2}{2 \cdot \sqrt{AB^2 \cdot BC^2}}, & \text{при } ((B_y - A_y) \cdot (C_x - A_x) - (B_x - A_x) \cdot (C_y - A_y)) \leq 0. \end{cases}$$

Искомые значения углов на i -ом изображении $Th12L1L2_i, L1L2L3_i, L2L3L4_i, L3L4L5_i, L4L5S1_i$ рассчитывают по формулам:

$$Th12L1L2_i = \varphi(Th12x_i, Th12y_i, L1x_i, L1y_i, L2x_i, L2y_i),$$

$$L1L2L3_i = \varphi(L1x_i, L1y_i, L2x_i, L2y_i, L3x_i, L3y_i),$$

$$L2L3L4_i = \varphi(L2x_i, L2y_i, L3x_i, L3y_i, L4x_i, L4y_i),$$

$$L3L4L5_i = \varphi(L3x_i, L3y_i, L4x_i, L4y_i, L5x_i, L5y_i),$$

$$L4L5S1_i = \varphi(L4x_i, L4y_i, L5x_i, L5y_i, S1x_i, S1y_i).$$

Для оценки объема движений отдела позвоночника в целом рассчитывают значение общего угла ρ , между прямой, проведенной через центры маркеров над двумя верхними позвонками ($Th12$ и $L1$), и прямой, проведенной через центры маркеров над двумя нижними позвонками ($L5$ и $S1$) исследуемого отдела (рис. 2).

Обозначим как $\alpha(A_x, A_y, B_x, B_y, D_x, D_y, E_x, E_y)$ угол, образованный прямой, проходящей через центры маркеров A и B с координатами $(A_x, A_y), (B_x, B_y)$ соответственно, и прямой, проходящей через центры маркеров D и E с координатами $(D_x, D_y), (E_x, E_y)$ соответственно; прямые пересекаются в точке O . Построим отрезок BC , параллельный DE ; тогда $\angle ABC = \angle AOE = \alpha$. Координаты (C_x, C_y) точки C рассчитывают по формулам: $C_x = B_x + E_x - D_x$; $C_y = B_y + E_y - D_y$. Точки A, B и C образуют треугольник ABC , стороны которого AB, BC и AC рассчитывают по формулам:

$$AB = \sqrt{(B_x - A_x)^2 + (B_y - A_y)^2}, BC = \sqrt{(B_x - C_x)^2 + (B_y - C_y)^2}, AC = \sqrt{(C_x - A_x)^2 + (C_y - A_y)^2}.$$

Значение угла $\alpha(A_x, A_y, B_x, B_y, D_x, D_y, E_x, E_y)$ (в градусах) рассчитывают по формуле:

$$\alpha(A_x, A_y, B_x, B_y, D_x, D_y, E_x, E_y) = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \cdot \arccos \frac{AB^2 + BC^2 - AC^2}{2 \cdot \sqrt{AB^2 \cdot BC^2}}, & \text{при } ((B_y - A_y) \cdot (C_x - A_x) - (B_x - A_x) \cdot (C_y - A_y)) > 0, \\ 360 - \frac{180}{\pi} \cdot \arccos \frac{AB^2 + BC^2 - AC^2}{2 \cdot \sqrt{AB^2 \cdot BC^2}}, & \text{при } ((B_y - A_y) \cdot (C_x - A_x) - (B_x - A_x) \cdot (C_y - A_y)) \leq 0. \end{cases}$$

Искомое значение общего угла на i -ом кадре ρ_i рассчитывают по формуле: $\rho_i = \alpha(Th12x_i, Th12y_i, L1x_i, L1y_i, L5x_i, L5y_i, S1x_i, S1y_i)$. Для характеристики изменения углов при выполнении функциональной пробы используют угловые отклонения, которые рассчитывают по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta\rho_i &= \rho_i - \rho_0, \\ \Delta Th12L1L2_i &= Th12L1L2_i - Th12L1L2_0, \\ \Delta L1L2L3_i &= L1L2L3_i - L1L2L3_0, \\ \Delta L2L3L4_i &= L2L3L4_i - L2L3L4_0, \\ \Delta L3L4L5_i &= L3L4L5_i - L3L4L5_0, \\ \Delta L4L5S1_i &= L4L5S1_i - L4L5S1_0, \end{aligned}$$

