
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, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович, В.К. Конопелько,
А.А. Кураев, В.А. Лабунов, В.В. Муравьев, М.М. Татур

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, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, В.А. Емельянов,
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,
Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Беларусь

Телефон редакции: +375-17-293-88-41

Web-сайт: www.doklady.bsuir.by

E-mail: doklady@bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Бондаренко А.В., Гирель К.В., Невзоров С.А., Гончар К.А., Тимошенко В.Ю. Формирование кремниевых нанонитей методом металл-стимулированного химического травления и исследование их оптических свойств	5
Листопад Е.В. Анализ реализаций алгоритма криптографического хэширования SHA-1 на конвейерных схемах	11
Чубенко Е.Б., Редько С.В., Петрович В.А., Бондаренко В.П. Формирование массивов наноструктур из легированного и нелегированного оксида цинка методами осаждения из жидкой фазы	18
Овсянников А.В., Козел В.М., Харитович Е.А. Анализ информационной прогнозируемости процессов со случайной структурой	25
Бельский А.Я., Гусинский А.В., Дробот С.В. Электронные компоненты для систем охранной сигнализации территории объектов	32
Храменков А.С., Ярмолик С.Н. Алгоритм последовательного распознавания радиолокационных объектов, обеспечивающий минимизацию среднего риска принимаемых решений	37
Поляков А.С., Самсонов В.Е. Коррекция кодовых слов на основании проверок четности	44

Волкенштейн С.С., Дайняк И.В., Хмыль А.А. Сравнительная оценка альтернативных методов контроля качества и диагностики монтажных конструкций «п/п кристалл – подложка»	51
Рудикова Л.В., Жавнерко Е.В., Курьян Н.Н., Лазарь Д.В. Формирование экспертных заключений с использованием лазерного метода спектрального анализа и специализированного программного обеспечения	56
Аль-Бахдили Х.К., Макейчик Е.Г., Цветков В.Ю., Конопелько В.К. Сжатие полутоновых изображений без потерь на основе кодирования длин серий	63
Ушакова А.А., Камлач П.В., Бондарик В.М. Ультразвуковые методы регистрации момента образования фибринового сгустка в плазме крови	70
Шалапин И.Ф., Завадский С.А., Юрцев О.А. Сравнительный анализ сканирующих случайных антенных решеток с разной формой раскрыва	75
Аникеев С.В., Куренёв В.А. Синтез измерителя угловой координаты и дальности в системах со сверхбыстрым сканированием луча при сопровождении по пачкам	81
Шарак Д.С., Хижняк А.В., Шевяков А.В., Михненко Е.И. Снижение вероятности срыва сопровождения оптически наблюдаемых объектов в корреляционных алгоритмах сопровождения за счет комплексирования исходных изображений ИК- и ТВ-диапазонов	88
Пашук А.В., Хаджинов М.К., Шведова О.А. Моделирование алгоритмов функционирования системы управления с компенсацией сил инерции	95
Абукраа А.С., Вилькоцкий М.А., Лыньков Л.М. Помехозащищенность глобальных систем спутниковой навигации при использовании метаматериальных экранов	101
Борискевич И.А. Предсказание положения малоразмерных объектов на кадрах видеопотока с борта беспилотных летательных аппаратов	107
Гасенкова И.В., Мухуров Н.И., Ясин Мохсин Вахиох. Оптические свойства подложек анодного оксида алюминия как основы пороговых детекторов	114
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ	
Зяц Е.Ю., Янушкевич В.Ф. Влияние многослойности среды на процесс обнаружения углеводородных залежей	119
Богуш В.А. Методика углового оптического сканирования плоских поверхностей для систем технического зрения	123

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

Подписано в печать 24.03.2016. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 15,11. Уч.-изд. л. 13,5. Тираж 100 экз. Заказ 42.

Индекс для индивидуальной подписки 00787.

Индекс для ведомственной подписки 007872.

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

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2016

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

Editor-In-Chief M.P. Batura

Address of editorial office: P. Brovka Str., 6, Room 326, Minsk, 220013, Belarus

Phone number of editorial office: +375-17-293-88-41

Web-site: www.doklady.bsuir.by

E-mail: doklady@bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Bandarenka H.V., Girel K.V., Niauzorau S.A., Gonchar K.A., Timoshenko V.U. Formation of silicon nanowires by metal-assisted chemical etching and study of its optical properties.....	5
Listopad E.V. Analysis of implementations of the cryptographic hash function SHA-1 based on pipeline circuits.....	11
Chubenko E.B., Redko S.V., Petrovich V.A., Bondarenko V.P. Formation of doped and undoped ZnO nanostructure arrays by liquid phase deposition techniques	18
Ausiannikau A.V., Kozel V.M., Kharytovich K.A. Analysis of information predictability of process with random structure	25
Belsky A.J., Gusinsky A.V., Drobot S.V. Electronic devices for security alarm systems of objects territory	32
Khramiankou A.S., Yarmolik S.N. Radar-tracking objects sequential recognition algorithm, providing minimization average risk of accepted decisions	37
Poljakov A.S., Samsonov V.E. Codewords correction on the basis of parity checks	44
Wolkenstein S.S., Dayniak I.V., Khmyl A.A. Comparative estimation of semiconductor dice mounting alternate nondestructive evaluation methods	51
Rudikova L.V., Zhavnerko E.V., Kurian N.N., Lazar D.V. The formation of expert opinions using the laser method of spectral analysis and special software	56
Al-Bahadily H.K., Makeichik E.G., Tsviatkou V.Yu., Kanapelka V.K. Lossless compression of the halftone images based on run-length encoding	63
Ushakova A.A., Kamlach P.V., Bondarik V.M. Ultrasonic detection method of blood plasma fibrin clot formation moment.....	70
Shalyapin I.F., Zavadski S.A., Yurtsev O.A. Comparative analysis of random scanning antenna arrays with different forms of aperture	75

Anikeev S.V., Kurenjov V.A. Synthesis of angle and range measurer in track-while-scan super-fast beam scanning systems	81
Sharak D.S., Khizhniak A.V., Shevyakov A.V., Mikhnionok E.I. Lowering of failure probability of optically observable objects in correlation tracking algorithms based on the integration of the initial images of IR and TV ranges	88
Pashuk A.V., Hadzhinov M.K., Shvedova O.A. Modeling of management system with inertial forces compensation functioning algorithms	95
Abukraa A.S., Vilkotsky M.A., Lynkou L.M. Emissions secure of global satellite navigation systems with use of metamaterial shields	101
Baryskievic I.A. Predict of the small size object position on the video stream frames from the board of unmanned aerial vehicle	107
Gasenkova I.V., Mukhurov N.I., Vahioh Ya. M. The optical properties of anodic alumina substrates as the basis of threshold detectors	114

SHORT NOTES

Zayats E.Y., Yanushkevich V.F. Influence of multilayered environment on the hydrocarbon deposits detection process	119
Bogush V.A. Method of the angle optical scanning of the flat surfaces for the technical vision systems	123

УДК 535.375.5; 537.533.35; 539.23

ФОРМИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ НАНОНИТЕЙ МЕТОДОМ МЕТАЛЛ-СТИМУЛИРОВАННОГО ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

А.В. БОНДАРЕНКО¹, К.В. ГИРЕЛЬ¹, С.А. НЕВЗОРОВ¹, К.А. ГОНЧАР^{2,3},
В.Ю. ТИМОШЕНКО^{2,4}

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (физический факультет)
Ленинские Горы, Москва, 1119991, Россия

³Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия

⁴Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия

Поступила в редакцию 8 сентября 2015

Представлены результаты исследования особенностей формирования и оптических свойств кремниевых нанонитей (КН), формируемых методом металл-стимулированного химического травления (МСХТ) монокристаллического кремния дырочного и электронного типа проводимости. Установлено, что с увеличением времени химического травления длина КН линейно возрастает. Исследованы спектры полного и зеркального инфракрасного (ИК) отражения, спектры комбинационного рассеяния (КР) света сформированных КН, а также спектры фотолюминесценции (ФЛ). Выявлено, что полоса кремния в спектре КР с увеличением времени химического травления расширяется и сдвигается в коротковолновую область.

Ключевые слова: кремниевые нанонити, металл-стимулированное химическое травление, иммерсионное осаждение, комбинационное рассеяние, фотолюминесценция.

Введение

В последнее время наблюдается рост интереса к КН, полученным методом МСХТ [1–3], которые демонстрируют физико-химические свойства, отличные от свойств объемного кристаллического кремния. Также увеличивается количество публикаций, связанных с применением КН в наноэлектронике [4], оптоэлектронике [5], биомедицине [6], в качестве материала для создания активных субстратов для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) [7], а также в качестве материала анода для литий-ионных источников питания [8, 9].

Известны два варианта реализации метода МСХТ [10]. В первом варианте (одноступенчатый) используется одна операция селективного химического травления кремния в растворе, содержащем ионы металла и фтористоводородную кислоту (HF). При этом происходит осаждение частиц металла на поверхность монокристаллического кремния и одновременно травление кремния с образованием КН. Во втором варианте (двухступенчатый) вначале формируются наночастицы металла на поверхности кремния, а затем химическое травление в растворе, содержащем HF и перекись водорода (H₂O₂). Такой режим дает возможность более точно контролировать структурные параметры формируемых КН.

В данной работе представлены результаты исследования формирования массивов КН двухступенчатым методом МСХТ на подложках монокристаллического кремния *p*- и *n*-типа проводимости, а также приведены результаты исследования оптических свойств сформированных КН.

Методика эксперимента

В качестве исходных подложек использовались пластины монокристаллического кремния *p*-типа проводимости, легированные бором, и *n*-типа проводимости, легированные сурьмой, с кристаллографической ориентацией поверхности (100) и удельным сопротивлением равным 12 Ом·см и 0,01 Ом·см, соответственно. Из пластин были вырезаны образцы размером 1×1 см. Очистка образцов от органических загрязнений проводилась в насыщенном растворе CrO₃ в H₂SO₄ (конц.). Естественный окисел удалялся в 4,5%-м водном растворе HF. Иммерсионное осаждение Ag проводилось из водно-спиртового раствора, содержащего 10 мМ AgNO₃ и 2,5 М HF. Время осаждения серебра составляло 3 мин. Все эксперименты проводились при комнатной температуре.

Для селективного химического травления кремния использовался водный раствор, содержащий 5 М HF и 0,3 М H₂O₂. Пластины монокристаллического кремния со сформированными на их поверхности наночастицами серебра погружались в раствор на различное время от 1 до 60 мин. После травления образцы промывались в дистиллированной воде и в этиловом спирте и затем высушивались на воздухе.

Поверхность и сколы образцов на различных этапах их изготовления изучались методом сканирующей электронной микроскопии с помощью микроскопа Hitachi-S4800.

Результаты и их обсуждение

При погружении кремниевой пластины в водно-спиртовой раствор AgNO₃ и HF, ионы Ag захватывают электроны из приповерхностной области кремния и восстанавливаются до атомарной формы, осаждаясь на поверхности пластины. Параллельно происходит процесс окисления кремния вокруг наночастиц Ag.

На рис. 1 представлены СЭМ изображения поверхности и скола образца кремния *p*-типа проводимости после осаждения частиц серебра из водно-спиртового раствора, содержащего 10 мМ AgNO₃ и 2,5 М HF, в течение 3 мин. Как видно из рис. 1, наночастицы Ag расположены на расстоянии от 10 до 150 нм друг от друга и имеют размеры от 50 до 200 нм. Также наблюдаются серебряные дендриты высотой до 2 мкм. Поверхность монокристаллического кремния под наночастицами Ag частично окислилась и стравилась в HF. Размеры сформированных таким образом полостей варьируются от 20 до 100 нм.

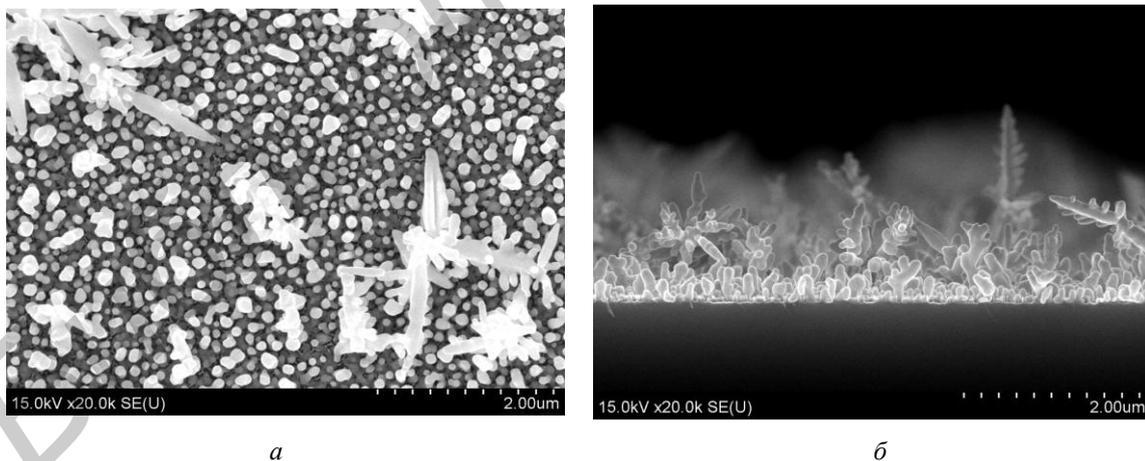


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности (а) и скола (б) структур Si/Ag

На рис. 2 представлены СЭМ-изображения поверхности и сколов массивов КН, сформированных в водном растворе, содержащем 5 М HF и 0,3 М H₂O₂, в течение 60 мин на пластинах *p*- и *n*-типа проводимости.

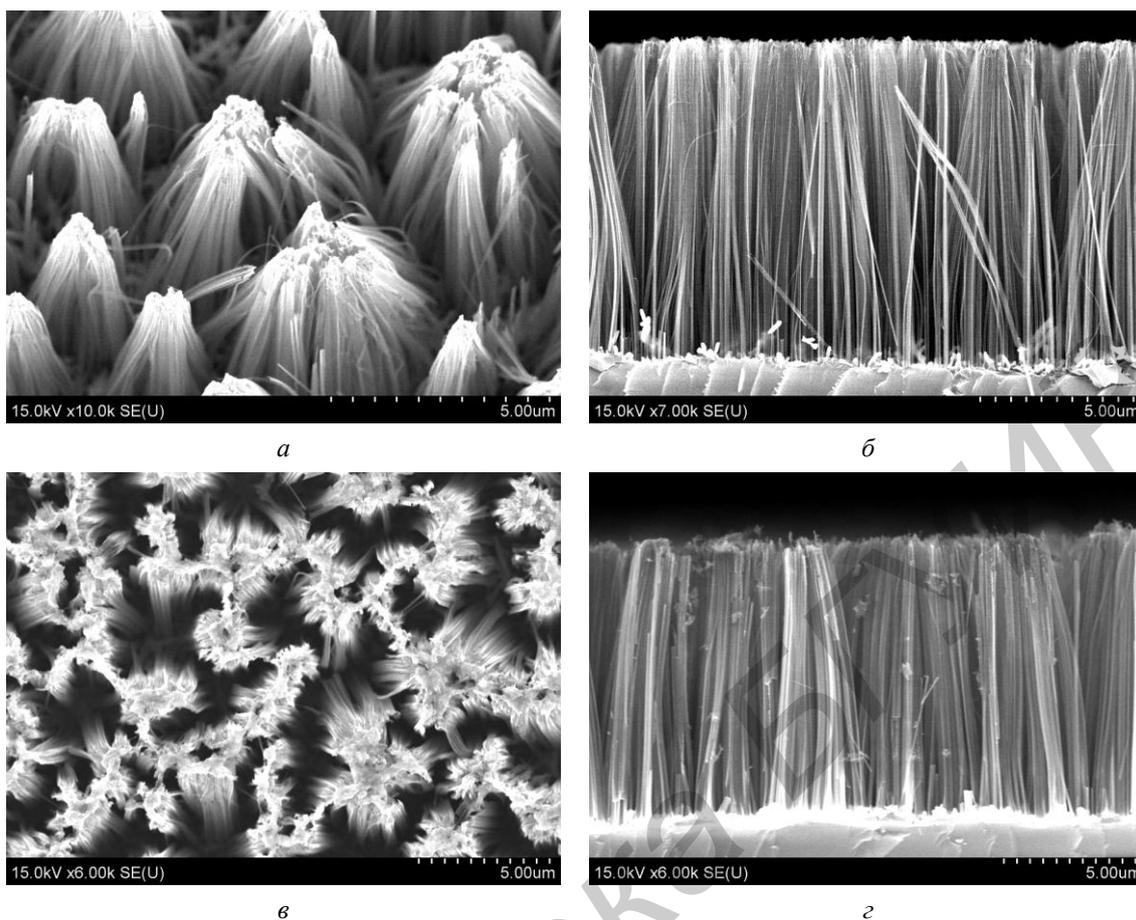


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности (а, в) и сколов (б, г) массивов КН, полученных методом МСХТ в течение 60 мин травления монокристаллического кремния

В растворе под наночастицами серебра образуется оксид, который стравливается и частицы погружаются вертикально вниз вглубь подложки, в результате чего формируются массивы КН длиной 10 и 8 мкм для образцов монокристаллического кремния *p*- и *n*-типа проводимости, соответственно (рис. 2 б, г). Диаметры КН составляют от 30 до 150 нм.

На рис. 3 изображены графики зависимости длины КН, сформированных на кремниевых пластинах с разным типом проводимости, от времени химического травления.

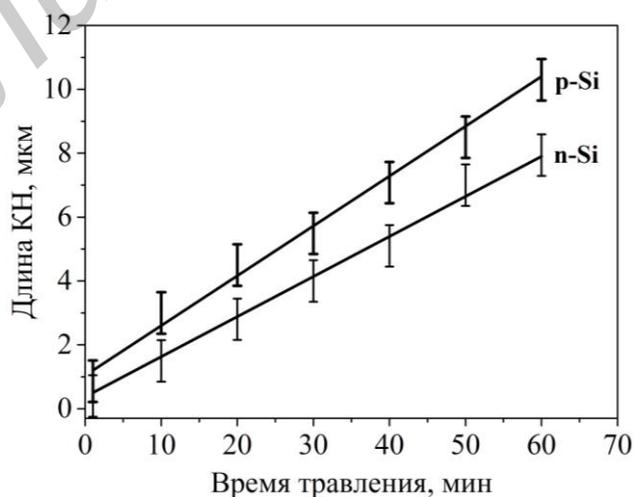


Рис. 3. Зависимость длины КН от времени химического травления

Как видно из рис. 3, длина КН, сформированных на подложках монокристаллического кремния *p*- и *n*-типа проводимости, практически линейно возрастает с увеличением времени

химического травления. Скорость образования КН на монокристаллическом кремнии *p*- и *n*-типа проводимости различна. На кремнии *p*-типа проводимости скорость образования КН составляет 158 нм/мин, а на кремнии *n*-типа проводимости – 125 нм/мин.

Для массивов КН, сформированных методом МСХТ на подложках монокристаллического кремния *p*- и *n*-типа проводимости были сняты спектры зеркального ИК отражения (рис. 4), а также полного (диффузионное и зеркальное) отражения в ультрафиолетовом (УФ), видимом и ИК диапазонах (рис. 5).

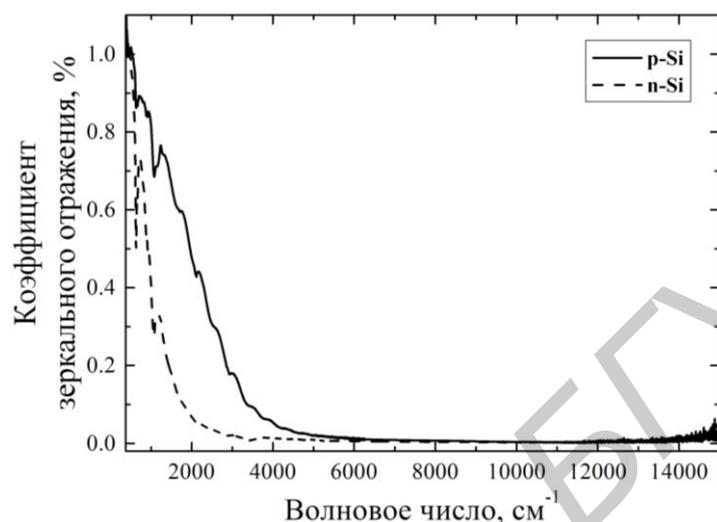


Рис. 4. Спектры зеркального отражения массивов КН, сформированных на подложках монокристаллического кремния *p*- и *n*-типа проводимости

Как видно из рис. 4, КН очень слабо отражают свет в области 6000–14000 см⁻¹, что свидетельствует о сильном рассеянии и поглощении света.

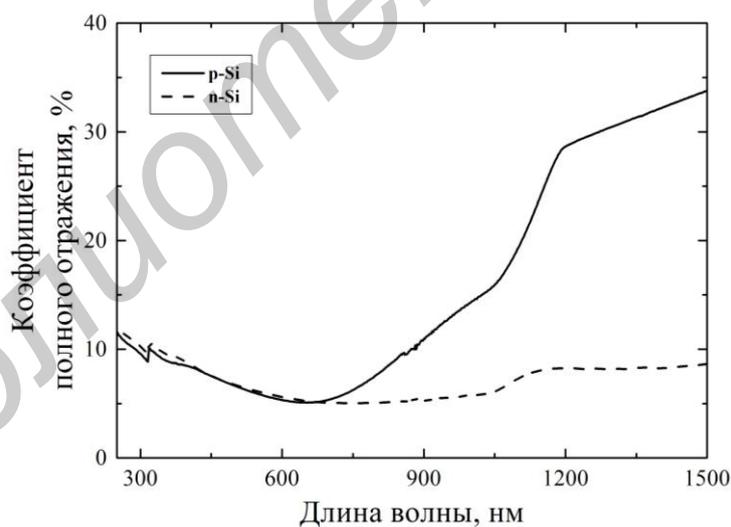


Рис. 5. Спектры полного отражения в видимом и ближнем ИК-диапазонах массивов КН, сформированных на подложках монокристаллического кремния *p*- и *n*-типа проводимости

Из рис. 5 видно, что в видимой области спектра полное отражение КН составляет менее 10 %. В области ближнего ИК диапазона коэффициент полного отражения увеличивается.

Для массивов КН, сформированных методом МСХТ, был проведен анализ спектров ФЛ и КР. Для возбуждения ФЛ использовалось излучение с длиной волны 1064 нм. При такой длине волны возможно наблюдение на спектрах сигналов межзонной ФЛ, а также сигналов КР.

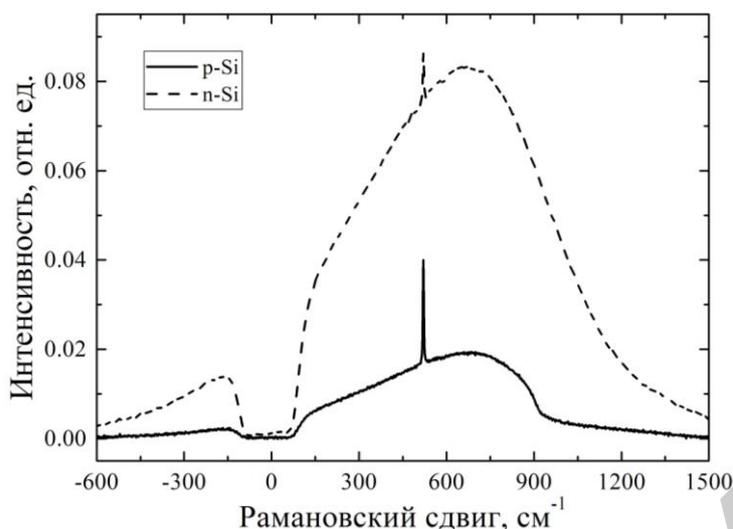


Рис. 6. Спектры ФЛ и КР массивов КН, сформированных на подложках монокристаллического кремния *p*- и *n*-типа проводимости. Снятие спектров проводилось с использованием notch-фильтра, который обеспечивает подавление линии возбуждающего излучения

Для массива КН, сформированных на подложке монокристаллического кремния *n*-типа проводимости, наблюдается более высокая интенсивность межзонной ФЛ.

На рис. 7 изображены спектры КР КН, сформированных методом МСХТ в течение различного времени травления. Для измерения спектров был использован лазер с длиной волны 473 нм. Как видно из рис. 7, для КН, сформированных в течение 1 мин, наблюдается значительное увеличение интенсивности сигнала КР по сравнению с подложкой монокристаллического кремния, что может быть связано с малой длиной КН, формируемыми за 1 мин и близким расположением наночастиц серебра к области измерения, что вносит значительный вклад в усиление КР.

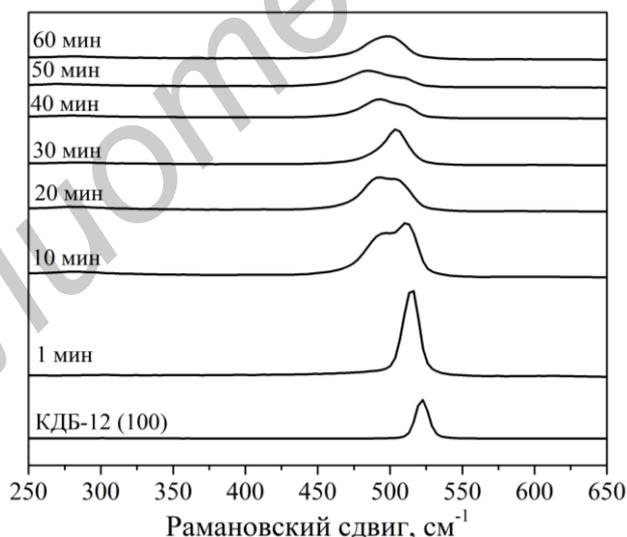


Рис. 7. Спектры КР массивов КН, сформированных в течение различного времени химического травления

Сдвиг в коротковолновую область и уширение полосы кремния в спектре КР с увеличением времени химического травления может быть обусловлено увеличением числа нанокристаллитов кремния с размерами менее 10 нм на поверхности КН в процессе химического травления их поверхности в течение более длительного процесса МСХТ. Такие нанокристаллы, как известно, приводят к появлению видимой ФЛ КН [2]. К низкочастотному сдвигу линии КР от КН может привести их нагрев при использовании сильнопоглощаемого излучения даже малой интенсивности.

Заключение

Методом МСХТ на подложках монокристаллического кремния *p*- и *n*-типа проводимости были сформированы КН длиной 10 и 8 мкм, соответственно. Толщина КН линейно зависит от времени химического травления. Были исследованы спектры зеркального и полного отражения. Выявлено, что сформированные массивы КН обладают низким коэффициентом зеркального отражения, что обуславливается сильным рассеянием и поглощением света. Для массива КН, сформированных на подложке монокристаллического кремния *n*-типа проводимости, наблюдается высокая интенсивность межзонной ФЛ.

FORMATION OF SILICON NANOWIRES BY METAL-ASSISTED CHEMICAL ETCHING AND STUDY OF ITS OPTICAL PROPERTIES

H.V. BANDARENKA, K.V. GIREL, S.A. NIAUZORAU, K.A. GONCHAR, V.U. TIMOSHENKO

Abstract

The results of study and development of silicon nanowires (SiNWs) formation by metal-assisted chemical etching (MACE) are introduced. Linear dependence of SiNWs length from etching time is established. Total and mirror reflectance spectra, Raman scattering spectra of SiNWs and photoluminescence (PL) spectra are studied. Si band broadening and shifting to short-wave region in Raman spectra with increasing of etching time are revealed.

Keywords: silicon nanowires, metal-assisted chemical etching, immersion deposition, Raman scattering, photoluminescence.

Список литературы

1. *Pal A.* // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 107. P. 072104-1–072104-5.
2. *Gonchar K.A.* // J. Nanoelectron. Optoelectron. 2012. Vol. 7. P. 602–606.
3. *Cheng H.* // RSC Adv. 2015. Vol. 5. P. 52217–52225.
4. *Hee H.* // Nanotoday. 2014. Vol. 9. P. 271–304.
5. *Youngseok Y.* // Mat. Sci. Semicon. Proc. 2015. Vol. 40. P. 391–396.
6. *He Y.* // Nano Today. 2010. Vol. 5. P. 282–295.
7. *Niauzorau S., Girel K., Bandarenka H. et. al* // E-MRS Fall Meeting. 2015. Abs.12-4.
8. *McSweeney W.* // Nano. Res. 2014. Vol. 8. P. 1395–1442.
9. *Li. J.* // J. Inorg. Mater. 2013. Vol. 28. P. 1207–1212.
10. *Peng K.* // Adv. Func. Mater. 2006. Vol. 16. P. 387–394.

УДК 004.75,004.272

АНАЛИЗ РЕАЛИЗАЦИЙ АЛГОРИТМА КРИПТОГРАФИЧЕСКОГО ХЭШИРОВАНИЯ SHA-1 НА КОНВЕЙЕРНЫХ СХЕМАХ

Е.В. ЛИСТОПАД

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

Поступила в редакцию 1 июля 2015

Проведен анализ аппаратных реализаций алгоритма криптографического хэширования SHA-1 на конвейерных схемах с различным количеством уровней логики. Рассмотрены аппаратные реализации алгоритма SHA-1 для приложений, требующих высокой производительности.

Ключевые слова: алгоритм криптографического хэширования SHA-1, конвейерные схемы, специализированный процессор.

Введение

Конвейерные схемы построения специализированных процессоров позволяют достигать максимальных показателей производительности и эффективности использования аппаратных ресурсов. Примерами являются аппаратные реализации алгоритма криптографического хэширования SHA-1 [1] (далее – алгоритм SHA-1) на конвейерных схемах [2]. Известные на сегодняшний день универсальные аппаратные реализации алгоритма SHA-1 [3, 4] имеют преимущественно итеративную архитектуру, использующую только один блок обработки данных, который реализует одну итерацию алгоритма SHA-1. Такая архитектура обеспечивает минимальное использование аппаратных ресурсов, однако, и минимальное быстродействие. Для определенного класса задач требуется максимальное быстродействие процесса хэширования, которое обеспечивается аппаратными реализациями алгоритма SHA-1, имеющими конвейерную архитектуру вычислений.

Исходные данные

Алгоритм SHA-1 используется в криптографических приложениях и протоколах для вычисления хэша фиксированной длины в 160 бит от входного сообщения максимальной длины $2^{64}-1$ бит. Алгоритм SHA-1 работает с 512-разрядными блоками (далее – SHA-1 блоки), которые обрабатываются раздельно. SHA-1 блок разделяется на 16 32-разрядных слов (M_0, \dots, M_{15}). Для вычисления хэша используются пять переменных состояний (A, B, C, D, E). Для хранения этих переменных в аппаратных реализациях предусматривается буфер размером в пять 32-разрядных регистров. На начальном этапе вычислений данные регистры инициализируются шестнадцатеричными значениями (табл. 1).

Таблица 1. Значения для инициализации регистров

регистр А	0x67452301
регистр В	0xEFCDAB89
регистр С	0x98BADCFE
регистр D	0x10325476
регистр E	0xC3D2E1F0

Алгоритм хэширования SHA-1 выполняется в четыре этапа по 20 итераций в каждом. Определяются нелинейные операции и константы (1–4).

$$F_t(m, l, k) = (m \wedge l) \vee (\neg m \wedge k), \quad K_t = 0x5A827999, \quad 0 \leq t \leq 19, \quad (1)$$

$$F_t(m, l, k) = m \oplus l \oplus k, \quad K_t = 0x6ED9EBA1, \quad 20 \leq t \leq 39, \quad (2)$$

$$F_t(m, l, k) = (m \wedge l) \vee (m \wedge k) \vee (l \wedge k), \quad K_t = 0x8F1BBCDC, \quad 40 \leq t \leq 59, \quad (3)$$

$$F_t(m, l, k) = m \oplus l \oplus k, \quad K_t = 0xCA62C1D6, \quad 60 \leq t \leq 79. \quad (4)$$

Блок сообщения преобразуется из 16 32-битовых слов M_t в 80 32-битовых слов W_t (5, 6).

$$W_t = M_t, \quad 0 \leq t \leq 15, \quad (5)$$

$$W_t = W_{t-3} \oplus W_{t-8} \oplus W_{t-14} \oplus W_{t-16} \ll 1, \quad 16 \leq t \leq 79. \quad (6)$$

На рис. 1 приведена схема преобразований, осуществляемых одной итерацией алгоритма SHA-1.

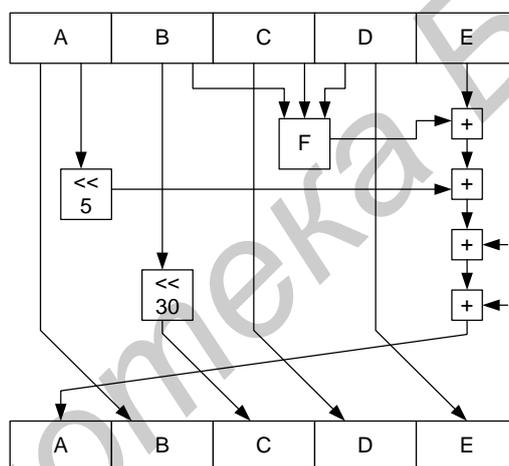


Рис. 1. Схема выполнения одной итерации алгоритма SHA-1

Первоначально значения регистров A, B, C, D, E сохраняются во временных переменных. Затем, на каждом шаге $i = 0, \dots, 79$ выполняются необходимые преобразования (7–12).

$$temp = (A \ll 5) + F_t(B, C, D) + E + W_t + K_t, \quad (7)$$

$$E = D, \quad (8)$$

$$D = C, \quad (9)$$

$$C = B \ll 30, \quad (10)$$

$$B = A, \quad (11)$$

$$A = temp. \quad (12)$$

После преобразований текущие значения регистров A, B, C, D, E прибавляются к их начальным значениям соответственно. Осуществляется переход к следующей итерации. Результирующим значением будет конкатенация пяти 32-битовых слов в одно 160-битное хэш-значение. Каждая итерация изменяет значение регистров A, B, C, D, E , используя функцию F , которая использует значения регистров B, C, D в качестве входных переменных и формирует на выходе 32-разрядное значение. В выражениях (6, 7, 10) знак \ll обозначает операцию циклического сдвига влево. В целом алгоритм SHA-1 выполняется за 80 итераций. При этом

первые 20 итераций образуют раунд 1, следующие 20 – раунд 2 и т. д. Раунды различаются используемой функцией F , и константой K , как это определено в выражениях (1–4), где t – это номер шага. Как отмечалось выше, SHA-1 блок включает только 16 32-разрядных слов, которые по определенным правилам согласно выражениям (5,6) преобразуются в 80 32-разрядных слов, каждое из которых один раз используется на соответствующей итерации алгоритма. После выполнения всех 80 итераций полученные в регистрах A, B, C, D, E значения прибавляются по модулю 2^{32} к значениям временных переменных A, B, C, D, E , вычисленных для предыдущего SHA-1 блока текущего обрабатываемого сообщения. В случае, если сообщение состоит из одного SHA-1 блока, полученные в регистрах A, B, C, D, E значения после конкатенации дадут финальный хэш. В противном случае значения в указанных регистрах будут использоваться при обработке следующего SHA-1 блока.

Как видно из выражений (7–12), алгоритм SHA-1 имеет последовательную природу. При аппаратной реализации возможности параллельного выполнения операций ограничены имеющимися в алгоритме SHA-1 зависимостями по данным.

Методика эксперимента

Для анализа реализаций алгоритма SHA-1 на конвейерных схемах рассматривается три варианта построения специализированных процессоров. Следует отметить, что для экспериментов строились специализированные процессоры с обработкой входного сообщения длиной не более 160 бит (20 символов в кодировке ASCII).

Первый вариант построения подразумевает использование 82-ступенчатой конвейерной схемы (рис. 2), в которой одна ступень конвейера используется для фиксации исходных данных во входных регистрах, восемьдесят ступеней используются для вычисления всех восьмидесяти итераций алгоритма SHA-1 (при этом одна ступень конвейера вычисляет одну итерацию алгоритма), и одна ступень используется для фиксации результата в выходном регистре процессора.

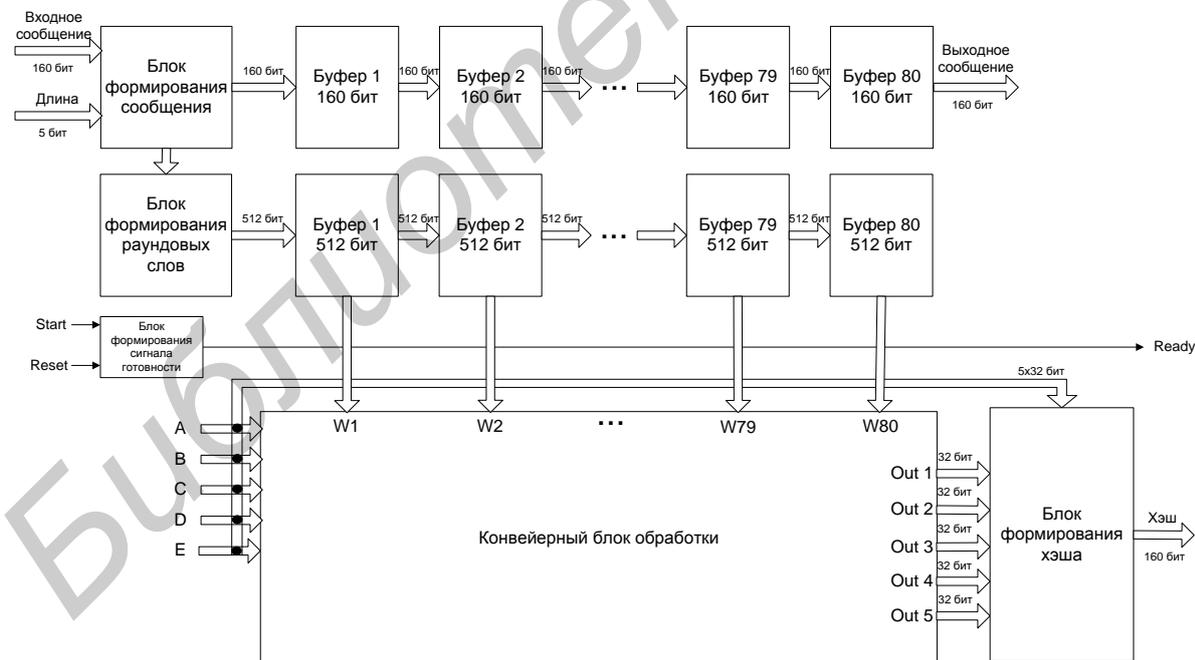


Рис. 2. 82-ступенчатая конвейерная схема построения специализированного процессора

Входное сообщение поступает на блок формирования сообщения. Задачами данного блока являются:

- 1) передача входных данных в неизменном виде в цепочку буферов, реализованных на сдвиговых регистрах;
- 2) модификация входных данных в соответствии с требованиями алгоритма (входное сообщение длиной 160 бит дополняется служебной информацией до 512 бит);

3) передача модифицированных входных данных в блок формирования раундовых слов.

Блок формирования раундовых слов представляет 512-битный вектор входных данных в виде 16 32-битовых слов M_i , которые в этом же блоке преобразуются в 80 32-битовых раундовых слов W_i в соответствии с выражениями (5,6). Далее, подготовленные раундовые слова передаются в цепочку буферов, реализованных на сдвиговых регистрах. Впоследствии в ходе вычислительного процесса раундовые слова из каждого буфера на каждом такте процессора поступают в конвейерный блок обработки (рис. 3), который изначально инициализируется фиксированными значениями (табл. 1).

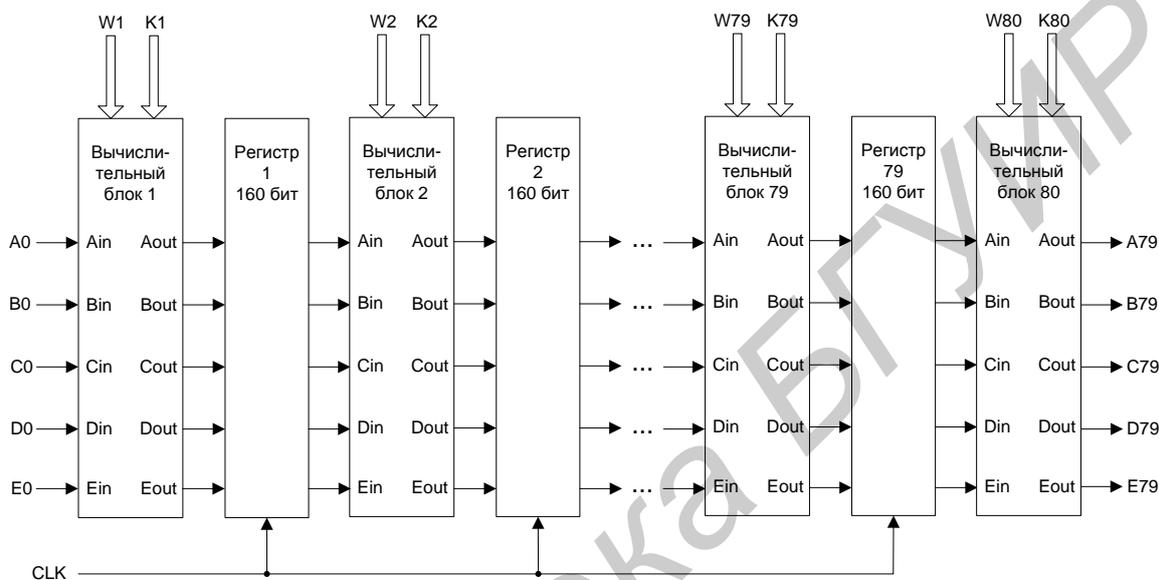


Рис. 3. Структура конвейерного блока обработки для 82-ступенчатой схемы построения специализированного процессора

Структура каждого вычислительного блока соответствует схеме на рис. 1. Таким образом, на каждой ступени конвейера формируются текущие значения переменных A, B, C, D, E (производится вычисление переменных A, C , а остальные передаются с перестановкой значений на следующий шаг алгоритма). Вычисление значений переменных A, C выполняется в соответствии с выражениями (7, 12).

Следует отметить, что описанная конвейерная схема имеет критический путь сигнала, включающий цепочку из четырех сумматоров (для вычисления переменной A на рис. 1). В других вариантах построения специализированных процессоров будут использоваться подходы, направленные на минимизацию уровней логики, в том числе и цепочки сумматоров.

Второй вариант построения специализированного процессора подразумевает использование той же конвейерной схемы (рис. 2) с таким же конвейерным блоком обработки (рис. 3), однако с другой структурой вычислительных блоков внутри конвейера. Вычислительный блок со структурой, приведенной на рис. 1, представляется целесообразным модифицировать таким образом, чтобы цепочка из четырех сумматоров оказалась разбитой пополам посредством регистров (рис. 4). Однако использование модифицированных вычислительных блоков требует определенной коррекции структуры конвейерного блока обработки. В частности, модифицированных вычислительных блоков требуется использовать 79 вместо 80, и необходимы дополнительные включения в структуру конвейера блока предварительных вычислений (рис. 5, а) и блока финальных вычислений (рис. 5, б). Таким образом, конвейерный блок обработки для данного варианта будет иметь 81 ступень, а сама конвейерная схема построения специализированного процессора будет 83-ступенчатой (за счет использования входных и выходных регистров).

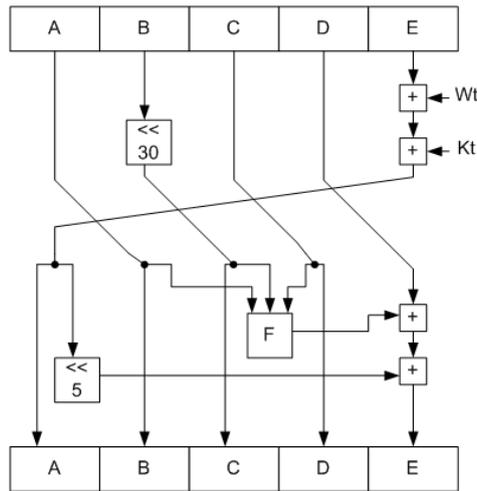


Рис. 4. Структура модифицированного вычислительного блока

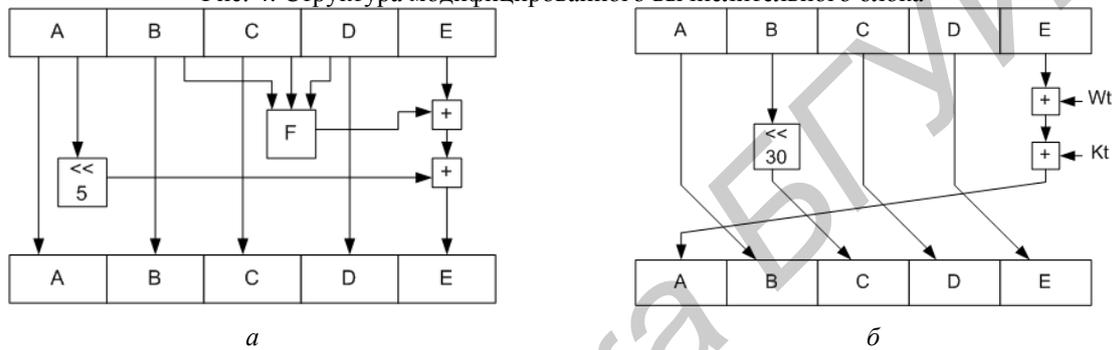


Рис. 5. Структуры дополнительных блоков:
a – блока предварительных вычислений, *б* – блока финальных вычислений

Третий вариант построения специализированного процессора подразумевает использование 162-ступенчатой конвейерной схемы (рис. 6). Такая схема отличается от 82-ступенчатой конвейерной схемы использованием в своем составе расширенного конвейерного блока обработки, в котором одна итерация алгоритма вычисляется на двух ступенях конвейера.

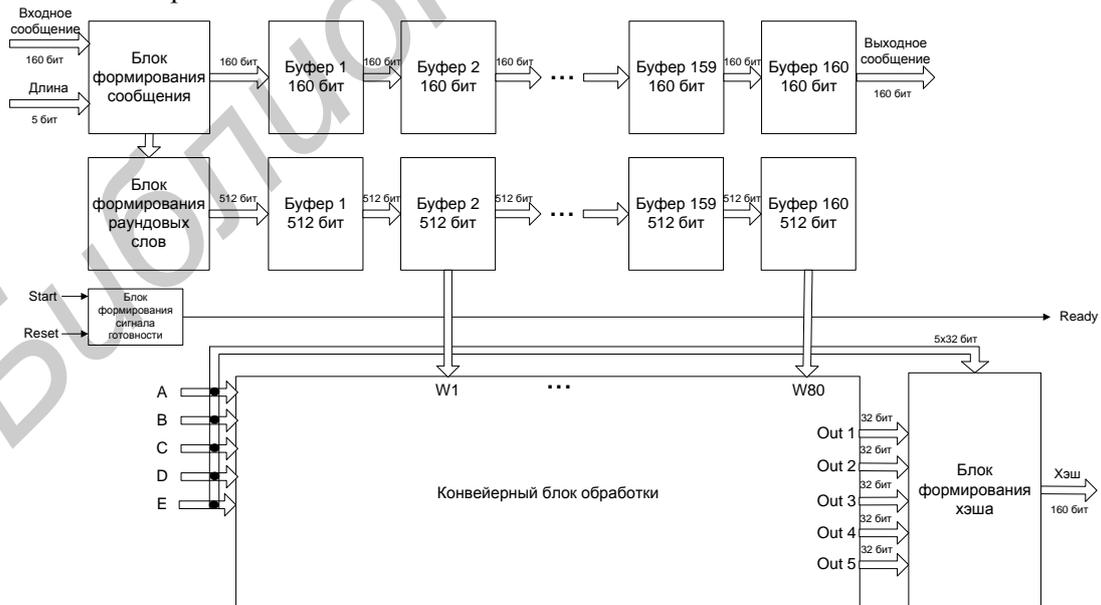


Рис. 6. 162-ступенчатая конвейерная схема построения специализированного процессора

Конвейерный блок обработки (рис. 7) данной схемы состоит из 160 вычислительных блоков двух типов. Первый тип (нечетные блоки) имеет структуру, показанную на рис. 5а. Второй тип (четные блоки) имеет структуру, показанную на рис. 5, б.

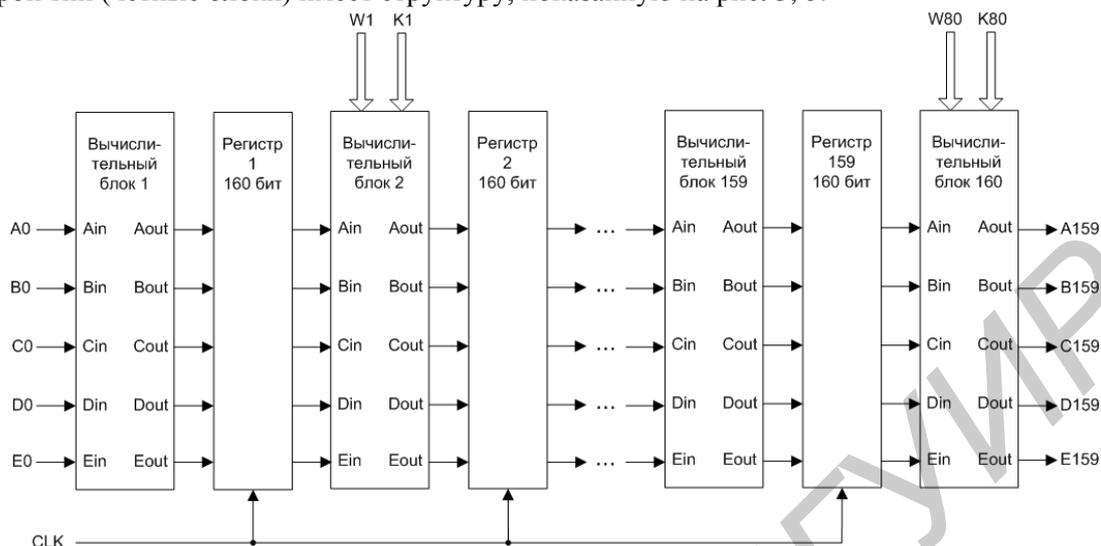


Рис. 7. Структура конвейерного блока обработки для 162-ступенчатой схемы построения специализированного процессора

В данном варианте построения специализированного процессора раундовые слова из исходного сообщения используются только на половине ступеней конвейера, однако необходимо буферизировать эти слова на каждой ступени для сохранения целостности данных. Увеличение числа ступеней позволяет уменьшить количество уровней логики в конвейерной схеме, что, в свою очередь, увеличивает пропускную способность специализированного процессора. Однако при этом необходимо удвоить количество буферных регистров, использующихся для хранения переменных, раундовых слов и исходного сообщения, что приводит к увеличению затрачиваемых аппаратных ресурсов. Для каждого из рассмотренных вариантов построения специализированных процессоров было разработано VHDL-описание и выполнен синтез для FPGA-кристалла XC5VLX110.