где $\Delta\rho_i$ – значение углового отклонения угла ρ для i -ого кадра, ρ_i – значение угла ρ для i -го кадра; ρ_0 – значение угла ρ для первого кадра (до начала выполнения функциональной пробы); $\Delta Th12L1L2_i$ – значение углового отклонения угла $Th12L1L2$ для i -ого кадра; $Th12L1L2_i$ – значение угла $Th12L1L2$ для i -го кадра; $Th12L1L2_0$ – значение угла $Th12L1L2$ для первого кадра; $\Delta L1L2L3_i$ – значение углового отклонения угла $L1L2L3$ для i -ого кадра; $L1L2L3_i$ – значение угла $L1L2L3$ для i -го кадра; $L1L2L3_0$ – значение угла $L1L2L3$ для первого кадра; $\Delta L2L3L4_i$ – значение углового отклонения угла $L2L3L4$ для i -ого кадра; $L2L3L4_i$ – значение угла $L2L3L4$ для i -го кадра; $L2L3L4_0$ – значение угла $L2L3L4$ для первого кадра; $\Delta L3L4L5_i$ – значение углового отклонения угла $L3L4L5$ для i -ого кадра; $L3L4L5_i$ – значение угла $L3L4L5$ для i -го кадра; $L3L4L5_0$ – значение угла $L3L4L5$ для первого кадра; $\Delta L4L5S1_i$ – значение углового отклонения угла $L4L5S1$ для i -ого кадра; $L4L5S1_i$ – значение угла $L4L5S1$ для i -го кадра; $L4L5S1_0$ – значение угла $L4L5S1$ для первого кадра.

Максимальное по модулю значение углового отклонения $\max(\Delta\rho_i)$, достигнутое во время функциональной пробы, используют для характеристики объема движений в поясничном отделе позвоночника в целом. Находят m – номер кадра, на котором значение $\Delta\rho$ достигло $\max(\Delta\rho_i)$. Значения $\Delta Th12L1L2_m$, $\Delta L1L2L3_m$, $\Delta L2L3L4_m$, $\Delta L3L4L5_m$, $\Delta L4L5S1_m$, используют для характеристики объема движений в соответствующих сегментах поясничного отдела позвоночника.

Результаты и их анализ

Пациент О. 60 лет поступил в 1-е неврологическое отделение ГУ РНПЦ неврологии и нейрохирургии с жалобами на стойкие боли в пояснице, онемение голени и стоп. Движения позвоночника были исследованы вышеописанным способом.

Результаты измеренных величин углов до выполнения функциональных проб (до пробы – влево, до пробы – вправо), величин углов при максимальном отклонении влево (макс. влево) и вправо (макс. вправо), величины соответствующих угловых отклонений (Δ влево и Δ вправо) представлены в таблице.

Величины углов поясничных сегментов по данным видеоанализа движений поясничного отдела позвоночника пациента О.

Угол	до пробы– влево	макс. влево	Δ влево	до пробы– вправо	макс. вправо	Δ вправо
ρ	185,2	194,6	9,4	186,1	170,3	-15,8
$Th12L1L2$	179,5	182,6	3,1	179,9	171,0	-8,9
$L1L2L3$	181,6	189,0	7,4	181,4	182,8	1,4
$L2L3L4$	184,7	184,4	-0,3	184,9	174,1	-10,8
$L3L4L5$	179,2	180,4	1,1	180,9	177,6	-3,2
$L4L5S1$	180,4	188,8	8,5	178,7	176,9	-1,8

Из таблицы видно, что максимальное угловое отклонение поясничного отдела позвоночника в целом (ρ) при наклоне вправо превышает по модулю таковое для наклона влево