Результаты исследований

В результате анализа возможных реализаций алгоритма SHA-1 было построено 3 тестовых специализированных процессора, характеристики которых приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики конвейерных процессоров алгоритма SHA-1, реализованных на кристалле Xilinx XC5VLX110

№	Вариант построения	Аппаратные затраты (Slices)	Производительность, (Гбит/с)	Частота, МГц
1.	82-ступенчатый конвейер	6869 (39 %)	93,98	197,083
2.	83-ступенчатый конвейер	7547 (43 %)	84,02	176,211
3.	162-ступенчатый конвейер	8215 (47 %)	105,01	220,213

Вариант процессора, построенного с использованием 82-ступенчатой конвейерной схемы, требует минимальных затрат ресурсов кристалла, и при этом опережает по показателям производительности и частоты тот вариант процессора, который построен с использованием 83-ступенчатой конвейерной схемы. Вариант процессора, построенного с использованием 162-ступенчатой конвейерной схемы, требует максимальных затрат ресурсов кристалла, однако демонстрирует лучшие показатели производительности и частоты. Ввиду работы рассматриваемых процессоров с входными данными ограниченной длины, эффективно использоваться такие процессоры могут только при решении конкретных задач, требующих высоких скоростей (до 100 Гбит/с) обработки входных сообщений ограниченной длины. По причине указанной особенности рассматриваемых процессоров, они не могут использоваться в качестве универсального вычислительного средства для нахождения хэша от входного сообщения произвольной длины (ограниченной только требованиями самого алгоритма).

SHA-1), следовательно, будет не совсем корректным сравнение их характеристик с известными реализованными универсальными процессорами (табл. 3) алгоритма SHA-1, построенными в том числе с использованием элементов конвейера.

Таблица 3. Характеристики известных аппаратных реализаций алгоритма SHA-1

№	Платформа	Аппаратные затраты (Slices)	Производительность, (Мбит/с)	Источник
1.	Xilinx XC2V1000	4258	3 541	[2]
2.	Xilinx XC2S100	423	212	[3]
3.	Xilinx 4VSX35FF668-12	2494	-	[4]
4.	Xilinx XCV1000	1480	1024	[5]
5.	Altera Flex10KE50	1191	61	[6]

Необходимо отметить, что известные универсальные аппаратные реализации алгоритма чаще имеют итеративную архитектуру (а не конвейерную), поскольку количество выполняемых итераций алгоритма зависит от длины входных данных и заранее неизвестно.

Заключение

Проведен анализ возможностей аппаратных реализаций алгоритма криптографического хеширования SHA-1 на конвейерных схемах. По результатам анализа построено 3 тестовых специализированных процессора. Исследована их производительность и возможность использования для решения конкретных задач. Целесообразно продолжать исследования по данной тематике, поскольку усматриваются возможности дальнейшего увеличения количества ступеней конвейера для аппаратной реализации алгоритма SHA-1 на базе выбранного кристалла FPGA. В качестве сферы применения исследуемых аппаратных реализаций стоит рассматривать сферу защиты информации, в частности такие ее элементы как «идентификация пользователя» и «верификация целостности данных».

ANALYSIS OF IMPLEMENTATIONS OF THE CRYPTOGRAPHIC HASH FUNCTION SHA-1 BASED ON PIPELINE CIRCUITS

E.V. LISTOPAD

Abstract

An analysis of hardware implementations of the cryptographic hash function SHA-1 based on pipeline circuits with different numbers of logic levels was made in this paper. The hardware implementations of the hash function SHA-1 for high performance applications were described.

Keywords: cryptographic hash function SHA-1, pipeline circuit, specialized processor.

Список литературы

1. FIPS PUB 180-2:1996, Secure Hash Standard (SHA-1), National Institute of Standards and Technology.
2. Lee Y., Chan H., Verbauwhede I. // Proc. of ASAP, 2006, P. 354–359.
3. Guoping Wang. An Efficient Implementation of SHA-1 Hash Function [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://xa.yimg.com/kq/groups/19985088/1445823352/name/5.pdf>. – Дата доступа: 25.06.2015.
4. Murat Aşkar, Tuğba Şiltu Çelebi // ICSTurkey, 2007, P. 85–89.
5. Roar Lien, Tim Grembowski, Kris Gaj. A 1 Gbit/s Partially Unrolled Architecture of Hash Functions SHA-1 and SHA-512 [Электронный ресурс]. – 2004. – Режим доступа: <http://www.ece.iastate.edu/~zambreno/classes/cpre583/documents/LieGre04A.pdf>. – Дата доступа: 25.06.2015.
6. Mohamed KhaJil Hani, Ahmad Zoo Sha'ameri, Chong Wei Sheng. Pipeline Implementation of Secure Hash Algorithm (SHA-1) for Cryptographic Application [Электронный ресурс]. – 2000. – Режим доступа: http://eprints.utm.my/10992/1/MohamedKhalilHani2000_PipelineImplementationofSecureHash.pdf. – Дата доступа: 25.06.2015.

УДК 621.315.592

ФОРМИРОВАНИЕ МАССИВОВ НАНОСТРУКТУР ИЗ ЛЕГИРОВАННОГО И НЕЛЕГИРОВАННОГО ОКСИДА ЦИНКА МЕТОДАМИ ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

Е.Б. ЧУБЕНКО, С.В. РЕДЬКО, В.А. ПЕТРОВИЧ, В.П. БОНДАРЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 13 июля 2015*

Проведены исследования процессов формирования массивов легированных и нелегированных наноструктур из оксида цинка методами электрохимического и химического осаждения из жидкой фазы. Определены параметры процесса электрохимического осаждения, при которых происходит формирование массивов наноструктур оксида цинка, легированного эрбием. Изучено влияние параметров процесса химического гидротермального осаждения на структурные свойства массивов нанокристаллов нелегированного оксида цинка. Получены массивы наноструктур легированного и нелегированного оксида цинка, сформированных гидротермальным и электрохимическим методами, которые могут быть использованы в качестве функциональных слоев в фотовольтаических и оптоэлектронных приборах.

Ключевые слова: нанокристаллические структуры, оксид цинка, гидротермальное осаждение, электрохимическое осаждение, легирование.

Введение

Широкозонные полупроводники представляют большой интерес для электроники в качестве материалов для изготовления светоизлучающих устройств синего и УФ-диапазонов, фотовольтаических и мощных электронных приборов [1]. К таким материалам относится оксид цинка (ZnO) – прямозонный бинарный полупроводник с шириной запрещенной зоны 3,37 эВ при 300 К [2]. По своим физическим свойствам ZnO сравним с широко применяемым в настоящее время другим полупроводником – нитридом галлия (GaN), однако обладает рядом преимуществ. Благодаря большей энергии связи экситона он является более эффективным материалом для светоизлучающих приборов [2]. Также ZnO в отличие от GaN может быть получен не только высокотемпературными вакуумными методами молекулярно-лучевой эпитаксии или химического осаждения из газовой фазы, но и низкотемпературными методами золь-гель, химического и электрохимического осаждения [2–4], которые позволяют одновременно обрабатывать подложки большой площади при низких затратах на технологическое оборудование. С учетом этого и высокого коэффициента пропускания в оптическом и ближнем ИК-диапазоне (не менее 80 %), ZnO рассматривается как перспективный материал для замены ГТО в тонкопленочных солнечных элементах [5]. В фотовольтаических приборах ZnO может играть роль прозрачных проводящих электродов [5] или, при легировании редкоземельными элементами, такими как эрбий (Er), функциональных ап-конверсионных слоев [6, 7]. Ионы Er способны поглощать излучение в ИК-диапазоне около 1,54 мкм, переизлучая поглощенную энергию в виде более высокоэнергетических фотонов, и расширяя, таким образом, спектр поглощаемого солнечным элементом излучения [8]. Методами химического и электрохимического осаждения также могут быть легко получены массивы наноструктур ZnO [3], позволяющие повысить эффективность работы фотовольтаических приборов за счет увеличения удельной площади поверхности активных *p-n*-переходов.

В настоящее время показана возможность формирования массивов наноструктур ZnO в жидкой фазе методом электрохимического и химического гидротермального осаждения [3, 4, 9–12], однако в опубликованных работах обычно рассматриваются частные случаи и не описываются общие механизмы, дающие представление, почему при данных условиях формируется та или иная структура [3, 12]. Более того, при очень близких условиях могут формироваться различные по своим свойствам структуры из ZnO [3].

Поэтому целью данной работы являлись исследования процессов осаждения ZnO, в том числе легированного Er, гидротермальным и электрохимическим методами из водных растворов, направленные на создание массивов нанокристаллов ZnO, предназначенных для использования в качестве функциональных слоев тонкопленочных солнечных элементов и компонентов других оптоэлектронных приборов.

Методика проведения экспериментов

Для электрохимического осаждения ZnO использовались подложки монокристаллического кремния марки КЭС-0,01 (100) и тонкие пленки никеля, сформированные на кремниевых пластинах марки КЭС-0,01 (111) электрохимическим методом, процесс получения которых подробно описан в [13]. Электрохимическое осаждение ZnO осуществлялось из водного 5 мМ раствора электролита на основе $Zn(NO_3)_2$ с добавлением 0,1 М $NaNO_3$ и 1 мМ $Er(NO_3)_3$ для легирования ZnO. Формирование ZnO осуществлялось в гальваностатическом режиме при плотностях тока 1–7,5 мА/см². Для проведения процессов электрохимического осаждения использовался потенциогальваностат Metrohm AUTOLAB PGStat 302N. Осаждение ZnO проводилось в стеклянной термостатируемой емкости, которая нагревалась на электрическом нагревателе с термодатчиком. Во время осаждения раствор постоянно перемешивался магнитной мешалкой со скоростью 120 об/мин. Подложка и платиновый вспомогательный электрод размещались вертикально на расстоянии около 1 см друг от друга. Для измерения потенциала рабочего электрода использовался стандартный хлорсеребряный Ag/AgCl электрод сравнения (далее все значения электродных потенциалов в настоящей работе приводятся относительно данного электрода). Погружение и извлечение подложек осуществлялось из нагретого до целевой температуры раствора. После завершения процесса осаждения подложки промывались деионизованной водой и сушились на воздухе.

Осаждение ZnO гидротермальным методом проводилось на подложках из монокристаллического кремния марки КЭС-0,01 (111). Для этого использовался водный 0,1 М раствор $Zn(NO_3)_2$, в который добавлялся гексаметиленetetрамин $(CH_2)_6N_4$ в концентрации 0,1 М; pH приготовленных растворов находился в пределах 3–4 и нормировался при комнатной температуре 20 °С добавлением HNO_3 . Процесс осаждения проводился в стеклянном термостатируемом автоклаве объемом около 50 мл, для нагрева которого использовался электрический нагреватель с термодатчиком. Термодатчик погружался в раствор и располагался в непосредственной близости от подложек для более точного контроля температуры. Подложки размещались горизонтально лицевой стороной вниз на специальном фторопластовом держателе. Перед проведением процесса с поверхности кремния удалялся слой естественного SiO_2 в 4,5%-м растворе HF. При выдержке в течение 15 мин достигалось не только удаление слоя SiO_2 , но и водородная пассивация поверхности кремния, которая способствует формированию более плотных пленок ZnO [14]. Контроль пассивации поверхности осуществлялся по углу смачивания кремния деионизованной водой. Подготовленные таким образом подложки помещались в раствор при температуре 20 °С, после чего в течение 30 мин осуществлялся нагрев автоклава до целевой температуры, при которой он выдерживался заданное время. Извлечение подложек осуществлялось из нагретого раствора, далее они промывались деионизованной водой и сушились на воздухе.

Исследование структурных свойств полученных образцов со слоем ZnO проводилось методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Hitachi S-4800. Элементный состав образцов исследовался на энергодисперсионном спектрометре Bruker QUANTAX 200. Для исследования фазового состава использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН-3М.

Электрохимическое осаждение оксида цинка

На рис. 1 показаны циклические вольтамперограммы раствора для электрохимического осаждения ZnO, с добавлением Er(NO₃)₃, полученные при температуре 80 °С на металлическом платиновом и полупроводниковом электроде из монокристаллического кремния. Плотность катодного тока при одинаковом потенциале для платинового электрода выше, что обусловлено большей скоростью протекания электрохимических реакций ввиду более высокой проводимости металлического электрода по сравнению с кремниевым.

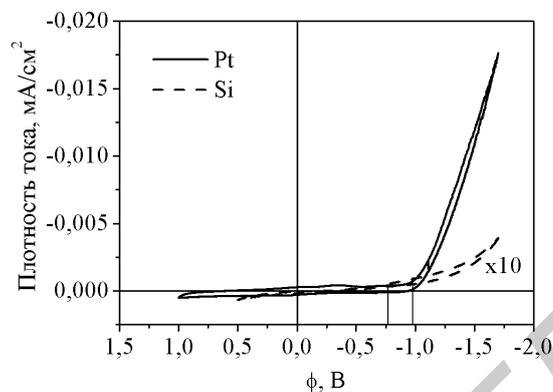


Рис. 1. Циклические вольтамперограммы платинового и кремниевого электрода в водном растворе 5 мМ Zn(NO₃)₂, 1 мМ Er(NO₃)₃, 0,1 М NaNO₃, снятые при температуре электролита 80 °С и скорости сканирования 500 мВ/с

В области от $-0,8$ до -1 В на кривых присутствует характерное плато тока, связанное с формированием ZnO [15]. Электрохимический потенциал осаждения металлического Er равен $-2,6$ В [16], поэтому в водных растворах его восстановление в чистом виде невозможно из-за прямого электролитического разложения воды с выделением молекулярного водорода, происходящего на катоде в водных растворах при потенциалах ниже -1 В [16]. Однако в растворах на основе нитратов металлов возможно восстановление оксидов металлов с промежуточным образованием гидроксидов. Ионы кислотного осадка азотной кислоты при потенциале $-0,189$ В [16] восстанавливаются до ионов кислотного осадка азотистой кислоты по электрохимической реакции с образованием гидроксид ионов OH⁻:



Возрастание pH в прикатодной области из-за образования большого количества ионов OH⁻ приводит к образованию Er(OH)₃, который затем разлагается на Er₂O₃ и H₂O [17]:



При сканировании в области потенциалов более отрицательных чем -1 В было отмечено формирование Er(OH)₃ в прикатодной области в виде рыхлого осадка. Осаждение ZnO в использованном растворе на основе Zn(NO₃)₂ происходит по такому же механизму [15]:



однако минимальный потенциал осаждения ZnO ограничен потенциалом формирования металлического Zn, равным $-0,95$ В [15, 16]. Максимальное значение потенциала формирования ZnO ограничено величиной около $-0,7$ В, что связано с низкой скоростью диффузии реагентов и малой величиной константы скорости реакции [15].

Так как в использованном растворе возможно выделение Er₂O₃ в интервале потенциалов восстановления ZnO, то данный раствор был признан подходящим для осаждения системы ZnO/Er₂O₃.

На рис. 2 представлены электронные микрофотографии поверхности и поперечного скола пленок ZnO/Er₂O₃, полученных при различной плотности катодного тока.

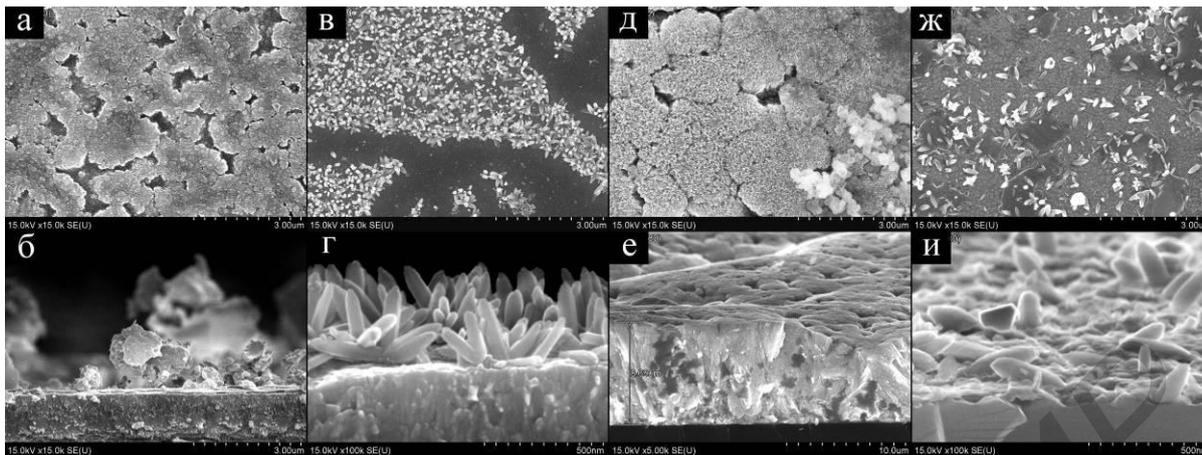


Рис. 2. Электронные микрофотографии поверхности и поперечного скола образцов пленок $\text{ZnO}/\text{Er}_2\text{O}_3$, осажденных на никель при плотности тока $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ (а, б) и $5 \text{ mA}/\text{cm}^2$ (в, з) и на монокристаллический кремний при плотности катодного тока $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ (д, е) и $5 \text{ mA}/\text{cm}^2$ (ж, и)

При плотностях тока около $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ происходит формирование сплошной пленки $\text{ZnO}/\text{Er}_2\text{O}_3$, включающей по данным рентгеновского микроанализа 3–7 ат.% Er, находящегося в составе оксида или гидроксида. При плотностях тока $5 \text{ mA}/\text{cm}^2$ и более происходит формирование отдельных кристаллов $\text{ZnO}/\text{Er}_2\text{O}_3$, диаметром 50–100 нм, с несколько меньшей концентрацией атомов Er 1,2–6 ат.%. Открытая поверхность подложки между отдельными кристаллами $\text{ZnO}/\text{Er}_2\text{O}_3$, осажденными при больших плотностях тока, покрыта тонким поверхностным слоем, лучше заметным на кремниевых подложках, состоящая из $\text{Er}(\text{OH})_3$ и ZnO [17]. При этом характер изменения концентрации эрбия в пленках $\text{ZnO}/\text{Er}_2\text{O}_3$ в зависимости от плотности тока для разных типов подложек различен (рис. 3). Для кремниевых подложек концентрация эрбия возрастает с увеличением плотности тока, а для металлических никелевых – уменьшается.

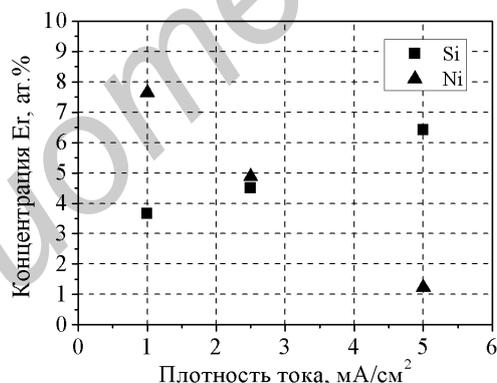


Рис. 3. Концентрация атомов Er в пленках $\text{ZnO}/\text{Er}_2\text{O}_3$ в зависимости от плотности тока осаждения для кремниевых и никелевых подложек

Для никелевых подложек характерно более плотное расположение кристаллов $\text{ZnO}/\text{Er}_2\text{O}_3$, что связано с уменьшением критического диаметра зародышей с ростом проводимости подложки на начальных стадиях роста пленки ZnO [18]. Меньшая концентрация кристаллов $\text{ZnO}/\text{Er}_2\text{O}_3$ на поверхности кремниевой подложки и, соответственно, большая площадь поверхностного слоя $\text{Er}(\text{OH})_3/\text{ZnO}$, в котором содержание Er может быть выше, чем в кристаллах $\text{ZnO}/\text{Er}_2\text{O}_3$ [17], вероятно приводит к большей наблюдаемой концентрации эрбия в пленках $\text{ZnO}/\text{Er}_2\text{O}_3$, полученных на кремниевых подложках.

Отличия в морфологии формирующихся при малых и больших плотностях тока пленок $\text{ZnO}/\text{Er}_2\text{O}_3$ связаны с изменением скорости протекания электрохимических реакций. Так как процесс электрохимического осаждения оксидов металлов из водных растворов солей азотной кислоты протекает в несколько стадий, одна из которых является чисто химической и связана с непосредственным разложением образующегося в прикатодной области гидроксида металла с

образованием соответствующего оксида (реакции 2, 3), скорость которой не зависит от электрических параметров процесса осаждения, то при увеличении плотности тока возрастает скорость только электрохимической стадии процесса, в результате которой образуется гидроксид (1). Это приводит к тому, что большое количество образующихся гидроксидов Zn и Er не успевает разлагаться с выделением оксидов и блокирует подход реагентов к поверхности катода [17]. При этом формируются отдельные нанокристаллы. При низких плотностях тока образуется сплошная пленка ZnO с встроенными частицами Er₂O₃.

Гидротермальное осаждение оксида цинка

На структурные свойства кристаллов ZnO, сформированных гидротермальным методом, влияет ряд факторов, ключевыми из которых является температура раствора и продолжительность процесса осаждения. На рис. 4 и 5 приведены электронные микрофотографии кристаллов ZnO, полученных при различных условиях.

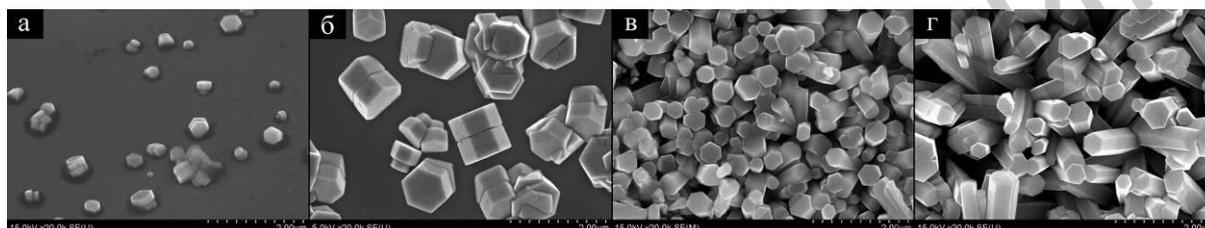


Рис. 4. Электронные микрофотографии поверхности слоя нанокристаллов ZnO, сформированных в течение одинакового промежутка времени на кремниевых подложках при температуре: 65 °C (а), 75 °C (б), 85 °C (в), 95 °C (г)

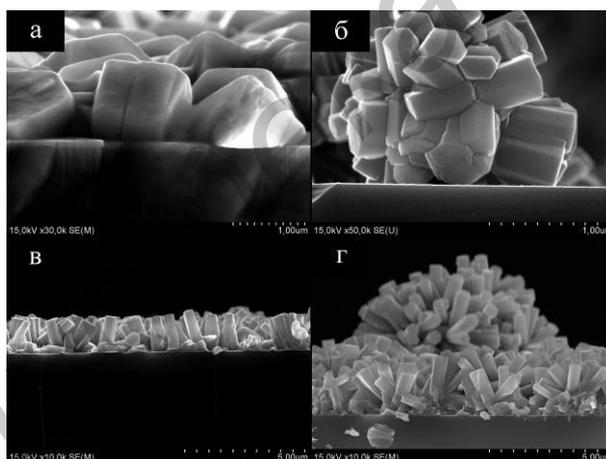


Рис. 5. Электронные микрофотографии поперечного скола кремниевых пластин со слоем нанокристаллов ZnO, сформированных при температуре 75 °C (а, б) и 95 °C (в, г) в течение 90 и 210 мин, соответственно (следует обратить внимание на различный масштаб изображений)

Диаметр кристаллов ZnO при увеличении температуры от 75 до 95 °C уменьшается от 800 до 500 нм (рис 6, а). При снижении температуры раствора до 65 °C диаметр кристаллов также уменьшается. Плотность расположения кристаллов ZnO возрастает с увеличением температуры, что связано с активацией большего количества центров зарождения кристаллов ZnO с возрастанием энергии системы. При увеличении продолжительности процесса толщина полученной пленки кристаллов ZnO ожидаемо возрастает (рис. 6, б). Диаметр кристаллов при этом не увеличивается. Однако при большой продолжительности процесса однородность пленки нарушается образованием крупных агломератов кристаллов ZnO (рис. 5). Образование данных агломератов объясняет не пропорциональное увеличение толщины слоя кристаллов ZnO с увеличением продолжительности процесса.

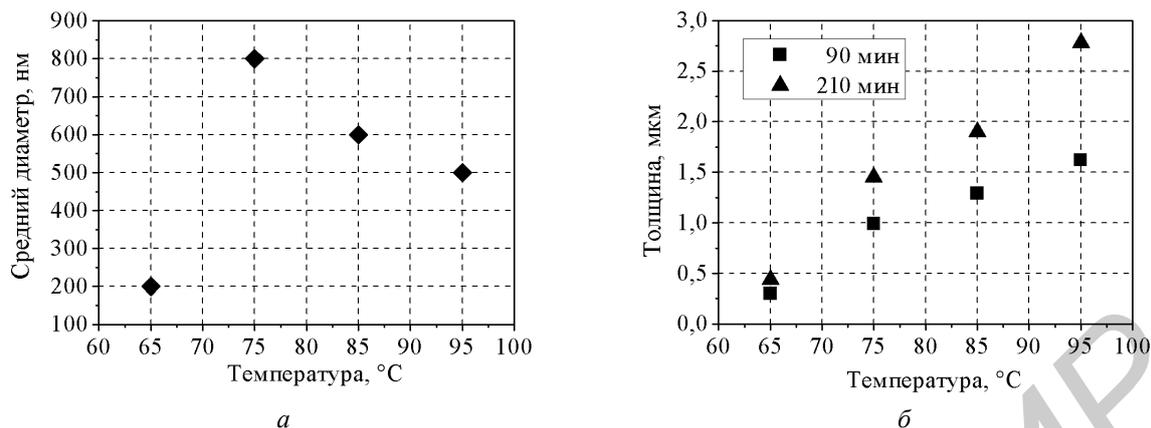
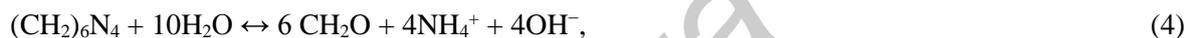


Рис. 6. Зависимость среднего диаметра (а) и толщины (б) слоя кристаллов ZnO в зависимости от температуры процесса гидротермального осаждения

Независимо от режима гидротермального осаждения сформированные кристаллы ZnO по данным рентгеновского микроанализа имели стехиометрический состав. Это связано с особенностями процесса гидротермального осаждения ZnO, в котором не может происходить формирование металлического Zn или встраивание ионов OH^- в растущие кристаллы ZnO [11]. $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ в растворе в процессе осаждения ZnO разлагается с образованием NH_3 и CH_2O . NH_3 растворяется в воде, образуя ионы OH^- , которые, в свою очередь, реагируют с катионами Zn^{2+} . В результате последней реакции образуется ZnO. Последовательность химических реакций может быть представлена следующим образом [11]:



На начальном этапе процесса гидротермального осаждения образование ZnO происходит с промежуточным формированием $\text{Zn}(\text{OH})_2$. С уменьшением концентрации катионов Zn^{2+} и возрастанием pH $\text{Zn}(\text{OH})_2$ становится термодинамически нестабильным и растворяется. При этом процесс образования ZnO начинает протекать напрямую, без образования гидроксида [19].

Направленный рост кристаллов ZnO вдоль кристаллографического направления [0002], который был определен методом рентгеновской дифрактометрии, обусловлен присутствием $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ в растворе. Молекулы $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$, являющегося неполярным хелатообразующим реагентом, избирательно присоединяются к неполярным плоскостям растущих кристаллов ZnO, перекрывая к ним доступ ионов Zn^{2+} . При этом остается открытой только положительно заряженная полярная плоскость (0002), к которой происходит преципитация структурных элементов растущих кристаллов ZnO [11]. Отрицательно заряженная плоскость (000 $\bar{2}$) за счет сил кулоновского взаимодействия притягивает положительно заряженные гидратированные молекулы $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$, на которые, в свою очередь, может происходить осаждение ZnO [20]. В этом случае кристалл ZnO начинает расти в двух направлениях одновременно, с образованием характерной линии раздела в месте стыка. Это объясняет сдвоенную форму кристаллов ZnO, наблюдаемую на образцах, полученных при низких температурах раствора (рис. 4, а, б).

Заключение

В настоящей работе показано, что методы электрохимического и гидротермального осаждения из жидкой фазы позволяют сформировать однородные массивы нанокристаллов легированного и нелегированного ZnO. Массивы нанокристаллов ZnO, легированного эрбием, формируются электрохимическим методом при плотностях катодного тока осаждения больше 5 mA/cm^2 . При меньших плотностях тока образуются сплошные пленки ZnO/Er₂O₃. Методом гидротермального осаждения массивы нанокристаллов ZnO могут быть получены при температурах процесса выше 85 °C. При более низких температурах формируются отдельные крупные кристаллы ZnO, хаотично расположенные на подложке. Полученные однородные

массивы нанокристаллов ZnO могут быть использованы в качестве функциональных слоев в различных оптоэлектронных и фотовольтаических приборах.

Работа выполнялась в рамках задания 1.2.08 ГПНИ Республики Беларусь «Электроника и фотоника» и гранта БРФФИ X14MB-009.

FORMATION OF DOPED AND UNDOPED ZnO NANOSTRUCTURE ARRAYS BY LIQUID PHASE DEPOSITION TECHNIQUES

E.B. CHUBENKO, S.V. REDKO, V.A. PETROVICH, V.P. BONDARENKO

Abstract

The results of study of electrochemical and hydrothermal deposition of doped and undoped zinc oxide nanostructure arrays in liquid phase are presented in the article. The values of parameters of electrochemical deposition process at which formation of erbium doped zinc oxide nanostructures arrays occurs are determined. The influence of parameters of hydrothermal deposition process on structural properties of undoped zinc oxide is investigated. Obtained arrays of doped and undoped zinc oxide nanostructures deposited by hydrothermal and electrochemical methods can be used in photovoltaic and optoelectronic applications.

Keywords: nanocrystal structures, zinc oxide, hydrothermal deposition, electrochemical deposition, doping.

Список литературы

1. Wide Bandgap Semiconductors: Fundamental Properties and Modern Photonic and Electronic Devices / Eds. K. Takahashi, A. Yoshikawa, A. Sandhu. New York, 2007.
2. Özgür Ü., Alivov Ya.I., Liu C., and et al. // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 98. 041301.
3. Baruah S., Dutta J. // Sci. Technol. Adv. Mater. 2009. Vol. 10. 013001.
4. Lincot D. // Thin Solid Films. 2005. Vol. 487. P. 40–48.
5. Ohta H., Hosono H. // Mater. Today. 2004. Vol. 7, P. 42–51.
6. Liu B., Qiu S., Hu R., and et al. // Appl. Surf. Sci. 2012. Vol. 259, P. 705–710.
7. Ivanova S., Pellé F. // J. Opt. Soc. Am. B. 2009. Vol. 26. P. 1930–1938.
8. Trupke T., Shalav A., Richards B.S., and et al. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2006. Vol. 90, P. 3327–3338.
9. Cembrero J., Busquets-Mataix D. // Thin Solid Films. 2009. Vol. 517. P. 2859–2864.
10. Ashfold M.N.R., Doherty R.P., Ndifor-Angwafor N.G., and et al. // Thin Solid Films. 2007. Vol. 515. P. 8679–8683.
11. Baruah S., Dutta J. // J. Cryst. Growth. 2009. Vol. 311. P. 2549–2554.
12. Song J., Baek S., Lim S. // Physica B. 2008. Vol. 403. P. 1960–1963.
13. Chubenko E.B., Klyshko A.A., Bondarenko V.P., and et al. // Electrochim. Acta. 2011. Vol. 56. P. 4031–4036.
14. Liu C., Masuda Y., Wu Y., and et al. // Thin Solid Films. 2006. Vol. 503. P. 110–114.
15. Yoshida T., Komatsu D., Shimokawa N., and et al. // Thin Solid Films. 2004. Vol. 451–452. P. 166–169.
16. Справочник по электрохимии / Под ред. А.М. Сухотина. Ленинград, 1981.
17. Goux A., Pauporte T., Lincot D. // J. Electroanal. Chem. 2006, Vol. 587. P. 193–202.
18. Wellings J.S., Chaure N.B., Heavens S.N., and et al. // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516. P. 3893–3898.
19. Musić S., Popović S., Maljković M., et al. // J. Alloys Compd. 2002. Vol. 347. P. 324–332.
20. Wang B.G., Shi E.W., Zhong W.Z. // Cryst. Res. Technol. 1998. Vol. 33. P. 937–941.

УДК 519.2:005

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПРОГНОЗИРУЕМОСТИ ПРОЦЕССОВ СО СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРОЙ

А.В. ОВСЯННИКОВ, В.М. КОЗЕЛ, Е.А. ХАРИТОВИЧ

Белорусский государственный университет
Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь

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

Поступила в редакцию 25 мая 2015

Приведены необходимые теоретические сведения для анализа информационной прогнозируемости процессов случайной структуры. Подробно рассмотрен случай с сосредоточенной сменой структуры. Приведен пример анализа информационной прогнозируемости стохастического процесса с сосредоточенной сменой структуры сноса.

Ключевые слова: информационная прогнозируемость, стохастический процесс, одномерная нестационарная плотность, структура.

Введение

Активный интерес к исследованию систем случайной структуры постоянен и обусловлен, с одной стороны, возможностями, реализуемыми при их применении, с другой – поиском адекватных моделей для описания реальных систем. Чрезвычайно важной и самостоятельной задачей в исследовании является задача прогнозирования поведения таких систем, описываемых марковскими стохастическими процессами со случайной структурой (ПСС). В общем случае процесс со случайной структурой может быть охарактеризован как кусочно-непрерывный, смешанный двухкомпонентный процесс $\{\xi_t = \xi(t), s(t)\}$, $t \in (t_0, T)$, где ξ_t – непрерывная компонента, $s(t) = s_q$, $q = \overline{1, Q}$ – дискретная компонента [1]. Различный характер взаимозависимости компонент $\{\xi_t, s(t)\}$ и способ перехода от одной структуры к другой определяет вид ПСС [2,3].

Решение задачи прогнозирования ПСС может включать оценку этой возможности (осуществления прогноза), заключающуюся в анализе функции информационной прогнозируемости (ИП) параметров процесса [4], например, математического ожидания или состояния процесса, характеризующегося номером (индексом) q .

Цель работы состоит в анализе информационной прогнозируемости ПСС, определении ИП математического ожидания процесса с сосредоточенными переходами между состояниями, определении ИП состояний ПСС.

Информационная прогнозируемость параметров ПСС

Пусть относительно марковского стохастического ПСС ξ_t известна его одномерная нестационарная плотность $f = f(t, \xi, s; \mathbf{X}) = p^s(t) f^s(t, \xi; \mathbf{X})$, где $s = \{s_q\}$, $q = \overline{1, Q}$ – конечное число структур, $\mathbf{X} = \{x_i\}$, $i = \overline{1, l}$ – набор параметров плотности, причем, в общем случае, $x = x(t)$. Нестационарная плотность (далее плотность) $f^s = f^s(t, \xi; \mathbf{X})$ при каждом

фиксированном s удовлетворяет уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК) с начальным $f^s(t_0, \xi; \mathbf{X}) = f_0^s$ и граничным $f^s(t, \pm\infty; \mathbf{X}) = f_{\pm\infty}^s$ условиями. Дискретный марковский процесс $s(t)$ характеризуется нестационарной вероятностью состояния $p_i^q = p^q(t)$ и вероятностью перехода $p_i^{qn} = p(t, s_q | t', s_n)$, $q, n = \overline{1, Q}$.

В дальнейшем будем полагать, что для плотностей f^s и p_i^s выполняются общие условия регулярности, которые, с учетом их зависимости от t , заключаются в следующем:

а) плотность f^s и производные $\partial f^s / \partial x_i$ непрерывны по ξ_i на интервале соответствующем $s = s_q$, кроме, может быть, точек t_{qn}, t_{nq} – моментов времени смены структуры стохастического процесса;

б) $\forall i = \overline{1, l}$ существует и конечен интеграл $\int (\partial f^s / \partial x_i)^2 (f^s)^{-1} d\xi$, где $f^s \neq 0$ для любого $\xi_i \in \Xi \subset R^1$ на интервале соответствующем $s = s_q$;

с) плотность p_i^s и производные $\partial p_i^s / \partial s$, $\partial f^s / \partial s$ непрерывны на интервале соответствующем $s = s_q$, кроме, может быть, точек t_{qn}, t_{nq} – моментов времени смены структуры стохастического процесса;

д) производные $\partial f^s / \partial x_i$, $\partial p_i^s / \partial s$, $\partial f^s / \partial s$ существуют и непрерывны на t , кроме, может быть, точки t_0 и моментов времени смены структуры стохастического процесса t_{qn}, t_{nq} .

В условиях а)–д) информационную прогнозируемость вектора параметров \mathbf{X} плотности f^s по Фишеру определим как матрицу с элементами

$$\mathbf{IP}_{\mathbf{X}}(t) = \begin{bmatrix} IP_{x_i x_j}(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $IP_{x_i x_j}(t) = \sum_q E(\partial \ln f / \partial x_i)(\partial \ln f / \partial x_j) = \sum_q p_i^q IP_{x_i x_j}^q(t)$, $IP_{x_i x_j}^q(t) = E(\partial \ln f^q / \partial x_i)(\partial \ln f^q / \partial x_j)$, E – символ математического ожидания, $\mathbf{IP}_{\mathbf{X}}(t) \geq 0$, $t \geq 0$.

В частном случае одномерного параметрического множества, ИП параметра $\mathbf{X} = \{x\}$ представляется функцией информационного количества Фишера, зависящего от времени $IP_x(t) = \sum_q p_t^q IP_x^q(t)^2$, $IP_x^q(t) = E(\partial \ln f^q / \partial x)^2$. Функция $IP_x(t)$ в точке t_0 и моментах времени изменения структуры t_{qn}, t_{nq} определяется условиями f_0, f_{qn}, f_{nq} и условием регулярности, т.е. $IP_x(t_0) = \lim_{t \rightarrow t_0} IP_x(t)$, $IP_x(t_{qn}) = \lim_{t \rightarrow t_{qn}^+} IP_x(t) = \lim_{t \rightarrow t_{qn}^-} IP_x(t)$, $IP_x(t_{nq}) = \lim_{t \rightarrow t_{nq}} IP_x(t)$.

Приведенное выше определение (1) остается справедливым для плотностей вероятности, в которых хотя бы один из параметров является функцией времени. Очевидно также, что если $IP_{x_i x_j}^q(t) = E(\partial \ln f^q / \partial x_i)(\partial \ln f^q / \partial x_j) = 0$, $i \neq j$, $i, j = \overline{1, l}$, то матрица

$$\mathbf{IP}_{\mathbf{X}}(t) = \text{diag}[IP_x(t)], \quad i = \overline{1, l}.$$

Рассмотрим задачу анализа системы случайной структуры, в которой на периоде ее фиксированного состояния плотность f^q можно аппроксимировать гауссовской или близкой к

ней плотностью $f^q = (2\pi d_t^q)^{-1/2} \exp\left[-\left[(\xi_t - m_t^q) / \sqrt{2d_t^q}\right]^2\right]$, с параметрами математического

ожидания m_t^q и дисперсии d_t^q . Вероятностная модель, описывающая дискретный марковский

процесс $s(t) = s_q$, может быть представлена уравнениями Колмогорова $\dot{p}_t^q = \sum_{n=1, n \neq q}^Q p_t^n \lambda_t^{qn} - p_t^q \lambda_t^{qq}$,

где обозначено $\dot{p}_t^q = dp_t^q / dt$, $p^q(t_0) = p_0^q$, $p^q(t_{qn}) = p_{qn}^q$ – начальные условия, $\lambda_t^{qn} \geq 0$, $\lambda_t^{qq} \geq 0$

– интенсивности переходов. Тогда, при $\mathbf{X} = \{m_t^q, d_t^q\}$ получаем

$$\mathbf{IP}_{\mathbf{X}}(t) = \text{diag}[IP_m(t); IP_d(t)], \quad (2)$$

$$\text{где } IP_m(t) = \sum_q IP_m^q(t) = \sum_q p_t^q [d_t^q]^{-1}, \quad IP_d(t) = \sum_q IP_d^q(t) = 0,5 \sum_s p_t^s [d_t^s]^{-2}. \quad (3)$$

Рассмотрим ИП состояния стохастического процесса. В этом случае формула (1) преобразуется к виду

$$IP_s(t) = \sum_q IP_q(t) = IP_{p,s}(t) + \sum_q p_t^q IP_q^q(t), \quad (4)$$

где $IP_q(t) = E(\partial \ln f / \partial q)^2$, $IP_{p,s}(t) = \sum_q p_t^q (\partial \ln p_t^q / \partial q)^2$ – компонента ИП, связанная с нестационарной плотностью состояния марковского процесса p_t^q , $IP_q^q(t) = E(\partial \ln f^q / \partial q)^2$ – компонента, связанная с вкладом в ИП условной нестационарной плотности f^q .

В рамках гауссовской аппроксимации [2,3] условной плотности f^q функция $IP_q^q(t)$ упрощается:

$$IP_q^q(t) = E(\partial \ln f^q / \partial q)^2 = [(m_t^q)'_q]^2 / d_t^q + [(d_t^q)'_q / d_t^q]^2 / 2. \quad (5)$$

Таким образом, определяя вероятности состояний p_t^q из уравнений Колмогорова, параметры гауссовской аппроксимации m_t^q , d_t^q и их производные по параметру структуры q , вычисляем функцию ИП состояния марковского процесса со случайной сменой структуры.

Информационная прогнозируемость параметров марковского процесса с сосредоточенной сменой структуры

Адекватное вероятностное описание сложных помеховых ситуаций в задачах статистической радиотехники, описание случайных составляющих статистических данных при их обработке требует использования в этих целях универсальных, обобщенных, многопараметрических моделей. В то же время аналитическое получение обобщенных нестационарных плотностей для определения функций информационных прогнозируемостей является практически неразрешимой задачей. В этом случае удобно воспользоваться подходом рассматриваемым ниже. В качестве примера для иллюстрации такого подхода рассмотрим модель обобщенного sech^k -распределения (generalized secant hyperbolic k distribution – GSHK модель) с плотностью [5]:

$$f_{cm} = uC(k)\text{sech}^k(u\xi), \quad k = v/u, \quad u, v > 0, \quad (6)$$

где $C(k) = \Gamma((1+k)/2)\Gamma(k/2)^{-1} / \sqrt{\pi}$, $\Gamma(x)$ – гамма функция.

GSHK-модель описывает широкий класс унимодальных плотностей с коэффициентом эксцесса в диапазоне от нуля (гауссовская форма плотности) до трех (двойное экспоненциальное распределение).

Стохастическое дифференциальное уравнение Ито (СДУ), отвечающее процессу со стационарной плотностью (6), имеет вид

$$\dot{\xi}_t + vb \text{th}(u\xi_t) / 2 = n_t, \quad \xi(t_0) = \xi_0, \quad \dot{\xi}_t = d\xi_t / dt, \quad (7)$$

где n_t – нормальный белый шум с нулевым средним $En_t = 0$ и дельтаобразной корреляционной функцией $En_t n_{t'} = b\delta(t'-t)$, $b = N/2$ – коэффициент диффузии, N – односторонняя спектральная плотность.

Рассмотрим кусочно-линейную аппроксимацию функции $\text{th}(u\xi_t)$, при которой СДУ (7) можно записать в следующем виде:

$$\dot{\xi}_t + a_t^q(\xi_t) = n(t), \quad \xi(t_0) = \xi_0^q, \quad \xi(t_{q_n}) = \xi_{q_n}^q, \quad (8)$$

где $a_t^q(\xi_t) = A_q + B_q \xi_t$, $A_q = vb [\text{th}(uy^q) - \text{seah}^2(uy^q)uy^q] / 2$, $B_q = vub \text{seah}^2(uy^q) / 2$, $\{y^q\}$ – множество заданных точек в области определения функции $\text{th}(u\xi_t)$, $q = \overline{1, Q}$ – индекс структуры, $Q = 3, 5, 7, \dots$ – нечетное число структур. Структурам с номерами $q = 1, Q$ соответствует $a_t^q(\xi_t) = \mp vb / 2$, а структуре с номером $q = \text{nedian}(Q) = (Q+1) / 2$ функция

$a_t^q(\xi_t) = b\nu\xi_t / 2$. Таким образом, уравнение (8) описывает ПСС при сосредоточенных переходах из одного состояния в другое [2]. Выбор набора точек $\{y^q\}$ может быть осуществлен различными способами. Так, например, можно задаться абсолютной погрешностью непрерывной кусочно-линейной аппроксимации Δ_q участка структуры, соответствующего индексу q , в виде одного из условий:

$$|y^q - \xi_t| \leq \Delta_{\xi, q}, \quad (9)$$

$$|a_t^q(\xi_t) - a_t(\xi_t)| \leq \Delta_{a, q}. \quad (10)$$

Общее число требующихся структур Q , удовлетворяющих условию (9) или (10), будет однозначно определяться методом выбранной аппроксимации.

Решение (8) имеет вид

$$\xi_t^q = \xi_0^q e^{-B_q t} - (A_q / B_q)(1 - e^{-B_q t}) + \int_{t_{qn}}^{t_{nq}} e^{B_q(\tau-t)} n(\tau) d\tau, \quad \xi(t_0) = \xi_0^q, \quad \xi(t_{qn}) = \xi_{qn}^q, \quad n = q \pm 1. \quad (11)$$

При достижении и пересечении ординарным процессом ξ_t^q границ y^{nq} , определяемых из неравенства (9) или (10), происходит смена структуры q на $n = q \pm 1$. Далее, для определенности, остановимся на кусочно-линейной аппроксимации, полученной из условия (9). Тогда, на границах $y^{nq} = y^q \pm \Delta$ (здесь обозначено $\Delta = \Delta_{\xi, q}$) происходит поглощение реализации процесса ξ_t^q и восстановление реализации ξ_t^n с начальным условием $\xi_{nq}^n = y^{nq} = y^q \pm \Delta$, т.е. конечные условия процесса в состоянии q совпадают с начальным условием в состоянии n . Математическое ожидание и дисперсия процесса (8) с учетом решения (11) имеют вид $m_t^q = \xi_{qn}^q e^{-B_q t} - (A_q / B_q)(1 - e^{-B_q t})$, $d_t^q = d_{qn}^q e^{-2B_q t} + b(1 - e^{-2B_q t}) / 2B_q$, где d_{qn}^q – накопленная к моменту времени t_{qn} дисперсия.

Таким образом, при фиксированном $s = s_q$ с учетом начальных $f_{qn}^q = f^q(t_{qn}, \xi_{qn}^q; \mathbf{X})$ и граничных $f_{nq}^n = f^q(t_{nq}, \xi_{nq}^n; \mathbf{X})$ условий обобщенные уравнения ФПК образуют систему

$$\frac{\partial f^q}{\partial t} = -\frac{\partial \Phi_q}{\partial \xi_t} - \frac{\dot{p}_t^q}{p_t^q} f^q - \sum_{n=1, n \neq q}^Q \left[\alpha_t^{nq} - \frac{p_t^n}{p_t^q} \beta_t^{qn} \right], \quad \Phi_q = a_t^q f^q - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \xi_t} (b f^q), \quad q, n = \overline{1, Q},$$

где α_t^{nq} и β_t^{qn} – функции поглощения и восстановления реализации ПСС [2]. В гауссовском приближении получаем решение в виде нестационарной плотности для участка структуры $f^q = [2\pi d_t^q]^{-1/2} \exp\left[-(\xi_t - m_t^q)^2 / 2d_t^q\right]$.

Уравнения Колмогорова для плотности p_t^s при сосредоточенных переходах в случае, когда функции поглощения и восстановления принимают простой вид $\alpha_t^{nq} = \lambda_t^{nq}(y^{nq})$, $\beta_t^{qn} = \lambda_t^{qn}(y^{qn})$ следующее:

$$\dot{p}_t^q = \sum_{n=1, n \neq q}^Q p_t^n \lambda_t^{qn}(y^{qn}) - p_t^q \lambda_t^{qq}(y^{qq}), \quad \lambda_t^{qq}(y^{qq}) = \sum_{n=1, n \neq q}^Q \lambda_t^{nq}(y^{nq}), \quad q, n = \overline{1, Q}. \quad (12)$$

Поскольку в рассматриваемой задаче допустимы переходы из текущего состояния в состояние с индексом, отличающимся от текущего только на единицу, то уравнения (12) можно упростить. Интенсивности переходов, входящие в уравнения, в первом приближении определяются как стационарные величины $\lambda_t^{nq}(y^{nq}) = p_{cm}^n / p_{cm}^q$, где p_{cm}^q – вероятность стационарного состояния структуры s_q :

$$p_{cm}^q = \int_{y^{q, q-1}}^{y^{q+1, q}} f_{cm} d\xi = F(y^{q+1, q}) - F(y^{q, q-1}), \quad p_{cm}^q = p_{cm}^{Q-q+1}, \quad q = \overline{2, Q-1}, \quad (13)$$

$$p_{cm}^1 = \int_{-\infty}^{y^{2, 1}} f_{cm} d\xi = F(y^{2, 1}), \quad p_{cm}^Q = p_{cm}^1. \quad (14)$$

Функция распределения, соответствующая плотности (6), имеет вид [4,5]

$$F(z) = \frac{2^k}{k} C(k) e^{ukz} {}_2F_1\left(\left[\frac{k}{2}, k\right], \left[1 + \frac{k}{2}\right], -e^{2uz}\right), \quad (15)$$

где ${}_2F_1$ – обобщенная гипергеометрическая функция.

Таким образом, ИП ПСС (8), определяемую формулами (1)–(5), можно вычислить с использованием формул (12)–(15).

Анализ информационной прогнозируемости параметров марковского процесса с сосредоточенной сменой структур и $Q = 3$

Пусть заданным требованиям по точности кусочно-линейной аппроксимации (9) удовлетворяет аппроксимация с $Q = 3$, т.е. $q = \overline{1,3}$, тогда СДУ (7) для этих структур имеет вид

$$\begin{cases} \dot{\xi}_t + \mu \text{sign}(q-2)/u = n(t), & \xi(t_{q2}) = \xi_{q2}^q, \text{ для } \{\xi_t \leq -u^{-1}, q=1; \xi_t \geq u^{-1}, q=3\}, \\ \dot{\xi}_t + \mu \xi_t = n(t), & \xi(t_{qn}, q) = \xi_{qn}^q, \text{ для } \{|\xi_t| \leq u^{-1}, q=2, n=1,3\}, \end{cases}$$

или в общем виде для индексов структур $q = \overline{1,3}$

$$\dot{\xi}_t + \frac{\mu}{u} \text{sign}(q-2) + \mu \xi_t (1 - |q-2|) = n(t), \quad \xi(t_{qn}) = \xi_{qn}^q, \quad q, n = \overline{1,3}, \quad q \neq n, \quad (16)$$

где $\mu = b\nu u / 2$, $y^{2,1} = -u^{-1}$, $y^{3,2} = u^{-1}$ – границы интервалов.