(–15,8 и 9,4 градуса соответственно). Угловое отклонение в сегментах *Th12–L1–L2* при наклоне вправо превышает по модулю таковое при наклоне влево (–8,9 и 3,1 градуса соответственно). Угловое отклонение в сегментах *L1–L2–L3* при наклоне влево превышает по модулю таковое при наклоне вправо (7,4 и 1,4 градуса соответственно). Угловое отклонение в сегментах *L2–L3–L4* при наклоне вправо превышает по модулю таковое при наклоне влево (–10,8 и –0,3 градуса соответственно). Угловое отклонение в сегментах *L4–L5–S1* при наклоне влево превышает по модулю таковое при наклоне вправо (8,5 и –1,8 градусов соответственно).

По результатам исследования можно сделать заключение: у пациента выраженное ограничение наклонов туловища влево и умеренное ограничение наклонов вправо. На уровне *L2L3L4* зафиксировано отсутствие движения в этом сегменте, а при наклоне вправо зарегистрирован наибольший изгиб позвоночной дуги, что может говорить о локальной миофиксации слева. Полученные данные соответствуют данным неврологического статуса.

Заключение

Таким образом, нами разработан метод регистрации движений позвоночника во фронтальной плоскости, позволяющий зафиксировать, обработать и изучить биомеханику позвоночно-двигательных сегментов поясничного уровня. Отсутствие лучевой нагрузки позволяет контролировать заболевание в динамике, не ограничивая количество обследований, сохраненные результаты обследования на бумажных носителях или в электронном виде могут быть использованы для последующей экспертной оценки состояния здоровья.

THE OBJECTIVITY OF BIOMECHANICAL DISORDERS OF THE LUMBAR SPINE ACCORDING TO VIDEO ANALYSIS IN PATIENTS WITH NEUROLOGICAL MANIFESTATIONS OF SPINE OSTEOCHONDROSIS

S.A. LIKHACHEV, S.V. ELENSKAYA, V.V. VASHCHYLIN, I.S. GOURSKY

Abstract

A new method for objective movement registration of lumbar spine is developed. Method is implemented by means of videoregistration of color markers situated at the skin over the lumbar spine spinous processes. Mathematic tool is demonstrated for processing of the data acquired.

Список литературы

1. Недзьведь Г.К., Анацкая Л.Н., Забаровский В.К. и др. Клиника, диагностика и лечение дисфиксационных синдромов поясничного остеохондроза. Минск, 1993.
2. Билялов М.Ш., Веселовский В.П., Попелянский А.Я. и др. Особенности клинического обследования при вертеброгенных заболеваниях нервной системы. Казань, 1980.
3. Тагер И.Л. Рентгенодиагностика заболеваний позвоночника. М., 1985.

УДК 519.677

ПРИМЕНЕНИЕ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ПРОГРЕССИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ВЫСОКИХ СТЕПЕНЕЙ

В.М. ИЛЬИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 20 января 2014

Дано краткое изложение сущности нового метода решения алгебраических уравнений с максимальным числом разных вещественных корней, равным степени n уравнения – четвертой и выше.

Ключевые слова: решение алгебраических уравнений высоких степеней, использование арифметических прогрессий, снижение трудоемкости, высокая доступность.

Введение

В высшей алгебре существует теорема Руффини-Абеля, которая гласит, что для алгебраического уравнения, выше степени 4, нельзя указать общей формулы решения, подобной формуле Кардано, т.е. в радикалах [1]. Вопрос об условиях, при которых данное уравнение разрешимо в радикалах, был исследован Э.Галуа в XIX веке [1]. Но, как справедливо отмечено в [2], «уже в случае уравнений степени 4 формулы корней практически не применимы». И по отношению к уравнениям не только пятой, но и четвертой степени, используются численные методы решения [3].