Параметры нестационарной плотности для соответствующих структур равны

$$\begin{cases} m_t^q = \xi_{qn}^q - \mu \text{sign}(2-q)/u, & d_t^q = d_{qn}^q + bt, \text{ для } q=1,3, \\ m_t^q = \xi_{qn}^q e^{-\mu t}, & d_t^q = d_{qn}^q e^{-2\mu t} + \sigma^2 (1 - e^{-2\mu t}), \quad \sigma^2 = (\nu u)^{-1}, \text{ для } q=2, \end{cases}$$

или в общем виде для индексов структур $q = \overline{1,3}$

$$\begin{cases} m_t^q = \xi_{qn}^q - \frac{\mu t}{u} (2-q) + \xi_{qn}^q (e^{-\mu t} - 1)(1 - |2-q|), \\ d_t^q = d_{qn}^q \rho_t^2 + \sigma^2 (1 - \rho_t^2) + [d_{qn}^q + bt - d_{qn}^q \rho_t^2 - \sigma^2 (1 - \rho_t^2)] |2-q|. \end{cases} \quad (17)$$

Вероятности стационарных состояний s_q определяем из выражений (13)–(15):

$$p_{cm}^2 = \int_{-u^{-1}}^{u^{-1}} f_{cm} d\xi = F(u^{-1}) - F(-u^{-1}),$$

$$p_{cm}^3 = \int_{-\infty}^{-u^{-1}} f_{cm} d\xi = F(-u^{-1}), \quad p_{cm}^1 = p_{cm}^3.$$

Обозначим $\lambda = \lambda^{12} = \lambda^{32} = F(-u^{-1}) [F(u^{-1}) - F(-u^{-1})]^{-1}$, $\gamma = \lambda^{21} = \lambda^{23} = \lambda^{-1}$, тогда решение уравнений (12) дает

$$\begin{cases} p_t^q = \frac{\lambda(1 - e^{-(2\lambda+\gamma)t})}{2\lambda + \gamma} = \frac{\lambda - |q-2|\lambda e^{-(2\lambda+\gamma)t}}{2\lambda + \gamma}, \text{ для } q=1,3, \\ p_t^q = \frac{\gamma + 2\lambda e^{-(2\lambda+\gamma)t}}{2\lambda + \gamma} = 1 - 2, \text{ для } q=2, \end{cases}$$

или в общем виде для индексов структур $q = \overline{1,3}$

$$p_t^q = \frac{\gamma + 2\lambda e^{-(2\lambda+\gamma)t} - (\gamma - \lambda + 3\lambda e^{-(2\lambda+\gamma)t})|q-2|}{2\lambda + \gamma}. \quad p_t^3 = p_t^1, \quad p_t^2 = 1 - 2p_t^1. \quad (18)$$

Таким образом, уравнения (16)–(18) описывают вероятностную картину марковского ПСС с сосредоточенными переходами между состояниями, число которых равно $Q = 3$. В уравнения (16)–(18) непосредственно входит индекс состояния q , поэтому все необходимые компоненты для нахождения ИП (4) и (5) можно вычислить.

Расчет функций ИП параметров ПСС (8) проведен для следующих значений параметров: $b = 0,2$, $\nu = 1$, $\xi_0 = 0$, $d_0 = 1$, $k = [0,2; 0,7]$.

На рисунках приведены зависимости, характеризующие поведение нестационарных вероятностей состояний p_t^q (рис. 1), ИП математического ожидания $IP_m^q(t)$ (рис. 2) и ИП состояния структуры $IP_q^q(t)$ (рис. 3). Для всех рисунков кривая 1 и кривая 2 соответствует параметру $k=0,2$, кривая 3 и кривая 4 – параметру $k=0,7$. Также для всех рисунков кривая 1 и кривая 3 соответствует индексу структуры $q=1$, а кривая 2 и кривая 4 – структуре с индексом $q=2$.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 1–3, показывает, что выбранный способ кусочно-линейной аппроксимации (9) функции сноса $a_t(\xi_t)$ адекватен поставленной задаче и отражает поведение реального процесса (7) со стационарной плотностью (6). Использование кусочно-линейной аппроксимации позволяет определить функции ИП математического ожидания и состояния ПСС. С ростом коэффициента k растет вероятность нахождения процесса в интервале значений второй структуры $|\xi_t| \leq \Delta = u^{-1}$ (рис. 1), в результате чего возрастает ИП математического ожидания (рис. 2) и состояния (рис. 3) этой структуры.

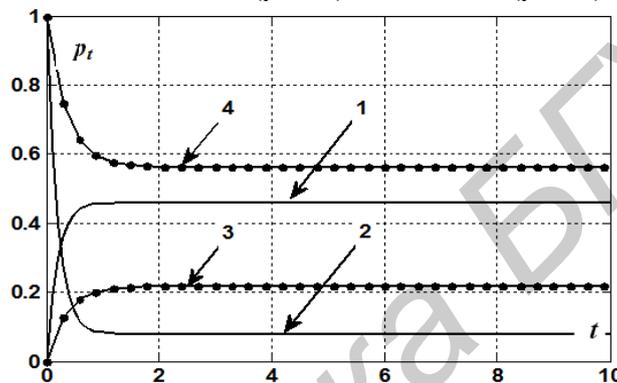


Рис. 1. Вероятности состояний: 1 – $q=1, k=0,2$; 2 – $q=2, k=0,2$;
3 – $q=1, k=0,7$; 4 – $q=2, k=0,7$

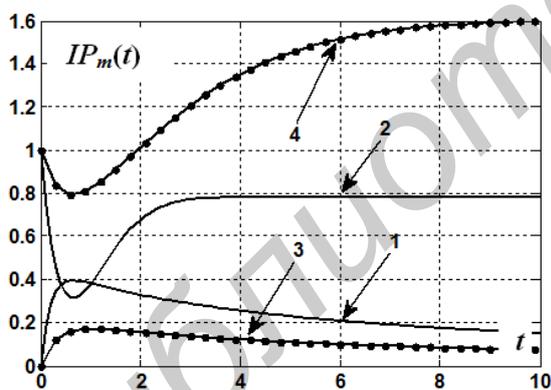


Рис. 2. ИП математического ожидания структуры:
1 – $q=1, k=0,2$; 2 – $q=2, k=0,2$;
3 – $q=1, k=0,7$; 4 – $q=2, k=0,7$

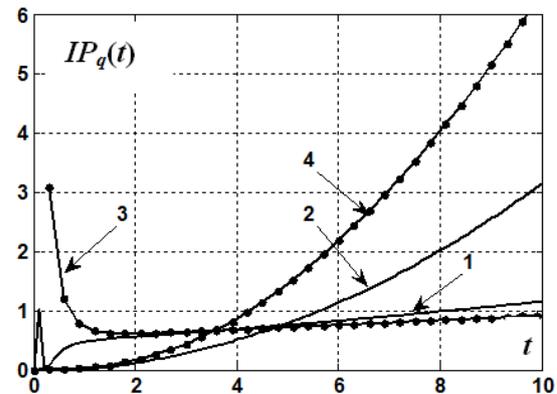


Рис. 3. ИП индекса структуры:
1 – $q=1, k=0,2$; 2 – $q=2, k=0,2$;
3 – $q=1, k=0,7$; 4 – $q=2, k=0,7$

Заключение

Рассмотрены вопросы анализа информационной прогнозируемости стохастических процессов со случайной сменой структуры. Показано, что функции ИП ПСС связаны со статистическими характеристиками процесса. В частности, при гауссовской аппроксимации плотности на участке фиксированной структуры ИП определяется характеристиками: математическим ожиданием, дисперсией и вероятностью состояния.

Теоретические результаты, полученные в работе, могут являться одним из инструментов анализа ПСС в целях выбора наиболее эффективных методов и алгоритмов их прогнозирования. Практический пример анализа ПСС с сосредоточенными переходами

показывает, как с использованием этого подхода можно определять ИП процессов в случае, когда нестационарная плотность процесса неизвестна или не может быть определена аналитически.

ANALYSIS OF INFORMATION PREDICTABILITY OF PROCESS WITH RANDOM STRUCTURE

A.V. AUSIANNIKAU, V.M. KOZEL, K.A. KHARYTOVICH

Abstract

Necessary theoretical data for the analysis of information predictability of process of random structure are provided. The case with the concentrated change of structure is considered in detail. The example of the analysis of information predictability of stochastic process with the concentrated change of demolition structure is given.

Keywords: information predictability, stochastic process, dimensional time-dependent density, structure.

Список литературы

1. *Ярлыков М.С., Миронов М.А.* Марковская теория оценивания случайных процессов. М., 1993.
2. *Казаков И.Е., Артемьев В.М., Бухалев В.А.* Анализ систем случайной структуры. М., 1993.
3. *Артемьев В.М., Наумов А.О., Йениш Г.-Р.* Реконструкция динамических изображений в томографии процессов. Берлин–Минск, 2004.
4. *Овсянников А.В.* Фильтрация и прогнозирование стохастических процессов. Германия, 2015.
5. *Овсянников А.В.* // Радиотехника. 2011. № 3. С. 85–89.

УДК 621.373.5

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ СИСТЕМ ОХРАННОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ ТЕРРИТОРИИ ОБЪЕКТОВ

А.Я. БЕЛЬСКИЙ, А.В. ГУСИНСКИЙ, С.В. ДРОБОТ

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

Поступила в редакцию 15 июня 2015

Представлена оценка влияния кратковременной нестабильности частоты СВЧ-датчика на точность работы устройства обработки информации в системе охранной сигнализации. Приведены результаты теоретического расчета его шумовых характеристик и экспериментальные данные. Выполнен расчет остронаправленной конической антенны с диэлектрической линзой и представлены результаты экспериментальных исследований ее диаграммы направленности в E - и H -плоскостях.

Ключевые слова: СВЧ-датчик, шумовые характеристики, остронаправленная антенна, диаграмма направленности.

Введение

При строительстве и эксплуатации АЭС, ТЭС, нефтехранилищ, аэропортов и других важных объектов требуется иметь систему защиты охраняемой территории от непредусмотренного вторжения на нее, включающую систему охранной сигнализации. Видеонаблюдение не всегда позволяет решить задачу обнаружения несанкционированного проникновения на территорию охраняемого объекта, например, в условиях слабой освещенности, наличия дождя, тумана и действия других неблагоприятных факторов. В данной работе в дополнение к видеонаблюдению с целью более надежной защиты территории предлагается использовать радиоволновую систему на базе радиоволнового устройства, в состав которого входят СВЧ-датчик, антенна, приемное устройство и устройство обработки информации.

Теоретические исследования

Наиболее простым, надежным и отработанным СВЧ-датчиком для данного применения является генератор на основе диода Ганна, ряд параметров которого рассматривался в работе [1]. При движении в радиолуче, создаваемом таким устройством, некоторого объекта с ненулевой радиальной скоростью в устройстве обработки информации возникает сигнал с частотой, равной частоте Доплера, и амплитудой, зависящей от мощности сигнала датчика и параметров облучаемого объекта. Зная частоту Доплера и, следовательно, скорость объекта, можно с определенной достоверностью определить тип нарушителя. Ошибка, возникающая при определении частоты Доплера, зависит от кратковременной нестабильности частоты задающего генератора.

Дисперсия доплеровской частоты для больших расстояний определяется следующим выражением [1]:

$$\sigma^2(f_D) = 1/\pi^2 \int_{f_n}^{f_b} S_\Phi(f) \sin^2(\pi f \tau) / (\pi f \tau)^2 \sin^2(\pi f T_c) df, \quad (1)$$

где τ – время обработки сигнала; T_c – время прохождения сигнала до облучаемого объекта и обратно; f_n и f_b – нижняя и верхняя граничные частоты полосы пропускания устройства

обработки информации, соответственно; $S_{\Phi}(f)$ – спектральная плотность фазовых (частотных) флуктуаций источника зондирующего сигнала.

Для малых расстояний $\pi f T_c$ очень мало, поэтому выражение (1) можно упростить:

$$\sigma^2(f_D) = 1/\pi^2 \int_{f_n}^{f_b} S_{\Phi}(f) \sin^2(\pi f \tau) (T_c/\tau)^2 df. \quad (2)$$

Спектральная плотность частотных (фазовых) флуктуаций определяется выражением

$$S_{\Phi}(f) = \Delta\omega^2(f) / [(2\pi)^2 (f_b - f_n)]. \quad (3)$$

Для датчика на диоде Ганна мгновенное отклонение частоты $\Delta\omega$ при воздействии дестабилизирующих факторов определяется соотношением следующего вида [2]:

$$\Delta\omega = \frac{i_{ш1}(t) \partial G_D / \partial U - i_{ш2}(t) \partial B_D / \partial U}{U \partial G_D / \partial U \partial B_s / \partial \omega}, \quad (4)$$

где $i_{ш1}(t)$, $i_{ш2}(t)$ – квадратурная и синфазная компоненты источника шумового тока; U – амплитуда колебаний первой гармоники; $\partial B_D / \partial U$ и $\partial G_D / \partial U$ – производные по амплитуде реактивной и активной составляющих проводимости диода; $\partial B_s / \partial \omega$ – производная по частоте реактивной составляющей проводимости генератора.

Для определения уровня флуктуаций частоты генератора используем следующую математическую модель шумового источника тока [1]:

$$\overline{i_{ш}^2(F)} = 2qI_0^\gamma (1 + (F_s / F_{ш})^\alpha) \Delta F, \quad (5)$$

где $\overline{i_{ш}^2}$ – среднеквадратическая величина тока шумового источника; ΔF – полоса частот анализа шумов; q – заряд электрона; I_0 – величина среднего тока диода; γ – показатель степени, учитывающий качество структуры диода; α – показатель степени, учитывающий крутизну наклона спектральной характеристики шума, и связанный с состоянием поверхности полупроводника; F_s – частота среза, т.е. частота, на которой уровень шума на 3 дБ выше величины равномерного участка спектра, т.е. «белого» шума; $F_{ш}$ – частота исследуемых шумов.

Расчет флуктуаций проводился при следующих данных: $I_0 = 0,25$ А; $\gamma = 0,95$; $\alpha = 1,2$; $F_s = 5 \cdot 10^4$ Гц; $U = 7,5$ В; $\partial B_s / \partial \omega = 1,7 \cdot 10^{-10}$ См·с/рад; $\partial G_D / \partial U = 0,01$ См/В для генератора сантиметрового диапазона, а также при $I_0 = 0,7$ А; $F_s = 1,5 \cdot 10^5$ Гц; $U = 3,8$ В; $\partial B_s / \partial \omega = 0,41 \cdot 10^{-11}$ См·с/рад; $\partial G_D / \partial U = 0,07$ См/В; $\gamma = 0,95$; $\alpha = 1,2$ для генератора миллиметрового диапазона длин волн. Удельная проводимость стенок волноводного резонатора принималась $\sigma_{ст} = 5,8 \cdot 10^7$ Ом⁻¹·м⁻¹.

На рис. 1. приведены результаты расчета спектральной плотности частотных шумов генераторов: сантиметрового – кривая 1 и миллиметрового диапазона – кривая 2.

На точность работы устройства обработки информации также влияют параметры антенны. Была разработана, изготовлена и испытана остронаправленная антенна с диэлектрической линзой для диапазона частот 25,86–37,5 ГГц, схема которой показана на рис. 2. Выражения для определения основных параметров антенны приведены ниже.

Максимальная толщина линзы определялась из выражения:

$$d = \sqrt{\frac{f^2}{(n+1)^2} + \frac{D^2}{4(n^2-1)}} - \frac{f}{n+1}, \quad (6)$$

где f – фокусное расстояние; D – диаметр линзы; n – относительный коэффициент преломления.

Длина конического рупора R должна удовлетворять условию:

$$R \geq \frac{D_p^2}{2,4\lambda} - 0,15\lambda, \quad (7)$$

где λ – длина волны источника колебаний.

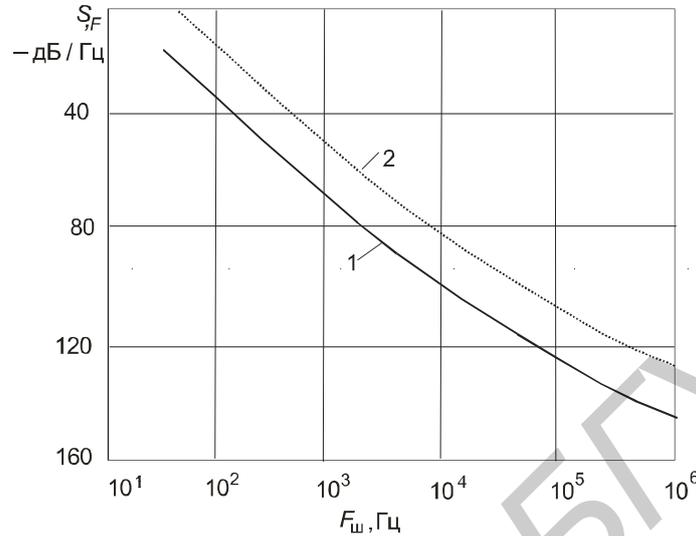


Рис. 1. Результаты расчета спектральной плотности частотных шумов генераторов

Для конического рупора максимальный коэффициент направленного действия (КНД) определяется выражением

$$D_0 = 5,1 \left(\frac{D_p}{\lambda} \right)^2, \quad (8)$$

где D_p – диаметр раскрыва рупора.

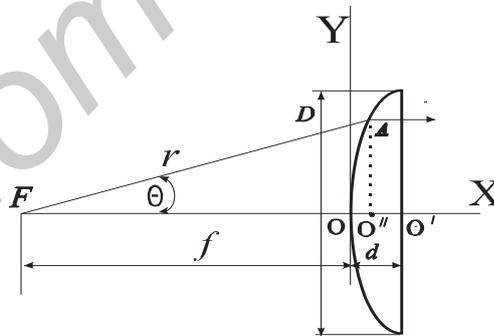


Рис. 2. Схематическое изображение рупорной антенны с диэлектрической линзой

Максимальный угол раскрыва θ_0 (рис. 2) определяется условием

$$\operatorname{tg}(\theta_0 / 2) = 2(n-1)d / D. \quad (9)$$

Радиус-вектор, описывающий профиль линзы, определяется выражением

$$R(\theta) = f + d - d(\theta). \quad (10)$$

Минимальное расстояние от фокуса до центра линзы:

$$f = \frac{D^2}{8 \cdot d(n-1)} - \frac{d(n+1)}{2}. \quad (11)$$

По приведенным выражениям рассчитан профиль и изготовлена рупорная антенна с диэлектрической линзой.

Экспериментальная часть

Результаты экспериментального исследования фазовых шумов одного из генераторов сантиметрового диапазона [3] представлены на рис. 3.

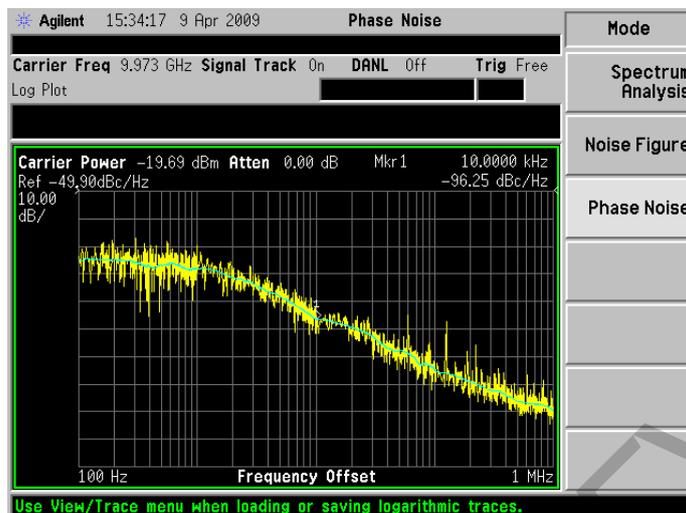


Рис. 3. Спектральная плотность фазового шума генератора на диоде Ганна сантиметрового диапазона

Исследования антенны в E - и H -плоскостях на частотах 25, 30 и 37 ГГц показали, что антенна имеет более узкую диаграмму направленности, чем другие антенны этого же диапазона. Такая диаграмма уменьшает зону опасного излучения. На рис. 4 и рис. 5 представлены диаграммы направленности разработанной антенны в E - и H -плоскостях [4].

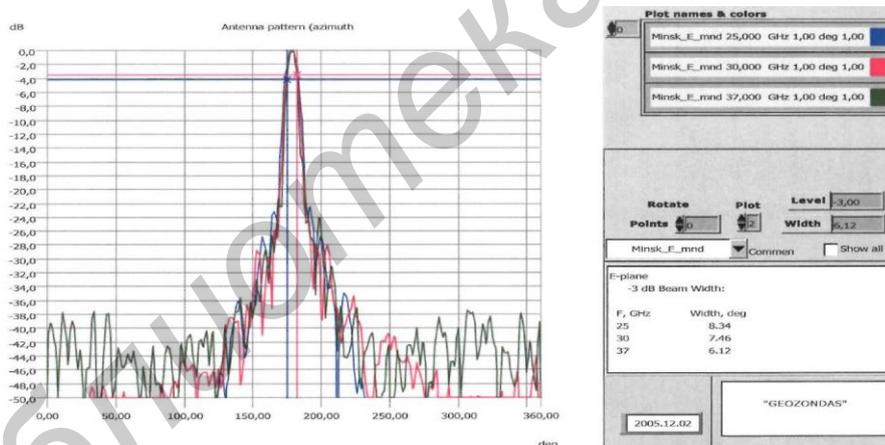


Рис. 4. Диаграмма направленности антенны в E -плоскости

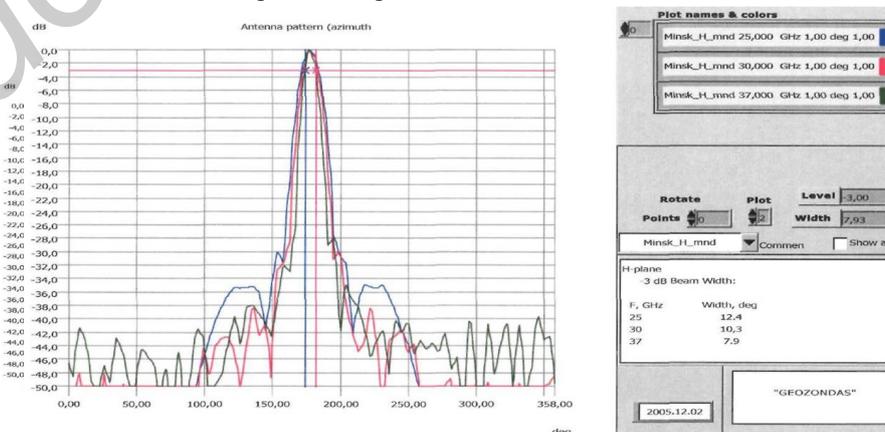


Рис. 5. Диаграмма направленности антенны в H -плоскости

Другие компоненты (смесители, малошумящие усилители и др.), пригодные для проектирования устройств обработки информационных сигналов в составе радиоволнового устройства системы охранной сигнализации, описаны в работе [5].

Заключение

Проведен теоретический анализ влияния шумовых свойств СВЧ-датчиков на точность измерения скорости объекта-нарушителя и выполнен расчет узконаправленной антенны миллиметрового диапазона. Разработаны СВЧ-датчики, пригодные для использования в составе устройств охранной сигнализации и экспериментально исследованы их шумовые характеристики. Предложены меры по ослаблению мощности излучения в охраняемой зоне за счет узкой диаграммы направленности антенны. Разработана остронаправленная антенна с диэлектрической линзой восьмимиллиметрового диапазона длин волн и проведены экспериментальные исследования ее характеристик, которые показали значительное уменьшение плотности потока мощности боковых лепестков.

Представленные в статье результаты теоретических и экспериментальных исследований показали возможность построения высокочувствительных устройств для систем охранной сигнализации в сантиметровом, восьмимиллиметровом или трехмиллиметровом диапазонах длин волн. Построение устройств охранной сигнализации в трехмиллиметровом диапазоне длин волн повышает точность работы, уменьшает вес и габариты аппаратуры. Данные устройства можно использовать также для регистрации объектов, приближающихся к охраняемой территории. При использовании датчиков со спектральной плотностью фазовых шумов, приведенных выше, дисперсия доплеровской частоты, рассчитанная по выражениям (1), (2), и ошибка работы блока обработки информации пренебрежимо малы.

ELECTRONIC DEVICES FOR SECURITY ALARM SYSTEMS OF OBJECTS TERRITORY

A.J. BELSKY, A.V. GUSINSKY, S.V. DROBOT

Abstract

The estimation of influence of the microwave sensor frequency short-term instability on the information processing device operation accuracy in a security alarm system is presented. Results of theoretical calculation of microwave sensor noise characteristics and experimental data are given. Calculation of a sharply directed conic antenna with a dielectric lens is executed and results of experimental researches of its directional diagram in *E*- and *H*-planes are resulted.

Keywords: microwave sensor, noise characteristic, sharply directed conic antenna, directional diagram.

Список литературы

1. Бельский А.Я., Дробот С.В., Мошинский А.В. // Радиотехника. 1995. № 12. С. 75–83.
2. Бельский А.Я., Зацепин Е.Н., Дробот С.В. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2012. № 3. С. 107–110.
3. Бельский А.Я. // Матер. Междунар. НТК, приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР. Часть 1. Минск, 18–19 марта 2014 года. С. 170.
4. Гурло Ю.Е., Бельский А.Я., Гусинский А.В. // Докл. БГУИР. 2007. № 2 (18). С. 5–11.
5. Бельский А.Я., Гусинский А.В., Дзисяк А.Б. и др. // Докл. БГУИР. № 2 (14). 2006. С. 12–16.