В современных условиях для этого применяются ЭВМ, и специалисты высказывают мнение, что на численные решения затрачивается большая доля машинного времени. Так что поиск путей эффективного аналитического решения алгебраических уравнений не потерял актуальности. Данная статья посвящена разработке нового пути в этом деле, отличающегося большей эффективностью: более широким диапазоном использования, значительно меньшей трудоемкостью и высокой точностью. При решении алгебраических уравнений любой степени (больше первой) первоначально составляется квадратное уравнение с учетом того, что первый коэффициент приведенного решаемого алгебраического уравнения – это сумма C со знаком минус, а последний коэффициент этого уравнения есть произведение Π его корней. Исходя только из этих двух коэффициентов определяются все корни решаемого уравнения. Наиболее простое объединение всех корней в этих двух коэффициентах уравнения является предпосылкой этого. От применения радикалов, исчерпавшего себя уравнениями четвертой степени, новый путь позволяет перейти к более гибкой системе арифметических прогрессий, к более совершенной процедуре вычисления корней.

Включение арифметических прогрессий в расчет алгебраических уравнений

Как уже отмечалось, первоначально составляем и решаем квадратное уравнение:

$$y^2 - Cy + \Pi = 0. \tag{1}$$

Откуда
$$y_{1,2} = \frac{C}{2} \mp \sqrt{\left(\frac{C}{2}\right)^2 - \Pi} = \frac{C}{2} \mp P,$$

где $P = \sqrt{\left(\frac{C}{2}\right)^2 - \Pi} = \sqrt{D}$, D – дискриминант, Y_1 – меньший, а Y_2 – больший корни выражения (1).

$$\text{Проверка: } Y_1 + Y_2 = \frac{C}{2} - p + \frac{C}{2} + p = C,$$

$$Y_1 \times Y_2 = \left(\frac{C}{2} - p\right)\left(\frac{C}{2} + p\right) = \left(\frac{C}{2}\right)^2 - p^2 = \left(\frac{C}{2}\right)^2 - \left(\frac{C}{2}\right)^2 + \Pi = \Pi. \quad (2)$$

На основании соотношений (2) составляем базовую арифметическую прогрессию:

$$Y_1 \quad p \quad C_1 \quad p \quad Y_2 \quad (3)$$

Здесь p – разность прогрессии. В дополнение к базовой прогрессии (3) составляются вспомогательные прогрессии. В общем виде это может быть представлено как:

	$Y_1 = C_1 - p$	p	C_1	p	$Y_2 = C_1 + p$
–	$C_1 - p - C_3 = C_2 - p$	p	C_2	p	$C_1 + p - C_3 = C_2 + p$
	C_3	0	C_3	0	C_3

В общем виде представлены: сверху базовая арифметическая прогрессия со средним членом $C_1 = C_2 + C_3 = \frac{C}{2} = \text{const}$; сумма ее крайних членов: $C_1 - p + C_1 + p = C = \text{const}$. Из базовой прогрессии вычитается вспомогательная прогрессия, в ее центре C_2 – это часть C_1 , зависящая от числа пар корней решаемого алгебраического уравнения, что будет показано на конкретных примерах. Крайние члены этой прогрессии $C_1 - p - C_3 = C_2 - p$ и $C_1 + p - C_3 = C_2 + p$ описывают с двух направлений – вертикального и горизонтального – искомые корни заданного алгебраического уравнения: x_1 и x_2 , x_3 и x_4 и т.д. В конечном счете в этом участвуют все члены представленной совокупности прогрессий, их всего восемь: три горизонтальные и пять вертикальных, разности которых вычитаются из членов верхней базовой прогрессии. Дополнительная информация о сущности использования прогрессий содержится в примерах.

Примеры решения уравнений 4 степени

Пример 1. Дано алгебраическое уравнение: $x^4 - 10x^3 + 35x^2 - 50x + 24 = 0$; $C = 10$; $\Pi = 24$. Требуется определить корни уравнения.

Решаем уравнение:

$$y^2 - 10y + 24 = 0. \quad (4)$$

Получим $y_{1,2} = 5 \pm \sqrt{25 - 24} = 5 \pm 1$; $y_1 = 4$; $y_2 = 6$ – корни (4).

Составляем базовую арифметическую прогрессию.

$$4 \quad 1 \quad 5 \quad 1 \quad 6. \quad (5)$$

Поскольку заданное уравнение содержит четыре корня составляем вспомогательные прогрессии со средним значением $5:2 = 2,5$:

$$1 \quad 1,5 \quad 2,5 \quad 1,5 \quad 4,$$

преобразуем базовую прогрессию (5) с разностью 1,5:

$$3,5 \quad 1,5 \quad 5 \quad 1,5 \quad 6,5.$$

Дописываем к ней предыдущую прогрессию и вычитаем ее из базовой:

–	3,5	1,5	5	1,5	6,5
	1	1,5	2,5	1,5	4
	2,5	0	2,5	0	2,5.

Здесь все три горизонтали – прогрессии (третья имеет равную 0 разность), все столбцы – прогрессии с отрицательными разностями во второй строке. Эта совокупность прогрессий полностью законченная, содержит два корня (1 и 4) уравнения 4-ой степени.

Чтобы определять два других его корня, составляем прогрессию со средним значением 2,5 и разностью 0,5, а над ней скорректированную базовую прогрессию с такой же разностью:

–	4,5	0,5	5	0,5	5,5
	2	0,5	2,5	0,5	3
	2,5	0	2,5	0	2,5.

Таким образом, к первым двум корням исходного уравнения добавилось еще два его корня: 2 и 3. Следовательно, имеем четыре корня: $x_1 = 1$, $x_2 = 4$, $x_3 = 2$, $x_4 = 3$.

Проверка: $S = 10$; $P = 24$, кроме того можно проверить решение подстановкой корней в исходное алгебраическое уравнение. Полученные решения можно проверять также через квадратные уравнения с корнями 1 и 4, 2 и 3:

$$x_2 - 5x + 4 = 0; x_{1,4} = 2,5 \pm \sqrt{6,25 - 4} = 2,5 \pm \sqrt{2,5} = 2,5 \mp 1,5 = 1 \text{ и } 4;$$

$$x_2 - 5x + 6 = 0; x_{2,3} = 2,5 \pm \sqrt{6,25 - 6} = 2,5 \pm \sqrt{0,25} = 2,5 \mp 0,5 = 2 \text{ и } 3.$$

Пример 2. Дано алгебраическое уравнение: $x^4 - 10x^3 + 32x^2 - 37,5x + 11,8125 = 0$. Требуется определить корни этого уравнения.

Решаем уравнение

$$y^2 - 10y + 11,8125 = 0.$$

$$\text{Получим } y_{1,2} = 5 \pm \sqrt{25 - 11,8125} = 5 \pm \sqrt{13,1875} = 5 \pm 3,6315.$$

Корни приведенного выше уравнения: 1,3685 – меньший, 8,6315 – больший.

Составляем базовую прогрессию:

1,3685	3,6315	5	3,6315	8,6315.
--------	--------	---	--------	---------

Упрощаем базовую прогрессию, не изменяя ее контрольного члена 5 и суммы крайних членов, отняв от правого крайнего члена 1,6315 и добавив это к крайнему левому члену. Дописываем к ней и вычитаем

–	3	2	5	2	7
	0,5	2	2,5	2	4,5
	2,5	0	2,5	0	2,5.

Получаем завершенный комплект продольных и вертикальных прогрессий; в нем 0,5 и 4,5 – это два корня исходного уравнения.

Для получения величин второй пары корней базовую и вторую прогрессии преобразуем к новой разности прогрессий, равной 1:

–	4	1	5	1	6
	1,5	1	2,5	1	3,5
	2,5	0	2,5	0	2,5.