УДК 621.396.96

АЛГОРИТМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ МИНИМИЗАЦИЮ СРЕДНЕГО РИСКА ПРИНИМАЕМЫХ РЕШЕНИЙ

А.С. ХРАМЕНКОВ, С.Н. ЯРМОЛИК

*Военная академия Республики Беларусь
Независимости, 220, Минск, 220057, Беларусь*

Поступила в редакцию 30 июня 2015

Для повышения достоверности классификации радиолокационных объектов предлагается использовать последовательный байесовский алгоритм распознавания, обеспечивающий минимизацию риска принимаемых решений о классе объекта и о продолжении дальнейшего наблюдения. С целью обеспечения возможности уточнения информации при реализации последовательного алгоритма предложено использование апостериорной вероятности решающей статистики предыдущего шага классификации в качестве априорной информации для следующего шага. Приведены результаты расчета характеристик распознавания радиолокационных объектов трех классов для предлагаемого последовательного алгоритма и одноэтапного байесовского алгоритма классификации.

Ключевые слова: последовательный байесовский алгоритм распознавания, минимум среднего риска, последовательное уточнение информации.

Введение и постановка задачи

Задача радиолокационного распознавания (РЛР) заключается в установлении факта принадлежности наблюдаемого объекта к определенному классу [1–3]. Информация о классе объекта может использоваться при решении широкого круга задач управления [1–3].

Процесс распознавания радиолокационных объектов в условиях сложной помеховой обстановки носит статистический характер и решается соответствующими методами [1–4]. При решении задач радиолокационного наблюдения наиболее распространен байесовский подход к проверке статистических гипотез [1]. Байесовское решающее правило [1, 2] предполагает формирование M (по числу распознаваемых классов) отношений правдоподобия (ОП). Решение о классе наблюдаемого объекта принимается в пользу класса, характеризующегося максимальным значением ОП или его монотонной функции. Решающее правило может быть представлено в следующем виде [1, 2]:

«если $Z_k \geq Z_l$, для всех $l = \overline{1, M}$, $l \neq k$, то принимается решение в пользу k -го класса», (1)

где $Z_k = \ln[\Lambda(\xi|A_k)] = \ln \frac{p(\xi|A_k)}{p(\xi|A_0)}$ ($Z_l = \ln[\Lambda(\xi|A_l)] = \ln \frac{p(\xi|A_l)}{p(\xi|A_0)}$) – логарифм ОП, сформированный

при условии наблюдения объекта k (l -го класса); $p(\xi|A_k)$ ($p(\xi|A_l)$) – многомерная плотность вероятности (МПВ) дискретных отсчетов аддитивной смеси сигнальной составляющей радиолокационного портрета (РЛП) и фона ξ , при условии наблюдения объекта k (l -го класса A_k (A_l)); $p(\xi|A_0)$ – МПВ дискретных отсчетов радиолокационного фона.

Качество функционирования устройств РЛР для текущего значения отношения сигнал-шум принято характеризовать совокупностью M условных вероятностей правильного распознавания: D_k и $M(M-1)$ условных вероятностей ошибочного (ложного) распознавания

$F_{k/l}$, $l, k = \overline{1, M}$, $l \neq k$. При этом ложные решения часто характеризуют средней вероятностью ложного распознавания объекта k -го класса [1]: $F_k = 1/(M-1) \sum_{l=1, l \neq k}^M F_{k/l}$.

Для повышения достоверности принимаемых решений при классификации может использоваться увеличение времени наблюдения радиолокационного объекта [1, 2]. Однако непосредственное увеличение времени контакта с целью не всегда возможно. Вместе с этим, в ряде практически важных случаев радиолокатор имеет возможность последовательного многократного обращения к цели [5]. Использование последовательных процедур при решении задач распознавания объектов позволяет осуществлять адаптацию решающего правила к условиям наблюдения [4, 6].

Следует отметить, что последовательные методы решения многоальтернативных задач зачастую рассматриваются в обобщенном виде [6], а приведенные результаты носят эмпирический характер. В связи с этим определенный интерес представляет задача получения алгоритма последовательного распознавания радиолокационных объектов, обеспечивающего минимизацию среднего риска принимаемых решений о классе объекта и о продолжении наблюдения.

Основная часть

Задача последовательного РЛР объекта k -го класса A_k ($k = \overline{1, M}$) на каждом шаге наблюдения сводится к принятию решения в пользу одного из M классов A_l^* ($l = \overline{1, M}$) или вынесения решения о продолжении наблюдения A_{M+1}^* . Оптимальным в смысле байесовского последовательного критерия распознавания будет правило, обеспечивающее минимизацию среднего значения потерь (риска), при принятии решения о классе наблюдаемого объекта или о продолжении наблюдения на каждом шаге наблюдений [4].

Средний риск принятия решения на n -ом шаге наблюдения можно представить в виде суммы среднего риска за принятые решения в пользу определенного класса и среднего риска за решение о продолжении наблюдения:

$$R_n = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{ki}^n P_n(A_k^* | A_i) + \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{M+1i}^n P_n(A_{M+1}^* | A_i), \quad (2)$$

где $P_n(A_i)$ – априорная вероятность наличия объекта i -го класса на n -ом шаге; C_{ki}^n – цена за принятое решение в пользу k -го класса при наличии объекта i -го класса на n -ом шаге; $P_n(A_k^* | A_i)$ – условная вероятность принятия решения в пользу k -го класса при наличии объекта i -го класса на n -ом шаге; C_{M+1i}^n – цена за принятое решение о продолжении наблюдения при наличии объекта i -го класса на n -ом шаге; $P_n(A_{M+1}^* | A_i)$ – условная вероятность принятия решения о продолжении наблюдения при наличии объекта i -го класса на n -ом шаге.

Последовательное байесовское распознавание предполагает на каждом шаге разбиение области принятия решения $\Gamma(n) = \Gamma_1(n) \cup \Gamma_2(n) \cup \dots \cup \Gamma_{M+1}(n)$ таким образом, чтобы обеспечить минимум среднего риска (2). При этом условные вероятности принимаемых решений находятся путем интегрирования распределения решающей статистики по требуемой области $\Gamma_k(n)$: $P_n(A_k^* | A_i) = \int_{\Gamma_k(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n$, где ξ_n – вектор принятого сигнала на n -ом шаге,

представляющий собой аддитивную смесь РЛП цели i -го класса и фона; $p(\xi_n | A_i)$ – МПВ (функция правдоподобия) отсчетов смеси РЛП цели i -го класса и фона на n -ом шаге.

Оптимальное байесовское правило принятия решения, минимизирующее средний риск на n -ом шаге (2), сводится к выбору минимального значения из рассчитываемых апостериорных рисков принадлежности наблюдаемого объекта к каждому классу $R_n^k(\xi_n)$, $k = 1, \dots, M$ [4] и апостериорного риска продолжения процедуры наблюдения $R_n^{M+1}(\xi_n)$:

$$R_n^k(\xi_n) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^M P_n(A_i)(C_{ki}^n - C_{ii}^n)p(\xi_n|A_i), \quad k = 1, \dots, M, \quad R_n^{M+1}(\xi_n) = \sum_{i=1}^M P_n(A_i)(C_{M+1i}^n - C_{ii}^n)p(\xi_n|A_i), \quad (3)$$

где $R_n^k(\xi_n)$ – значение апостериорного риска, характеризующее принадлежность наблюдаемой цели к k -му ($k = \overline{1, M}$) классу на n -ом шаге; $R_n^{M+1}(\xi_n)$ – значение апостериорного риска, характеризующее продолжение наблюдения на n -ом шаге.

Апостериорный риск может быть выражен через отношение правдоподобия:

$$J_n^k(\xi_n) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^M P_n(A_i)(C_{ki}^n - C_{ii}^n)\Lambda(\xi_n|A_i), \quad k = 1, \dots, M, \quad J_n^{M+1}(\xi_n) = \sum_{i=1}^M P_n(A_i)(C_{M+1i}^n - C_{ii}^n)\Lambda(\xi_n|A_i), \quad (4)$$

где $\Lambda(\xi_n|A_i) = \frac{p(\xi_n|A_i)}{p(\xi_0|A_0)}$ – отношение правдоподобия объекта i -го класса на n -ом шаге.

Таким образом, решающее правило последовательного распознавания радиолокационных объектов, обеспечивающего минимизацию среднего риска принимаемых решений, можно представить в виде: если $J_n^k(\xi_n) \leq J_n^l(\xi_n)$, $l = \overline{1, M}$, $l \neq k$, то принимается предварительное решение о наблюдении объекта k -го класса A_k^* . После принятия предварительного решения A_k^* проверяется возможность остановки последовательной процедуры наблюдения. Если $J_n^k(\xi_n) \leq J_n^{M+1}(\xi_n)$, то принимается окончательное решение о принадлежности наблюдаемой цели к k -му классу A_k^* . Если указанное условие не выполняется, то принимается решение о продолжении наблюдения A_{M+1}^* и переход к $n + 1$ шагу.

Обобщенная структурная схема, реализующая полученное последовательное решающее правило, минимизирующее средний риск принимаемых решений представлена на рис. 1.

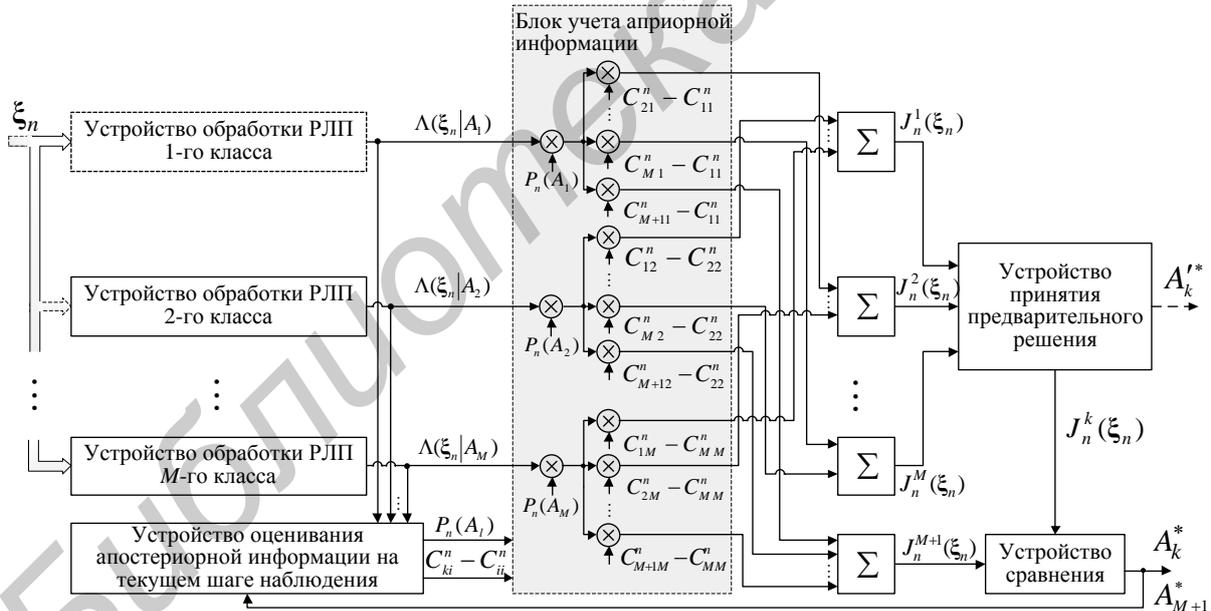


Рис. 1. Структурная схема устройства последовательного распознавания объектов

В процессе классификации существует возможность после каждого контакта с целью совместно с окончательным решением A_k^* или A_{M+1}^* , выдавать предварительное решение A_k^* только о классе цели по минимальному значению $J_n^l(\xi_n)$, $l = \overline{1, M}$. В ряде практических случаев удобнее использовать логарифм от апостериорного риска $U_n^k(\xi_n) = \ln[J_n^k(\xi_n)]$, $k = \overline{1, M+1}$.

Последовательная процедура распознавания приводит к повышению различимости (контрастности) проверяемых гипотез, что обусловлено трансформацией распределений решающей статистики на каждом шаге наблюдения. В качестве примера на рис. 2, приведены

гистограммы распределений решающей статистики по флуктуационному РПП, оцененные методом статистических испытаний по результатам наблюдения объектов 3 классов.

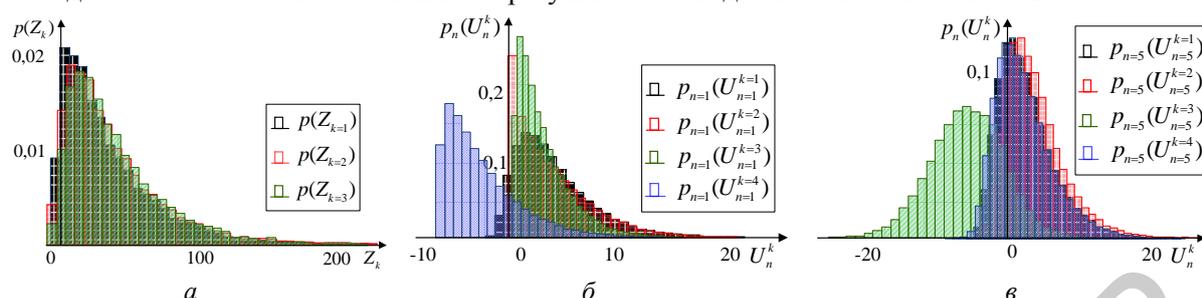


Рис. 2. Гистограммы решающей статистики для одноэтапного (а) и многоэтапного (б, в) устройств РПП

На рис. 2, а представлены гистограммы выходных сигналов каждого из каналов распознавания Z_k , $k=1,2,3$, формируемые при наблюдении цели 3 класса с использованием одношагового решающего правила (1). Очевидно, что в рассматриваемой ситуации принять решение о классе цели с высокой степенью достоверности не представляется возможным. Оценки распределения решающей статистики при последовательной процедуре распознавания $U_n^k = U_n^k(\xi_n)$, $k=1,2,3$, $k=4$ (гипотеза о продолжении наблюдения) приведены на рис. 2, б (шаг $n=1$) и в (шаг $n=5$). В соответствии с последовательным решающим правилом, решение на первом этапе принимается по минимальному значению U_1^k . Очевидно, что такому значению соответствует гипотеза о продолжении наблюдения $A_{k=4}^*$. Согласно рис. 2, в на пятом шаге наблюдения минимальному значению решающей статистики соответствует гипотеза о принадлежности наблюдаемой цели к третьему классу, что позволяет с минимальным риском остановить последовательную процедуру анализа и принять решение $A_{k=3}^*$.

Реализация последовательного байесовского алгоритма, предполагает использование полного комплекта априорных данных: априорных вероятностей появления объектов различных классов ($P_n(A_i)$); цен за принятые решения на каждом этапе процедуры распознавания (C_{ki}^n). Проведенные исследования позволяют сформулировать некоторые рекомендации по выбору требуемых значений априорных данных.

Рекомендации по нахождению априорных вероятностей появления объектов различных классов. Исходя из максимальной априорной неопределенности, на первом шаге процедуры априорные вероятности появления распознаваемых объектов принято считать одинаковыми $P_{n=1}(A_k) = 1/M$, $k = \overline{1, M}$ [1, 2]. Учитывая возможность последовательного уточнения информации, в качестве априорных вероятностей для последующих шагов целесообразно использовать апостериорные вероятности предыдущего шага классификации. Выражение для априорной вероятности k -го класса на $n+1$ шаге принимает вид:

$$P_{n+1}(A_k) \cong P(A_k | \xi_n) = \frac{P_n(A_k) p(\xi_n | A_k)}{\sum_{i=1}^M P_n(A_i) p(\xi_n | A_i)}, \quad (5)$$

где $P(A_k | \xi_n)$ – апостериорная вероятность принадлежности цели к k -му классу на n -ом шаге.

Выражение (5) может быть представлено через отношение правдоподобия:

$$P_{n+1}(A_k) \cong P_n(A_k | \xi_n) = \frac{P_n(A_k) \Lambda(\xi_n | A_k)}{\sum_{i=1}^M P_n(A_i) \Lambda(\xi_n | A_i)}. \quad (6)$$

Рассмотренный подход позволяет на текущем шаге процедуры классификации учитывать информацию о распределении статистики с предыдущих этапов наблюдения. Последовательное уточнение априорной информации позволяет сократить длительность процедуры принятия решения и повысить качество принимаемых решений.

Рекомендации по выбору цен за принятые решения на каждом этапе процедуры распознавания. Значения цен за принятые решения при последовательном распознавании

определяются физической природой наблюдаемых процессов. На первых этапах классификации, в связи с небольшим количеством сведений о наблюдаемом объекте, принятие ошибочных решений наиболее вероятно, однако нежелательно. Компромиссом является возможность продолжения наблюдения. Следовательно, цены за ошибочные решения целесообразно выбирать больше стоимостей продолжения наблюдения, а последние больше цен за правильные решения $C_{ki}^n > C_{M+1i}^n > C_{ii}^n$, $k, i = \overline{1, M}$, $k \neq i$ [4].

Следует отметить, что выбором на каждом шаге соотношения между ценами за ошибочные решения и за продолжение наблюдения можно добиться усечения последовательной процедуры классификации. Если же все цены одинаково зависят от номера шага процедуры распознавания n , отличаясь лишь коэффициентом пропорциональности, то их можно представить в виде произведения $C_{ki}^n = C_{ki} \cdot f(n)$, $C_{M+1i}^n = C_{M+1i} \cdot f(n)$. Данное представление позволяет упростить расчет значений решающей статистики (4), исключив тем самым зависимость цен от номера шага процедуры распознавания. При этом длительность последовательной процедуры распознавания будет случайной величиной.

Для дальнейшего упрощения алгоритма распознавания по аналогии с критерием идеального наблюдателя стоимость правильных решений может быть принята равной нулю $C_{ii}^n = 0$, $i = \overline{1, M}$, а цены ошибочных решений равными единице $C_{ki}^n = 1$. Стоимость продолжения наблюдения может быть выбрана $C_{M+1i}^n = 0,5$.

Вариантом упрощения алгоритма распознавания является замена штрафов за неправильные решения – «премиями» за правильные, т.е. $C_{kk}^n \neq C_{ii}^n \neq 0$ и $C_{ki}^n = 0$, $k, i = \overline{1, M}$. Учет неравнозначности различных правильных решений в этом случае сохраняется.

Таким образом, исходя из технических возможностей и требований, предъявляемых к устройству распознавания, с помощью вариации цен за принятые решения можно получить различные варианты квазиоптимальных алгоритмов последовательной классификации.

Результаты расчета показателей качества распознавания объектов. Для оценивания качества функционирования разработанного последовательного алгоритма распознавания радиолокационных объектов, минимизирующего средний риск принимаемых решений, целесообразно воспользоваться методом математического моделирования. С этой целью был разработан моделирующий комплекс (рис. 3), включающий в себя формирователь принятого сигнала, блок выделения и обработки радиолокационного портрета и блок оценивания показателей качества.

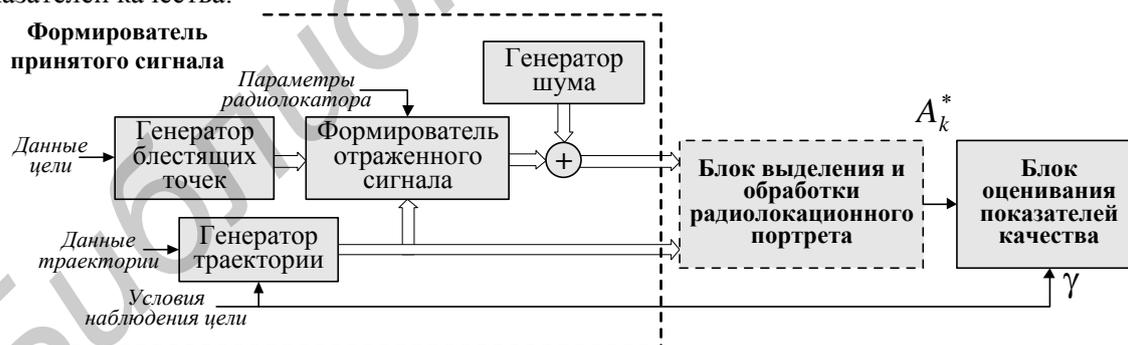


Рис. 3. Структурная схема моделирующего комплекса для оценивания показателей качества принимаемых решений

Формирователь принятого сигнала позволяет имитировать наблюдаемые случайные реализации принятого сигнала [7]. В устройстве выделения и обработки РЛП реализованы анализируемые алгоритмы распознавания объектов: разработанный последовательный алгоритм РЛР объектов (рис. 1) и одноэтапный байесовский алгоритм классификации (1). Устройство оценивания показателей качества позволяет статистическими методами оценивать вероятности принимаемых решений в зависимости от отношения сигнал-шум (γ).

Для анализа характеристик, моделировался процесс принятия решений о классе объектов, отличающихся шириной временной корреляционной функции сигналов. С этой

целью имитировались флуктуационные РЛП [1] целей трех классов, формируемые на основе следующих исходных данных: $N = 10$ – число элементов РЛП; время корреляции флуктуаций сигнала для объектов анализируемых классов – $\tau_1 = 300$ мс, $\tau_2 = 80$ мс, $\tau_3 = 30$ мс. В последовательном алгоритме РЛР цены за решения выбирались одинаковыми для анализируемых классов с учетом следующих допущений: равными нулю за правильные решения $C_{ii}^n = 0$, $i = \overline{1, M}$, за продолжение наблюдения увеличивались в зависимости от шага наблюдения $C_{M+1i}^n = 0,5 \cdot n$, за неправильные решения – уменьшающиеся в зависимости от шага наблюдения $C_{ki}^n = C_{ik}^n = 5 - 0,5 \cdot n$, $k, i = \overline{1, M}$, $k \neq i$. В одношаговом байесовском алгоритме цены за правильные решения предполагались равными нулю, а за ошибочные – одинаковыми. Полученные характеристики распознавания приведены на рис. 4.

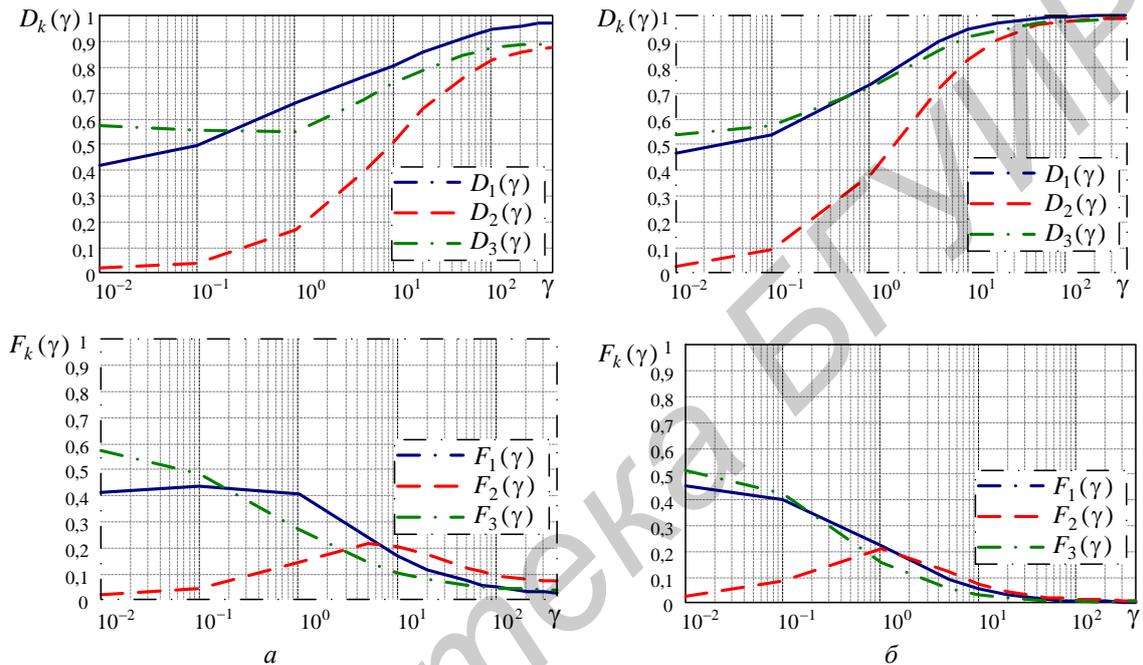


Рис. 4. Характеристики распознавания:

a – одноэтапного алгоритма распознавания; b – последовательного алгоритма распознавания

Результаты моделирования показали, что при одинаковых условиях наблюдения в диапазоне отношения сигнал-шум от 1 до 100 вероятность правильного распознавания объектов при использовании последовательного алгоритма классификации, в среднем, увеличивается на 40 %, а вероятность ложного распознавания уменьшается на 70 %, чем при использовании одноэтапного алгоритма. На рис. 5 приведены результаты оценивания средней длительности анализируемой последовательной процедуры распознавания объектов.

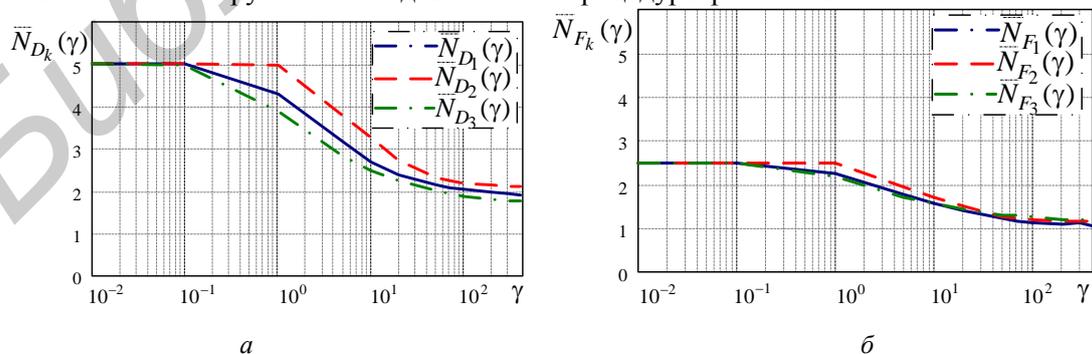


Рис. 5. Средняя длительность последовательной процедуры распознавания:

a – при правильном принятии решения; b – при неправильном принятии решения

С увеличением отношения сигнал-шум время на принятие решения существенно сокращается.

Анализ полученных результатов показывает, что при одинаковых значениях отношения сигнал-шум использование многошагового алгоритма с минимизацией среднего риска принимаемых решений, позволяет повысить эффективность классификации радиолокационных объектов, по сравнению с одноэтапными процедурами. Неизбежной платой за повышение качества распознавания выступает увеличение времени на принятие решения. При этом длительность процедуры определяется имеющимися условиями наблюдения объектов. Кроме того, последовательные процедуры позволяют более эффективно решать задачу адаптации параметров устройства распознавания к изменяющимся условиям наблюдения объектов (например, к ракурсу наблюдаемого объекта), что является их важным преимуществом в условиях быстро изменяющейся воздушно-помеховой обстановки.

Заключение

Повышение достоверности решений о классе радиолокационных объектов, принимаемых в условиях ограниченного времени наблюдения, в ряде случаев может достигаться путем перехода к использованию последовательных процедур обработки. При этом обеспечение большей информативности процедур классификации наблюдаемых объектов неизбежно приводит к увеличению длительности процесса принятия решений. Использование предложенного алгоритма последовательной классификации радиолокационных объектов, обеспечивающего минимизацию риска принимаемых решений о классе объекта и о продолжении дальнейшего наблюдения, позволяет обеспечить рациональное соотношение между требуемым качеством распознавания и продолжительностью процедуры принятия решения. При этом использование апостериорной вероятности решающей статистики предыдущего шага классификации в качестве априорной информации для следующего шага обеспечивает возможность последовательного уточнения информации.

RADAR-TRACKING OBJECTS SEQUENTIAL RECOGNITION ALGORITHM, PROVIDING MINIMIZATION AVERAGE RISK OF ACCEPTED DECISIONS

A.S. KHRAMIANKOU, S.N. YARMOLIK

Abstract

For increase of reliability of radar-tracking objects classification it is offered to use sequential Bayesian recognition algorithm, providing minimisation risk of accepted decisions on an object class and about further supervision continuation. For the information sequential specification propose to use a posteriori probability of solving statistics of the classification previous step as a priori information for a following step. Calculation results of radar-tracking objects recognition characteristics for three simulated classes to sequential algorithm and one-step Bayesian classification algorithm are produced.

Keywords: sequential Bayesian recognition algorithm, minimisation risk, information sequential specification.

Список литературы

1. *Охрименко А.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч.1. Основы радиолокации. М., 1983.
2. *Ширман Я.Д.* Радиолокационное распознавание. Харьков, 1994.
3. *Tait P.* Introduction to Radar Target Recognition. London, 2009.
4. *Репин В.Г., Тартаковский Г.П.* Статистический синтез в условиях априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М., 1977.
5. *Шишов Ю.А.* Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов. М., 1987.
6. *Сосулин Ю.Г., Фишман М.М.* Теория последовательных решений и ее применения. М., 1985.
7. *Солонар А.С., Ярмолик С.Н., Храменков А.С. и др.* // Докл. БГУИР. 2014. № 6 (84). С. 60–66.

УДК 621.391.01

КОРРЕКЦИЯ КОДОВЫХ СЛОВ НА ОСНОВАНИИ ПРОВЕРОК ЧЕТНОСТИ

А.С. ПОЛЯКОВ, В.Е. САМСОНОВ

Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси,
Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь

Поступила в редакцию 27 июля 2015

Для поиска ошибок в кодовых словах предлагается использовать проверку на четность по осям и диагоналям (главной и вспомогательной) кодовой плоскости. Алгоритм, использующий результаты таких проверок, позволяет находить кратные ошибки в строках и столбцах кодовой плоскости.

Ключевые слова: кодовые слова, кодовая плоскость, ошибки, четность по диагоналям.

Введение

В работе [1] предложен способ поиска адресов одиночных ошибок в кодовых словах двухмерных кодов, основанный на использовании результатов проверок четности по осям и главной диагонали кодовой плоскости (бинарной матрицы), представляющей кодовые слова. Для поиска ошибок в [1] использовались результаты проверок четности по осям X , Y [2–5] и по главной диагонали матрицы, предложенной в [6]. Под главной диагональю в [6] понимаются как основная главная диагональ матрицы, так и все параллельные ей диагонали.

Проверки четности по строкам, столбцам и главным диагоналям матрицы позволяют использовать для вычисления адресов элементов матрицы три координаты – номера строк, столбцов и главных диагоналей. Но, как было отмечено в [1], этих данных во многих случаях недостаточно для поиска двойных и более сложных типов ошибок в матрице.

В настоящей работе предлагается расширить возможности определения адресов ошибочных элементов путем введения в рассмотрение проверки на четность по вспомогательным диагоналям. Вспомогательными будем считать как основную вспомогательную диагональ матрицы, так и все параллельные ей диагонали. Значения проверочных символов четности по главным и вспомогательным диагоналям вычисляются согласно представленной на рис. 1 схеме, где в клетках матрицы вверху указаны номера главных, а внизу – вспомогательных диагоналей. Строка со значениями проверочных символов по главным диагоналям обозначена через $eTPC$, а для проверочных символов по вспомогательным диагоналям – через $eTPC$.

Введем обозначения: m , n – количества строк и столбцов матрицы соответственно; a – номера строк; b , \underline{b} – номера столбцов в прямом и обратном направлениях; d – номера главных диагоналей; \underline{d} – номера вспомогательных диагоналей; (a,b) – элемент матрицы на пересечении строки a и столбца b ; $d(a,b)$ – номер главной диагонали, соответствующий элементу (a,b) ; $\underline{d}(a,b)$ – номера вспомогательной диагонали, соответствующий элементу (a,b) ; $N(a,b)$ – порядковый номер элемента (a,b) в матрице; $N(1,1) = 1$; SX – список номеров ошибочных строк; SY – список номеров ошибочных столбцов; SE – список номеров ошибочных главных диагоналей; \underline{SE} – список номеров ошибочных вспомогательных диагоналей.

	d	1	2	3	4	5	6	7	
b	b	1	2	3	4	5	6	7	
		7	6	5	4	3	2	1	
		1	2	3	4	5	6	7	1
		7	1	2	3	4	5	6	2
		6	5	4	3	2	1	7	3
		6	7	1	2	3	4	5	4
		5	4	3	2	1	7	6	5
		5	6	7	1	2	3	4	6
		4	3	2	1	7	6	5	7
		4	5	6	7	1	2	3	8
		3	2	1	7	6	5	4	9
		3	4	5	6	7	1	2	<i>eTPC</i>
		2	1	7	6	5	4	3	<i>eTPC</i>
		2	3	4	5	6	7	1	
		1	7	6	5	4	3	2	
		1	2	3	4	5	6	7	
		7	6	5	4	3	2	1	

Рис. 1. Размещение номеров диагоналей и проверочных символов

С учетом указанных обозначений выведем достаточно очевидные формулы вычисления номеров строк, столбцов и диагоналей:

$$d(a,b) = (n - a + b + 1) \bmod n, \quad (1)$$

$$b(a,d) = (a + d - n - 1) \bmod n, \quad (2)$$

$$a(b,d) = (b + n - d + 1) \bmod n, \quad (3)$$

$$\underline{b} = n - b + 1, \quad (4)$$

$$\underline{d}(a,\underline{b}) = (n - a + \underline{b} + 1) \bmod n, \quad (5)$$

$$N(a,b) = (a - 1) * n + b. \quad (6)$$

Необходимо учитывать, что: если $b < 0$, то $b \bmod n = n - b \bmod n$, если $b = 0$, или $b = n$, то $b \bmod n = n$. Подставив значение \underline{b} из (4) в формулу (5), найдем

$$\underline{d}(a,b) = (n - a + (n - b + 1) + 1) \bmod n = (2n + 2 - a - b) \bmod n. \quad (7)$$

Признаком наличия двойных ошибок в строках или столбцах является разница в количестве элементов в списках SX , SY , SE и \underline{SE} , а именно: если есть одна строка с двойной ошибкой, то в SY , SE и \underline{SE} будет на два элемента больше, чем в SX ; если две строки с двойными ошибками, то в SY , SE и \underline{SE} на четыре элемента больше, чем в SX и т.д.

Наличие двойных ошибок уменьшает число координат для вычисления адресов элементов (при двойной ошибке в строке отсутствует номер этой строки в SX , при двойной ошибке в столбце – номер столбца в SY), поэтому в качестве дополнительной информации будем использовать номера диагоналей из списков SE и \underline{SE} .

Описание способа поиска ошибок

Способ предусматривает формирование множества строк $S1-S2-S3-S4$, где $S1$ и $S2$ – номера ошибочных строк и столбцов из списков SX , SY , а $S3$ и $S4$ – номера диагоналей из SE и \underline{SE} , соответствующих элементам матрицы, адреса которых указаны в $S1$ и $S2$, с последующим анализом строк множества $S1-S2-S3-S4$ с целью исключения адресов ложных ошибок.

Для вычисления значений строк в $S1-S2-S3-S4$ используются формулы (1)–(7). Заметим, что при вычислении номеров диагоналей в столбце $S4$, принимаются во внимание только строки с номерами от 1 до $(m-2)$, т.е. исключаются строки $eTPC$ и \underline{eTPC} .

Алгоритмы поиска при наличии только двойных ошибок в строках или столбцах отличаются формированием и анализом множества строк $S1-S2-S3-S4$. В качестве примера приведем алгоритм поиска двойных ошибок в строках матрицы (в списке SX нет элементов).

1. Формируем множество строк $S1-S2-S3-S4$, где $S2$ и $S3$ – номера столбцов и главных диагоналей из списков SY и SE , $S1$ и $S4$ – номера строк и вспомогательных диагоналей, соответствующих элементам матрицы на пересечении столбцов и диагоналей, указанных в $S2$ и $S3$.

2. Из $S1-S2-S3-S4$ удаляются строки, в которых: значение столбца $S4$ отсутствует в \underline{SE} ; значение столбца $S1$ превышает $(m-2)$; имеются одинаковые значения в столбце $S4$.

3. Если в S1–S2–S3–S4 не осталось строк, то это означает невозможность определения адресов ошибочных элементов. Переход в п.6. Если в S1–S2–S3–S4 остались только две строки (при наличии в матрице одной строки с двойной ошибкой), или только четыре строки (при наличии двух строк с двойными ошибками), в которых значения в столбце S1 одинаковы, то эти строки представляют собой адреса двойных ошибок в строках, номера которых указаны в S1. Из SY, SE и SE удаляются элементы, значения которых присутствуют в оставшихся строках, а сами строки удаляются из S1–S2–S3–S4.

4. Если кроме строк, указанных в п.3 (или отсутствии таковых), в S1–S2–S3–S4 еще есть строки, то они тоже представляют адреса ошибочных элементов. Из SX, SY, SE и SE удаляются элементы, значения которых присутствуют в оставшихся строках, при этом, если в SX отсутствуют значения столбца S1, то такие значения записываются в SX, а сами строки удаляются из S1–S2–S3–S4.

5. Если в SX и SY больше нет элементов, то переход в п. 6, иначе переход в п. 1.

6. Останов алгоритма.

Рассмотрим работу приведенного алгоритма на примере матрицы M1, рис. 2. Строки 2 и 7 содержат двойные ошибки (отмечены ■). Номера ошибочных диагоналей отмечены символами •• в строках eTPC и eTPC.

1. Запишем в столбцы S2 и S3 все пары элементов из списков SY и SE, в столбцы S1 и S4 – номера строк и вспомогательных диагоналей, которые соответствуют элементам матрицы, значения которых указаны в столбцах S2 и S3. Для вычисления значений столбцов S1 и S4 используем приведенные выше формулы (3) и (7).

1	2	3	4	5	6	7	8	9		<u>SX</u>	<u>SY</u>	<u>SE</u>	<u>SE</u>	S1–S2–S3–S4
1	2	3	4	5	6	7	8	9		-	2	1	7	1) 2 2 1 7 +
9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	-	4	5	3	2) 7 2 5 2 --
9	1	2	3	4	5	6	7	8	2	-	6	7	9	3) 5 2 7 4 --
8	7	6	5	4	3	2	1	9	3	-	8	2	5	4) 1 2 2 8 --
8	9	1	2	3	4	5	6	7	4	5	4	4	1	5) 4 4 1 3 ---
7	6	5	4	3	2	1	9	8	5	6	9	4	5	6) 9 4 5 7 ---
7	8	9	1	2	3	4	5	6	6	7	7	4	7	7) 7 4 7 9 ---
6	5	4	3	2	1	9	8	7	7	8	3	4	2	8) 3 4 2 4 --
6	7	8	9	1	2	3	4	5	8	9	6	6	1	9) 6 6 1 8 --
5	4	3	2	1	9	8	7	6	9	10	2	6	5	10) 2 6 5 3 ---
5	6	7	8	9	1	2	3	4	10	11	9	6	7	11) 9 6 7 5 ---
4	3	2	1	9	8	7	6	5	11	12	5	6	2	12) 5 6 2 9 ---
4	5	6	7	8	9	1	2	3	12	13	8	8	1	13) 8 8 1 4 --
3	2	1	9	8	7	6	5	4	13	14	4	8	5	14) 4 8 5 8 --
3	4	5	6	7	8	9	1	2	14	15	2	8	7	15) 2 8 7 1 --
2	1	9	8	7	6	5	4	3	15	16	7	8	2	16) 7 8 2 5 +
2	1	9	8	7	6	5	4	3	16	17	9	4	5	17) 9 4 5 8 --
									17	18	7	4	7	18) 7 4 7 9 +
									18	19	2	6	5	19) 2 6 5 3 +
									19	20	9	6	7	20) 9 6 7 6 --
									20					

Рис. 2. Матрица M1

2. Из множества S1–S2–S3–S4 удалим строки, в которых значения столбца S4 отсутствуют в списке SE – это строки 2, 3, 4, 8, 9, 14, 15; отмеченные символами --; строки, в которых значения столбца S1 превышают (m–2) : строки 6, 11, 13; строки с одинаковыми значениями в столбце S4: 5, 10 и 7, 12.

3. Остались строки 1 и 16, отмеченные знаком +. Среди оставшихся нет ни одной пары строк с одинаковыми значениями в столбце S1.

4. Оставшиеся строки представляют адреса ошибочных элементов (2,2) в строке 2 и (7,8) в строке 7. Удаляем из SY значения 2 и 8, из SE – 1 и 2, из SE – 7 и 5, содержащиеся в строках 1 и 16. Поскольку значения 2 и 7 столбца S1 в строках 1 и 16 отсутствуют в SX, записываем эти значения в SX. Из S1–S2–S3–S4 удаляем строки 1 и 16.

5. В списках SX и SY, представленных под сплошной чертой, есть элементы, поэтому переход в п.1. Формируем новое множество S1–S2–S3–S4 (строки 17÷20). После удаления строк 17 и 20, в которых значения столбца S4 отсутствуют в SE, остаются строки 18 и 19, представляющие ошибки (7,4) в строке 7 и (2,6) в строке 2. После удаления из списков SX, SY, SE и SE содержащихся в этих строках значений в списках SX и SY элементов нет. Следовательно, все ошибки обнаружены.

6. Останов алгоритма.

Алгоритм поиска ошибок по результатам проверок на четность

0. Принимается $pr := 0$.

1. Анализируется состояние списков SX , SY , SE и \underline{SE} . Если во всех списках нет элементов, то это означает отсутствие ошибок, переход в п.11. Если в каких-либо двух из списков SX , SY , SE , \underline{SE} нет элементов, или двойные ошибки есть более чем в двух координатах (имеются в виду строки, столбцы, главные диагонали, вспомогательные диагонали), то это означает недостаточность данных и невозможность обнаружения ошибок, переход в п. 11. Если и в SX и в SY имеются элементы, переход в п. 3, иначе переход в п. 2.

2. Если в SX отсутствуют элементы или число элементов в SX меньше, чем в SE , то переход в п. 8, если в SY нет элементов или число элементов в SY меньше, чем в SE , то переход в п. 6, в противном случае переход в п. 3.

3. Сформируем множество $S1-S2-S3-S4$ из элементов списков SX , SY , SE и \underline{SE} , где $S1-S2$ представляют все пары элементов из SX и SY , а $S3$ и $S4$ – соответствующие им номера главных и вспомогательных диагоналей.

3.1. Если в SE имеются элементы, то переход в п. 3.2, иначе из $S1-S2-S3-S4$ удаляются строки, в которых значения столбца $S4$ отсутствуют в списке \underline{SE} . Если среди оставшихся имеются пары строк с одинаковыми значениями в столбце $S3$, то эти строки представляют адреса ошибочных символов, из SX , SY и \underline{SE} удаляются присутствующие в этих строках элементы, сами строки удаляются из $S1-S2-S3-S4$ и переход в п. 1; иначе переход в п. 4.

3.2. Если в \underline{SE} есть элементы, то переход в п. 4, иначе из $S1-S2-S3-S4$ удаляются строки, в которых значения столбца $S3$ отсутствуют в списке SE . Если среди оставшихся имеются пары строк с одинаковыми значениями в столбце $S4$, то они представляют адреса ошибочных символов, из SY и SE удаляются присутствующие в этих строках элементы, сами строки удаляются из $S1-S2-S3-S4$ и переход в п. 1, иначе переход в п. 4.

4. Из множества $S1-S2-S3-S4$ последовательно удаляются строки, в которых значения столбцов $S3$ и $S4$ отсутствуют в списках SE и \underline{SE} соответственно, и строки, имеющие одинаковые значения в столбце $S4$.

Если после удалений в $S1-S2-S3-S4$ строк не осталось, то $pr := pr + 1$. Если $pr = 3$, то переход в п. 11, иначе переход в п. 2.

5. Из SX , SY , SE и \underline{SE} удаляются присутствующие в этих строках элементы, если в этих строках значения столбцов $S1$, $S2$, $S3$, $S4$ отсутствуют в SX , SY , SE , \underline{SE} , то эти значения заносятся в списки SX , SY , SE , \underline{SE} соответственно. Сами строки удаляются из $S1-S2-S3-S4$. Переход в п. 1.

6. Составляются все пары элементов из списков SX и SE и записываются в столбцы $S1$ и $S3$, по значениям этих пар вычисляются соответствующие номера столбцов и вспомогательных диагоналей, которые записываются в $S2$ и $S4$. Из $S1-S2-S3-S4$ удаляются строки, в которых значение в $S4$ отсутствует в \underline{SE} , строки, имеющие одинаковые значения в $S4$ и $S1$. Если в $S1-S2-S3-S4$ не осталось строк, то $pr := pr + 1$; если $pr = 3$, переход в п. 11, иначе переход в п. 8.

7. Если в $S1-S2-S3-S4$ остались только одна или несколько пар строк, имеющих одинаковые значения в столбце $S2$, то эти строки представляют адреса ошибочных элементов в столбцах матрицы, номера которых указаны в $S2$. Элементы, содержащиеся в этих строках, удаляются из SX , SE и \underline{SE} , сами строки удаляются из $S1-S2-S3-S4$ и переход в п. 1; в противном случае из $S1-S2-S3-S4$ удаляются строки, в которых значения $S2$ отсутствуют в SY .

Если в $S1-S2-S3-S4$ еще остались строки, то они представляют адреса ошибочных элементов. Из SX , SY , SE и \underline{SE} удаляются входящие в эти строки элементы, при этом, если в SY отсутствует значение столбца $S2$ в удаляемой строке, то это значение записывается в SY , а строка удаляется из $S1-S2-S3-S4$. Если в SX и в SY больше нет элементов, то переход в п. 11, иначе переход в п. 1.

8. Составляются все пары элементов из SY и SE и записываются в $S2$ и $S3$, по их значениям вычисляются соответствующие номера строк и вспомогательных диагоналей, которые записываются в столбцы $S1$ и $S4$.

Из $S1-S2-S3-S4$ последовательно удаляются строки, в которых: значения столбца $S4$ отсутствуют в списке \underline{SE} ; значение столбца $S1$ превышает $(m-2)$; строки с одинаковыми значениями в столбце $S4$; строки с одинаковыми значениями в столбце $S2$.

9. Если в S1–S2–S3–S4 остались только одна или несколько пар строк с одинаковыми значениями в S1, то эти строки указывают адреса ошибочных элементов в матрице. Из *SY*, *SE* и *SE* удаляются элементы, содержащиеся в этих строках, сами строки удаляются из S1–S2–S3–S4, переход в п. 1, в противном случае из S1–S2–S3–S4 удаляются строки, в которых значения столбца S1 отсутствуют в *SX*, переход в п.10.

Если в S1–S2–S3–S4 не осталось строк, то $pr := pr+1$. Если $pr = 3$, переход в п. 11, иначе переход в п. 6.

10. Оставшиеся строки представляют адреса ошибочных элементов. Из *SX*, *SY*, *SE* и *SE* удаляются содержащиеся в этих строках элементы, при этом, если в *SX* нет значения столбца S1 в удаляемой строке, то это значение записывается в *SX*, сама строка удаляется из S1–S2–S3–S4. Переход в п. 6.

11. Останов алгоритма.

Рассмотрим работу алгоритма на примере матрицы M2, представленной на рис. 3, в которой имеется одна строка с тремя ошибками и две строки с одиночными ошибками. В соответствии с п. 1 алгоритма образуем множество строк S1–S2–S3–S4. Здесь и далее курсивом будем выделять значения тех столбцов, которые являются образующими для нахождения остальных элементов строки. В данном случае это значения столбцов S1 и S2. Удаляем строки в соответствии с п. 4 (отмечены символами --,---). Остались строки 2 и 6 (отмечены знаком +), представляющие адреса ошибок. Из списков *SX*, *SY*, *SE* и *SE* удаляем элементы, содержащиеся в строках 2 и 6. Оставшиеся в списках значения показаны под штриховой линией. Переход в п. 1.

Формируем новое множество S1–S2–S3–S4 (строки 16–18), удаляем из него строки 16 и 17, в которых значения столбца S4 отсутствуют в списке *SE*. Остается только строка 18, указывающая адрес ошибки (7,7). Удаляем из *SX*, *SY*, *SE* и *SE* значения, содержащиеся в строке 18. Переход в п. 1.

Поскольку в списке *SX* нет элементов, то переход в п. 8. Формируется множество S1–S2–S3–S4 (строки 19–22), на основе значений списков *SY* и *SE* (выделены в строках 19–22 курсивом). После удаления строк 20 и 21, в которых значения столбца S4 отсутствуют в списке *SE*, остается только одна пара строк – 19 и 22, в которых значения столбца S1 одинаковы. Эти строки представляют адреса двух ошибок в строке 4. Удаляем из *SY*, *SE* и *SE* значения строк 19 и 22, а сами строки – из S1–S2–S3–S4. Переход в п. 1. Поскольку в списках *SX*, *SY*, *SE* и *SE* больше нет элементов, то это означает, что все ошибки обнаружены.

1	2	3	4	5	6	7	8	9		<i>SX</i>	<i>SY</i>	<i>SE</i>	<i>SE</i>	S1–S2–S3–S4	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	4	2	9	4	1) 4 2 8 5 --	
9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	6	3	3	1	2) 4 3 9 4 +	
9	1	2	3	4	5	6	7	8	2	7	6	5	8	3) 4 6 3 1 --	
8	7	6	5	4	3	2	1	9	2	-	8	6	3	4) 4 8 5 8 --	
8	9	1	2	3	4	5	6	7	3	-	7	1	6	5) 4 7 4 9 --	
7	6	5	4	3	2	1	9	8	3	6	6	2	6	6) 6 2 6 3 +	
7	8	9	1	2	3	4	5	6	4	7	6	3	7	7) 6 3 7 2 --	
6	5	4	3	2	1	9	8	7	4	8	6	6	1	8) 6 6 1 8 --	
6	7	8	9	1	2	3	4	5	5	9	6	8	3	9) 6 8 3 6 --	
5	4	3	2	1	9	8	7	6	5	10	6	7	2	10) 6 7 2 7 --	
5	6	7	8	9	1	2	3	4	6	11	7	2	5	11) 7 2 5 2 --	
4	3	2	1	9	8	7	6	5	6	12	7	3	6	12) 7 3 6 1 --	
4	5	6	7	8	9	1	2	3	7	13	7	6	9	13) 7 6 9 7 --	
3	2	1	9	8	7	6	5	4	7	14	7	8	2	14) 7 8 2 5 --	
3	4	5	6	7	8	9	1	2	7	15	7	7	1	15) 7 7 1 6 --	
3**	4	5**	6**	7	8	9**	1**	2	8	<i>eTPC</i>	7	6	3	1	16) 7 6 9 7 --
2	1**	9	8**	7	6**	5	4**	3**	9	<i>eTPC</i>	-	8	5	8	17) 7 8 2 5 --
											-	7	1	6	18) 7 7 1 6 +
											-	6	3	1	19) 4 6 3 1 +
											-	8	5	8	20) 2 6 5 3 --
															21) 6 8 3 6 --
															22) 4 8 5 8 +

Рис. 3. Матрица M2

Другой пример представлен на рис. 4. Матрица M3 содержит двойные ошибки в строке 6 и в главной диагонали 3. Выполнение пунктов 1–5 позволяет найти ошибку (4,7). Повторное выполнение этих же пунктов (строки 9–11), и пунктов 6, 7 (строка 12) не дает результата. Последующее выполнение п.п. 8–10 (строки 13–15) приводит к нахождению ошибки (6,3). При этом обнаруживается, что в списке *SX* нет значения 6, имеющегося в строке 13, поэтому в список *SX* заносится значение 6.