Завершенность прогрессий говорит о том, что в них содержатся два корня (1,5 и 3,5) исходного алгебраического уравнения. Таким образом, корни решаемого уравнения имеют величины: $x_1 = 0,5$; $x_2 = 4,5$; $x_3 = 1,5$; $x_4 = 3,5$. Порядок их определения такой же, как и в первом примере. Он полностью согласуется с намеченным в общем виде порядком использования обобщенных прогрессий.

Проверка такая же как и в первом примере, в частности: $S = 0,5 + 4,5 + 1,5 + 3,5 = 10$; $\Pi = 0,5 \times 4,5 \times 1,5 \times 3,5 = 11,8125$.

Пример 3. Дано алгебраическое уравнение: $x^4 - 9,3x^3 + 30,3x^2 - 39,8x + 16,8 = 0$. Требуется определить его корни.

Решаем уравнение

$y^2 - 9,3y + 16,8 = 0$, получаем:

$$y_{1,2} = 4,65 \pm \sqrt{4,65^2 - 16,8} = 4,65 \pm \sqrt{21,6225 - 16,8} = 4,65 \pm \sqrt{4,8225} = 4,65 \pm 2,196.$$

Корни – 2,454 и 6,846. Этому соответствует арифметическая прогрессия базовая:

2,454 2,196 4,65 2,196 6,846

или, как было отмечено выше, она может быть преобразована без изменения средней величины (4,65) и суммы корней $2,454 + 6,846 = 9,3$ в следующую базовую прогрессию с добавлением частной прогрессии:

–	3,3	1,35	4,65	1,35	6
–	0,8	1,35	2,15	1,35	3,5
	2,5	0	2,5	0	2,5.

Корни 0,8 и 3,5, их сумма 4,3, а среднее 2,15. Поэтому на два других корня остается $4,65 - 2,15 = 2,5$ общего среднего суммы всех корней. Следовательно, для их определения имеем прогрессию:

–	4,15	0,5	4,65	0,5	5,15
–	2	0,5	2,5	0,5	3
	2,15	0	2,15	0	2,15.

Здесь корни – это 2 и 3, всего же в заданном алгебраическом уравнении четвертой степени четыре корня: $x_1 = 0,8$; $x_2 = 3,5$; $x_3 = 2$; $x_4 = 3$. Их сумма – 9,3, произведение – 16,8.

Для получения пары корней составлен баланс восьми прогрессий: трех горизонтальных, одна из них базовая и две частные, и пять коротких одношаговых вертикальных прогрессий с отрицательными разностями: –2, –0,5; –2,5; –0,5; –3 (все они отнимаются от соответствующих членов базовой прогрессии) – баланс всех восьми прогрессий подтверждает величины корней.

Кроме того, они могут быть легко проверены подстановкой в решаемое уравнение, а также решением квадратных уравнений из пар корней (как в примере 2):

$$x_{12} = \frac{4,3}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{4,3}{2}\right)^2 - 2,8} = 2,15 \pm \sqrt{1,8225} = 2,15 \pm 1,35 = 3,5 \text{ и } 0,8,$$

$$x_{34} = \frac{5}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{5}{2}\right)^2 - 6} = 2,5 \pm \sqrt{6,25 - 6} = 2,5 \pm \sqrt{0,25} = 2,5 \pm 0,5 = 3 \text{ и } 2.$$

Пример 4. Дано алгебраическое уравнение: $x^6 - 15x^5 + 87,25x^4 - 247,5x^3 + 352,75x^2 - 232,5x + 54 = 0$.

Требуется определить корни заданного уравнения.

Решаем укороченное уравнение:

$$y^2 - 15y + 54 = 0,$$

$$y_{12} = 7,5 \mp \sqrt{56,25 - 54} = 7,5 \mp \sqrt{2,25} = 7,5 \mp 1,5; \text{ корни } - 6 \text{ и } 9.$$

Составляем базовую прогрессию:

6 1,5 7,5 1,5 9.

Среднее от 15 равно 7,5, т.е. на каждую пару из 6 корней приходится $7,5:3 = 2,5$, или 1,3 общей средней величины, входящей в частную арифметическую прогрессию. Таким образом, от первой базовой прогрессии надо отнять частную прогрессию

6	1,5	7,5	1,5	9
1	1,5	2,5	1,5	4
5	0	5	0	5.

В этой завершенной сбалансированности всех продольных и поперечных прогрессий (их всех 8) крайние величины второй прогрессии (1 и 4) являются корнями уравнения.

Если же от измененной базовой прогрессии с большей разностью (на 0,5) отнять частную прогрессию,

5,5	2	7,5	2	9,5
0,5	2	2,5	2	4,5
5	0	5	0	5.

то в этой сбалансированной прогрессии получим корни 0,5 и 4,5.

Далее, если от изменений базовой прогрессии с разностью 0,5 отнять частную прогрессию с такой же разностью, т.е.

7	0,5	7,5	0,5	8
2	0,5	2,5	0,5	3
5	0	5	0	5.

Получим третью пару корней: 2 и 3. Следовательно, процедура определения корней алгебраического уравнения степени 6 та же, что и для степени 4.

Корни – это разности между верхними величинами столбцов 1и 5 и их нижними величинами, с учетом того, что вторая прогрессия вычитается из первой (верхней), знаки ее членов положительные.

Следовательно заданному алгебраическому уравнению шестой степени соответствуют корни: $x_1 = 1; x_2 = 4; x_3 = 0,5; x_4 = 4,5; x_5 = 2; x_6 = 3$.

Проверку правильности решения уравнения можно осуществить одним из способов:

- через определение суммы и произведения корней;
- через подстановку их в исходное уравнение;
- через решение квадратных уравнений, соответствующих парам корней. В частности:

$$x_{12} = 2,5 \pm \sqrt{2,5^2 - 4} = 2,5 \pm \sqrt{6,25 - 4} = 2,5 \pm \sqrt{2,25} = 2,5 \pm 1,5 = 4 \text{ и } 1;$$

$$x_{34} = 2,5 \pm \sqrt{2,5^2 - 2,25} = 2,5 \pm \sqrt{6,25 - 2,25} = 2,5 \pm \sqrt{4} = 2,5 \pm 2 = 4,5 \text{ и } 0,5;$$

$$x_{56} = 2,5 \pm \sqrt{2,5^2 - 6} = 2,5 \pm \sqrt{6,25 - 6} = 2,5 \pm \sqrt{0,25} = 2,5 \pm 0,5 = 3 \text{ и } 2.$$

Здесь четко видно, что пары корней формируются и определяются как пары, в которые входят меньшие и большие величины, что предопределяется меньшим началом базовой арифметической прогрессии по сравнению с ее концом и постоянным средним членом, равным $C/2 = C_1$. Это соотношение сохраняется при всех преобразованиях базовой прогрессии. Следует также отметить, что возможность преобразования базовой прогрессии:

- 1) упрощает ее, освобождая в расчете от образующихся дробей;
- 2) позволяет в необходимых пределах регулировать величину разности прогрессий p и

тем самым добиваться баланса всей совокупности продольных и поперечных прогрессий и получать четкий, точный результат по определению корней.

Следует также подчеркнуть, что кроме решения начальных квадратных уравнений, все остальные расчетные действия являются линейными, т.е. практически невыполнимыми в методе, использующем радикалы даже невысоких, 3 и 4, степеней. Отсюда значительное снижение затрат времени и труда на решение многих задач. Ключ открывший новый путь решения алгебраических уравнений – восемь небольших арифметических прогрессий в гармоничном регулируемом сочетании. При этом регулирование арифметических прогрессий, приводящее к выявлению корней алгебраических уравнений, выполняется изменением одинаковых разностей базовой и частных прогрессий вокруг разности, которая возникает в решении первоначального квадратного уравнения (см. примеры: 1–4).

Заключение

По-новому определены корни алгебраических уравнений четвертой и шестой степеней. Основа метода-применение арифметических прогрессий, позволяющие выявлять корни алгебраических уравнений с высокой точностью и с небольшими затратами труда и времени. Намечены пути расширения возможностей этого метода.

ARITHMETIC PROGRESSION APPLICATION FOR SOLVING OF HIGH DEGREES ALGEBRAIC EQUATIONS

V.M. ILYIN

Abstract

A new method for solving of algebraic equations with the maximum number of different real roots equal degree n (fourth and above) is given.

Список литературы

1. *Мишина А.П., Проскураков И.В.* Высшая алгебра. Л., 1962.
2. *Малая математическая энциклопедия.* Будапешт, 1976.
3. *Андре Анго.* Математика для электро-и радиоинженеров. М., 1964.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА «ДОКЛАДЫ БГУИР»

1. К публикации принимаются статьи, отражающие результаты **оригинальных научно-технических исследований и разработок, не опубликованные и не предназначенные для публикации в других изданиях**. Тематика представляемой статьи должна соответствовать рубрикам журнала (электроника, радиофизика, радиотехника, информатика).

2. Статьи должны быть написаны в сжатой и ясной форме и содержать соответствующий индекс УДК; название на русском и английском языках; инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках; полное название учреждений, в которых выполнялось исследование (с указанием адреса); ключевые слова (до 10 слов) на русском языке; аннотацию на русском и английском языках (3–5 предложений). Рекомендуется стандартизировать текст статьи, используя подзаголовки **введение, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и их обсуждение, заключение, список литературы**.

3. Статья представляется в двух экземплярах, распечатанных на листах формата А4, и в электронном варианте в виде файла формата MS Word (расширение – *.doc). Также необходимо представить *акт экспертизы* о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Количество страниц и иллюстраций:

- для оригинальной статьи – не более 7 страниц и 8 иллюстраций;
- для краткого сообщения – не более 3 страниц и 2 иллюстраций.

4. При наборе текста используется гарнитура Times New Roman и Symbol, кегль – 11 pt. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210×297 мм). Поля слева, справа, сверху и снизу – по 25 мм. Межстрочный интервал – 1,0. Абзацный отступ – 1,25 см. *Запрещается* при наборе текста использовать гиперссылки, маркированные списки и ручные переносы слов.

5. **Формульные выражения** выполняются только в редакторе формул MathType, стиль – «Математика» («Math»), гарнитура – Times New Roman и Symbol, кегль – 11 pt. Как в тексте статьи, так и в формульных выражениях, математические функции, цифры, буквы греческого и русского алфавитов набираются прямым начертанием, латинские буквы – курсивом. Нумеровать рекомендуется те формульные выражения, на которые имеются ссылки в последующем тексте, заключая при этом номер в круглые скобки.

6. Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

- размер рисунка – не более 15×20 см, разрешение – не менее 300 dpi;
- рисунок должен быть оформлен как графический объект;
- подрисуночные подписи обязательно должны включать в себя номер и название рисунка;
- словесных обозначений на рисунках рекомендуется избегать, используя при этом цифровые либо буквенные обозначения, пояснения к которым следует давать в тексте статьи либо подрисуночных подписях;
- цифровые и буквенные обозначения на рисунках по начертанию и размеру должны соответствовать обозначениям в тексте статьи либо подрисуночных подписях.

7. Наименования, обозначения, определения и правила применения единиц физических величин, употребляемых в статье, должны соответствовать ГОСТ 8.417–2002.

8. Ссылки на литературные источники нумеруются в порядке их цитирования в тексте. Номера ссылок заключаются в квадратные скобки.

9. Набор статьи рекомендуется производить в шаблоне, доступном для скачивания на сайте БГУИР (www.bsuir.by → «Журнал "Доклады БГУИР"» → раздел «Авторам»).

10. Адрес для пересылки статей в электронном варианте и переписки с редакцией: doklady@bsuir.by.

***Ответственность за оригинальность и достоверность
материалов, поданных в печать, несут авторы.***