В списке *SE* нет элементов, поэтому выполняются п.п. 1–3, 3.1 (строки 16–19) и после удаления строк 17, 18, в которых значения столбца S4 отсутствуют в *SE*, в S3 остаются только две строки (16 и 19) с одинаковыми значениями в столбце S3, которые представляют ошибочные элементы (2,4) и (6,8) в главной диагонали с номером 3. После удаления из *SX*, *SY*,

SE и \underline{SE} значений строк 16 и 19 в этих списках не осталось элементов, что является свидетельством того, что все ошибки обнаружены.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	8	7	6	5	4	3	2	1
9	1	2	3	4	5	6	7	8
8	7	6	5	4	3	2	1	9
8	9	1	2	3	4	5	6	7
7	6	5	4	3	2	1	9	8
7	8	9	1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1	9	8	7
6	7	8	9	1	2	3	4	5
5	4	3	2	1	9	8	7	6
5	6	7	8	9	1	2	3	4
4	3	2	1	9	8	7	6	5
4	5	6	7	8	9	1	2	3
3	2	1	9	8	7	6	5	4
3	4	5	6	7	8	9	1	2
2	1	9	8	7	6	5	4	3

SX	SY	SE	\underline{SE}	$S1-S2-S3-S4$
2	3	7	2	1) 2 3 2 6 --
4	4	4	5	2) 2 4 3 5 --
-	7	-	9	3) 2 7 6 2 --
-	8	-	6	4) 2 8 7 1 --
				5) 4 3 9 4 --
				6) 4 4 1 3 --
				7) 4 7 4 9 +
				8) 4 8 5 8 --

2	3	7	2	9) 2 3 2 6 --
-	4	-	5	10) 2 4 3 5 --
-	8	-	6	11) 2 8 7 1 --

				12) 2 8 7 1 --
				13) 6 3 7 2 +
				14) 7 4 7 9 --
				15) 2 8 7 1 --

2	4	-	5	16) 2 4 3 5 +
6	8	-	6	17) 2 8 7 1 --
				18) 6 4 8 1 --
				19) 6 8 3 6 +

Рис. 4. Матрица M3

Поиск ошибок не всегда заканчивается успешно. Например, не удастся определить адреса ошибок в случае, представленном на рис. 5. В матрице M4 имеются только две ошибки, но после удаления из множества $S1-S2-S3-S4$ строк, имеющих одинаковые значения в столбце S4, не остается ни одной строки и поэтому найти адреса ошибочных элементов невозможно. А вот в более сложном случае, при наличии в матрице двух строк с групповыми ошибками (рис. 6, матрица M5), легко определяются адреса всех ошибочных элементов.

1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1
6	1	2	3	4	5
5	4	3	2	1	6
5	6	1	2	3	4
4	3	2	1	6	5
4	5	6	1	2	3
3	2	1	6	5	4
3	4	5	6	1	2
2	1	6	5	4	3
2	3	4	5	6	7
7	6	5	4	3	2

SX	SY	SE	\underline{SE}	$S1-S2-S3-S4$
-	2	5	2	4 2 5 2 --
-	5	2	5	1 2 2 5 ---
				1 5 5 2 --
				4 5 2 5 ---

Рис. 5. Матрица M4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	8	7	6	5	4	3	2	1
9	1	2	3	4	5	6	7	8
8	7	6	5	4	3	2	1	9
8	9	1	2	3	4	5	6	7
7	6	5	4	3	2	1	9	8
7	8	9	1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1	9	8	7
6	7	8	9	1	2	3	4	5
5	4	3	2	1	9	8	7	6
5	6	7	8	9	1	2	3	4
4	3	2	1	9	8	7	6	5
4	5	6	7	8	9	1	2	3
3	2	1	9	8	7	6	5	4
3	4	5	6	7	8	9	1	2
2	1	9	8	7	6	5	4	3

SX	SY	SE	\underline{SE}	$S1-S2-S3-S4$
2	1	8	7	2 1 9 8 x
3	2	9	6	2 2 1 7 ---
				2 3 2 6 x
				2 5 4 4 +
				2 6 5 3 +
				2 7 6 2 --
				3 1 8 7 +
				3 2 9 6 ---
				3 3 1 5 +
				3 5 3 3 x
				3 6 4 2 ---
				3 7 5 1 x

2	2	9	6	2 2 1 7 x
3	6	5	3	2 6 5 3 +
				3 2 9 6 +
				3 6 4 2 x

Рис. 6. Матрица M5

Причиной неудачного поиска ошибок является наличие большого количества одинаковых номеров диагоналей, соответствующих различным элементам матрицы. Ведь в каждой строке матрицы содержатся номера диагоналей от 1 до n , поэтому имеется n множеств элементов матрицы, в каждом из которых элементам матрицы соответствуют одинаковые номера диагоналей. А поскольку поиск ошибок основан на анализе вариантов размещения (адресов) ошибочных элементов, которым могут соответствовать элементы матрицы с одинаковыми номерами диагоналей, то поэтому в множестве $S1-S2-S3-S4$ появляются строки с одинаковыми значениями в столбцах S3 и S4, что создает неоднозначность в определении адресов ошибок.

Заключение

1. Предлагаемый способ является «ситуационным», поскольку при некоторых вариантах размещения ошибок в матрице нахождение всех ошибок может оказаться невозможным из-за совпадения номеров диагоналей в рассматриваемых вариантах возможного размещения ошибок. С увеличением размеров матрицы (точнее – числа столбцов) вероятность обнаружения ошибок повышается, поскольку при этом уменьшается вероятность появления нескольких строк с одинаковыми значениями в столбцах S_3, S_4 . Действительно, вероятность выбора некоторого произвольного элемента матрицы, которому соответствует номер диагонали в диапазоне от 1 до n , равна $1/n$, а вероятность выбора второго элемента матрицы с таким же номером диагонали равна $1/n^2$.

2. Способ поиска обеспечивает высокую скорость кода. Для матрицы, имеющей n столбцов и m строк, в которой последний столбец представляет проверочные символы четности по горизонтали, а последние три строки – проверочные символы четности по вертикали, главной диагонали и вспомогательной диагонали соответственно, скорость кода равна $(m-3)*(n-1) / m*n$. Например: при $n=7$ и $m=6$ скорость кода равна $(6-3)*(7-1) / 6*7 = 0,43$; при $n=30$ и $m=27$ скорость кода = $(27-3)*(30-1) / 27*30 = 0,86$. Следовательно, с увеличением числа столбцов в матрице скорость кода приближается к единице.

CODEWORDS CORRECTION ON THE BASIS OF PARITY CHECKS

A.S. POLJAKOV, V.E. SAMSONOV

Abstract

To find errors in codewords the parity check on axis and diagonals (main and auxiliary) of code plain is proposed. The results of such checks are used in algorithm to find multiple errors in lines and columns of code plane.

Keywords: codewords, code plain, errors, parity on diagonals.

Список литературы

1. Поляков А.С., Самсонов В.Е. Устранение ошибок в кодовых словах по результатам проверок на четность. // Докл. БГУИР. 2015. № 8 (94). С. 51–56.
2. Вернер М. Основы кодирования. М., 2004.
3. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М., 1976.
4. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М., 2005.
5. Сорока Н.И., Кривиченко Г.А. Телемеханика. Часть 2. Коды и кодирование. Минск. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bsuir.by/m/12_100229_1_62250.pdf/. – Дата доступа: 16.06.2015.
6. "Enhanced" Turbo Product Codes (eTPC). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.aha.com/Uploads/ANtpc12_03063.pdf. – Дата доступа: 10.07.2015.

УДК 621.385.6

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ МОНТАЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ «П/П КРИСТАЛЛ – ПОДЛОЖКА»

С.С. ВОЛКЕНШТЕЙН*, И.В. ДАЙНЯК, А.А. ХМЫЛЬ

ОАО «ПЛАНАР-СО», пр. Партизанский, 2, Минск, 220033, БеларусьБелорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 3 сентября 2015*

Лазерная микроинтерферометрия является традиционным методом неразрушающего контроля и имеет очень высокую чувствительность к нарушению сплошности неразъемных соединений этих конструкций. Ее возможности были ранее расширены применительно к изучению особенностей монтажных конструкций «п/п кристалл–подложка», что дало возможность оценить их устойчивость к механическим, электрическим и тепловым нагрузкам и прогнозировать эксплуатационную надежность готовых изделий электронной техники и микроэлектроники. Достоверность и практическая целесообразность применения вышеуказанного метода были метрологически доказаны. Основываясь на высокой чувствительности и отталкиваясь от метрологически доказанной достоверности лазерной микроинтерферометрии, была подтверждена достоверность вновь разработанного высокочувствительного метода лазерной фотоакустической интроскопии в области «тонких» структур несплошности неразъемных соединений данных конструкций. Сравнительный анализ вышеупомянутых методов проводился на основе корреляционного анализа.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, интерферометрия, лазерная фотоакустическая интроскопия, неразъемные соединения, корреляционный анализ.

Подтверждение достоверности любого метода интроскопии обеспечивается сравнением полученных данных с результатами других методов, а также с итогами проведенного в последнюю очередь разрушающего контроля, позволяющего воочию убедиться в наличии, сопоставить расположение и конфигурацию внутренних дефектов исследуемой структуры. Однако, в данном случае, разрушенный исследуемый образец не годится для проведения дальнейших циклов испытаний и эксплуатации. Для оценки качества монтажных соединений сравним результаты, полученные тремя используемыми в микроэлектронике методами: рентгеновской интроскопии (РИ) [1], лазерной микроинтерферометрии (ЛМИ), лазерной фотоакустики (ЛФА) [2]. На рис. 1 приведены внешний вид (а), рентгенограмма (б) и лазерная фотоакустическая топограмма (в) монтажной конструкции «кристаллодержатель–адгезив–кристалл» БИС. Адгезив – токопроводящий, Ableter M. Несмотря на видимые на рентгенограмме (рис. 1, б) мелкие пустоты, позволяющие отнести данную конструкцию к разряду удовлетворительного качества, истина открывается при взгляде на лазерную фотоакустическую топограмму (рис. 1, в) – п/п кристалл по трем сторонам не имеет крепления к кристаллодержателю. Качество данной конструкции – неудовлетворительно. Это свидетельствует о том, что лазерный фотоакустический метод контроля неразъемных соединений имеет целый ряд преимуществ по сравнению с методом рентгеновской интроскопии. Во-первых, это высочайшая чувствительность к нарушению сплошности монтажного слоя (единицы нанометра), во-вторых, не все современные адгезивы можно увидеть с помощью рентгена, в то время как лазерный фотоакустический метод лишен этого недостатка [2].

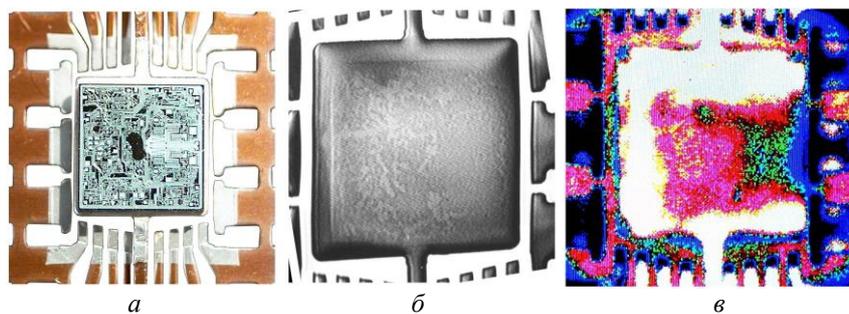


Рис. 1. Внешний вид (а), рентгенограмма (б) и лазерная фотоакустическая топограмма (в) некачественной монтажной конструкции «п/п кристалл–адгезив–кристаллодержатель»

Очень хорошим дополнением к лазерной фотоакустике в плане исследования монтажных конструкций «п/п кристалл–подложка» является метод лазерной микроинтерферометрии, который позволяет проводить качественную и количественную оценку состояния исследуемых объектов путем определения характера объемной деформации смонтированных п/п кристаллов и вычисления интегральной составляющей остаточного механического напряжения, что дает возможность оценить устойчивость конструкций к механическим, электрическим и тепловым нагрузкам и прогнозировать эксплуатационную надежность готовых изделий электронной техники и микроэлектроники.

Практическая целесообразность применения лазерной интерферометрии для оценки качества присоединения кристаллов и определения в них интегральной составляющей остаточных внутренних напряжений была доказана совпадением расчетных результатов с данными локальных измерений механических напряжений в кристаллической решетке методом двухкристалльной рентгеновской дифрактометрии [3].

Возникновение остаточных внутренних напряжений, приводящих к объемной деформации п/п кристаллов, искажающей профиль их планарной поверхности и регистрируемой на лазерных интерферограммах, обусловлено неоднородностями монтажного слоя, вызванными особенностями адгезионных свойств монтажных поверхностей «п/п кристалл–подложка», неравномерностью толщины адгезива, наличием пустот. Цифровая обработка интерферограммы позволяет построить матрицу деформации с последующим представлением профиля деформированного п/п кристалла в трехмерном пространстве.

Таким образом, отталкиваясь от метрологически доказанной достоверности метода лазерной интерферометрии в области количественного определения интегральной составляющей остаточных механических напряжений в смонтированных п/п кристаллах и проведя сравнительный статистический анализ, можно дополнить процедуру подтверждения достоверности лазерного фотоакустического метода в области тонких структур несплошности монтажного слоя конструкций «п/п кристалл–адгезив/припой–подложка».

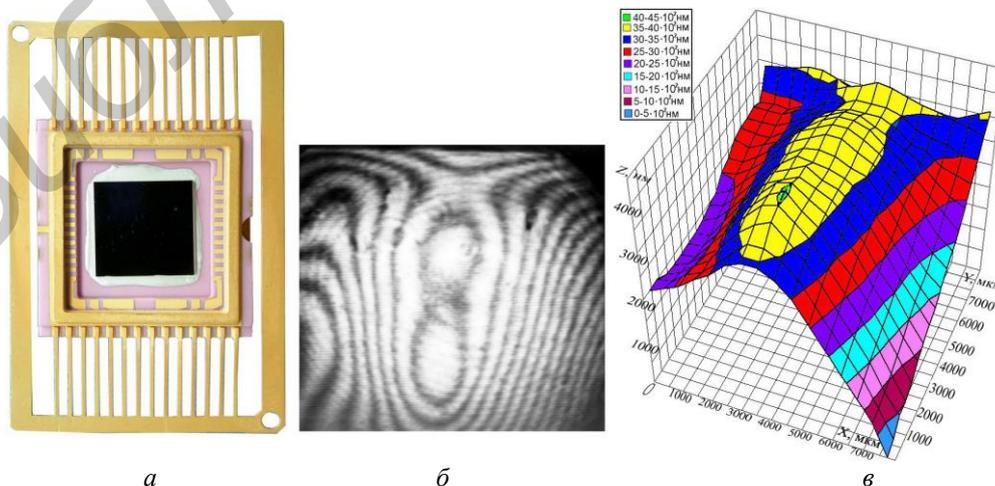


Рис. 2. Внешний вид (а), лазерная интерферограмма п/п кристалла (б) и 3D-модель профиля планарной поверхности исследуемого п/п кристалла (в)

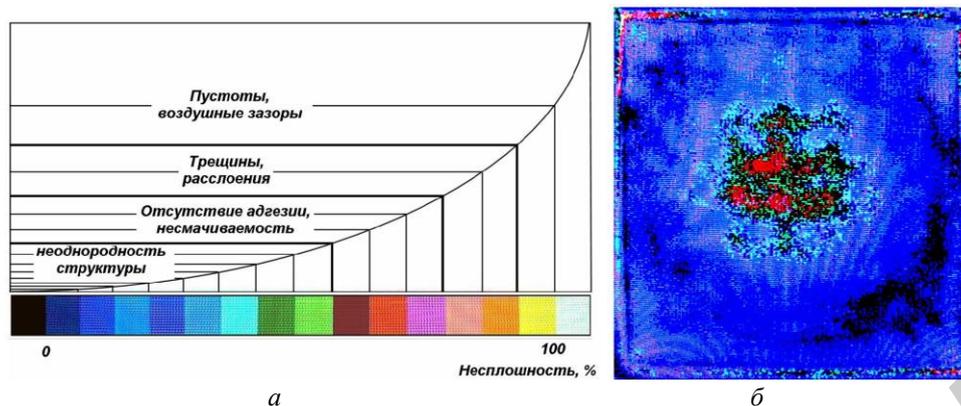


Рис. 3. Цветная 16-градационная шкала для оценки качества неразъемных соединений лазерным фотоакустическим методом (а), лазерная фотоакустическая топограмма исследуемого п/п кристалла (б)

Контроль качества монтажной конструкции «п/п кристалл–адгезив–керамика» (рис. 2, а) проводился методами лазерной интерферометрии (рис. 2, б) и лазерной фотоакустической микроскопии (рис. 3, б). Путем оцифровки лазерной интерферограммы (рис. 2, б) была реализована матрица № 1 [10×9] деформации планарной поверхности п/п кристалла и построена 3D-модель профиля планарной поверхности (рис. 2, в). Также с помощью цветной 16-градационной шкалы для оценки качества неразъемных соединений лазерным фотоакустическим методом (рис. 3, а) была реализована матрица № 2 [10×9] распределения несплошности в монтажном слое на основе лазерной фотоакустической топограммы (рис. 3, б).

Матрица № 1 деформации планарной поверхности п/п кристалла:

90	95	100	101	101	95	90	83	85
70	78	85	92	93	90	80	70	75
55	70	83	98	100	94	81	69	68
42	61	82	99	105	99	86	69	60
33	55	80	95	101	99	85	65	52
25	50	77	93	100	97	83	60	48
15	43	71	91	101	100	84	59	43
14	38	65	90	103	100	82	58	43
23	30	58	81	101	100	79	58	48
30	20	49	73	91	90	73	60	52

Матрица № 2 распределения несплошности в монтажном слое:

6	5	6	5	6	6	6	5	7
6	5	5	5	6	6	5	2	2
5	5	6	7	7	6	6	5	2
2	5	6	7	8	7	6	5	3
2	5	7	9	11	11	7	6	5
1	3	7	9	11	11	7	6	3
1	3	4	7	9	9	7	5	3
3	1	3	5	6	5	5	3	6
2	2	1	3	4	4	4	5	6
4	3	3	3	3	5	6	6	7

Аналогичным образом для сравнения рентгеноскопии с лазерной фотоакустикой на основе рентгенограммы (рис. 1, б) и фотоакустической топограммы (рис. 1, в) некачественной монтажной конструкции «п/п кристалл – адгезив – керамика» были реализованы две матрицы № 3, № 4 [10×9] распределения несплошности в адгезионном слое. Сравнительный анализ двух пар последовательностей дискретных величин, полученных оцифровкой визуализированных результатов проведения исследования одного и того же объекта с помощью вышеупомянутых методов проводился на основе корреляционного анализа [4].

Матрица № 3 распределения несплошности в монтажном слое:

2	1	2	1	1	2	1	1	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	2	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	2	2	1
1	1	1	1	1	1	2	2	1
1	1	1	1	1	2	2	2	1
1	2	1	1	2	2	2	2	1
1	1	1	2	2	1	2	2	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1

Матрица № 4 распределения несплошности в монтажном слое:

16	16	16	16	16	16	16	16	5
16	16	16	16	16	16	16	16	16
16	16	15	16	16	16	15	15	10
16	12	12	10	9	11	10	11	7
16	16	11	11	11	10	10	10	5
16	16	11	12	12	11	9	9	3
16	16	11	12	12	11	9	9	3
16	16	12	12	12	10	10	10	7
16	16	12	11	11	10	12	15	15
16	16	16	16	16	16	16	16	16

Рассмотрев матрицы № 1, № 2, № 3 и № 4 как выборки для $i = 1, 2, \dots, 90$, коэффициент взаимной корреляции двух из них может быть рассчитан по формуле

$$r_{XY}(k) = \frac{\gamma_{XY}(k)}{S_X \cdot S_Y}, \quad (1)$$

где $\gamma_{XY}(k)$ – выборочная корреляционная функция; S_X, S_Y – среднеквадратические отклонения выборок X и Y соответственно.

Выборочная корреляционная функция имеет для рассматриваемого в статье случая следующий вид:

$$\gamma_{XY}(k) = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} (X_i - M_X) \cdot (Y_{i+k} - M_Y), \quad (2)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$; M_X, M_Y – математические ожидания для выборок X и Y соответственно, в качестве которых авторами было взято среднее арифметическое всех значений:

$$M_X = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} X_i; \quad M_Y = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} Y_i. \quad (3)$$

В свою очередь, среднеквадратические отклонения для выборок X и Y вычисляются, соответственно, по формулам

$$S_X = \sqrt{\frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} (X_i - M_X)^2}; \quad S_Y = \sqrt{\frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} (Y_i - M_Y)^2}. \quad (4)$$

Согласно результатам вычислений, выполненных по формулам (1)–(4) для пары дискретных распределений «интерферометрия–фотоакустика», которым соответствуют матрица № 1 (выборка X) и матрица № 2 (выборка Y), для значения $k = 0$ нами получен коэффициент корреляции, равный $r_{XY} = 0,6813$.

Аналогичный расчет по формулам (1)–(4) был выполнен и для пары дискретных распределений «рентген–фотоакустика», которым соответствуют матрица № 3 (выборка X) и матрица № 4 (выборка Y), в результате расчета для значения $k = 0$ нами получен коэффициент корреляции, равный $r'_{XY} = 0,2663$. Из этого следует, что, несмотря на «грубое» приближение при оцифровке визуализированных результатов исследований, проведенных тремя различными методами неразрушающего контроля, существует явная статистическая взаимосвязь этих трех

методов. Причем, рентгеноскопия, как метод интроскопии, коррелирует с фотоакустикой хуже, чем интерферометрия, поскольку на рентгенограммах в теновом контрасте, при высокой пространственной разрешающей способности, регистрируются несплошности, относящиеся к пустотам, зазорам, расслоениям, трещинам, что соответствует только четырем градациям в верхней части цветной 16-градационной шкалы для оценки качества неразъемных соединений лазерным фотоакустическим методом (рис. 3, а). Интерферометрия и лазерная фотоакустическая микроскопия – высокочувствительные методы, позволяющие выявлять нарушения сплошности монтажных конструкций «п/п кристалл–подложка».

На сегодняшнем этапе развития методов и средств контроля качества и диагностирования изделий электронной техники и микроэлектроники (ИЭТ и МЭ) наиболее совершенной является лазерная фотоакустическая интроскопия [5], превосходящая по своим техническим возможностям все известные созданные промышленные образцы приборов для вышеуказанных целей (рентгеновские микроскопы и томографы, ультразвуковые микроскопы, сканирующие лазерные микроскопы и т.д.). По сравнению с альтернативными методами лазерная фотоакустическая интроскопия является бесконтактной, неиммерсионной, высокочувствительной (чувствительность к нарушению сплошности порядка единиц нанометра, что соответствует толщине зарождающихся окисных пленок), с высоким пространственным разрешением, позволяющим исследовать микросварные неразъемные соединения (максимальное разрешение равняется 500 нм, поле сканирования 128×128 мкм), с широким диапазоном шагов регистрации акустического отклика (максимальный шаг регистрации 500 мкм, поле сканирования 128×128 мм), позволяющим охватить весь спектр сборочных операций в плане исследования неразъемных соединений в ИЭТ и МЭ. Дальнейшее повышение пространственной разрешающей способности возможно при переходе на другой источник возбуждения, поскольку в оптическом диапазоне уже достигнут предел. Так, электронно-лучевое импульсное зондирование позволит увеличить разрешение на несколько порядков.

COMPARATIVE ESTIMATION OF SEMICONDUCTOR DICE MOUNTING ALTERNATE NONDESTRUCTIVE EVALUATION METHODS

S.S. WOLKENSTEIN, I.V. DAYNIAK, A.A. KHYML

Abstract

Conventional method of nondestructive control – laser microinterferometry, which possibilities have been earlier expanded concerning to study “semiconductor chip – substrate” assemblies peculiarity, has given the chance to evaluate these assemblies stability to mechanical, electric and thermal loadings and to predict operational reliability of prefabricated production of electronic technics and microelectronics. Laser microinterferometry has very high sensitivity to undetachable connections continuity infringement of these constructions. The above-stated method reliability and practical expediency have been proved by metrological means. Being based on high sensitivity and making a start from laser microinterferometry metrological proved reliability, reliability of a new developed high-sensitive method – laser photoacoustic introscopy in the field of undetachable connections “delicate” structures discontinuity of the given constructions has been confirmed. The comparative estimation of two aforementioned methods was spent on the basis of the correlation analysis.

Keywords: nondestructive control, interferometry, laser photoacoustic introscopy, undetachable connections, correlation analysis.

Список литературы

1. Рети П. Неразрушающие методы контроля металлов. М., 1972.
2. Волкеништейн С. С., Хмыль А.А. // Докл. БГУИР. 2010. № 7 (53). С. 44–52.
3. Научно-технический отчет по НИР «Исследование технологических приемов автоматизированной сборки ГИС и БИС». № госрегистрации У99678. Минск, 1984.
4. Карпович-Каспжак О. С., Дайняк И. В., Генюв А. В. // Изв. Белорус. инж. акад. 2005. № 1(19)/1. С. 84–86
5. Волкеништейн С. С., Ланин В.Л., Хмыль А.А. // Компоненты и технологии. 2007. № 11. С. 154–158.

УДК 543.42:544.531:004.413

ФОРМИРОВАНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ ЗАКЛЮЧЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Л.В. РУДИКОВА, Е.В. ЖАВНЕРКО, Н.Н. КУРЬЯН, Д.В. ЛАЗАРЬ

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
Ожешко, 22, Гродно, 230023, Беларусь*

Поступила в редакцию 31 августа 2015

Излагаются общие принципы формирования экспертных заключений на произведения художественной ценности с использованием лазерного метода спектрального анализа и предлагаемого специализированного программного обеспечения. Приводится пример непосредственного исследования, результаты которого демонстрируют описываемые принципы и подходы.

Ключевые слова: спектральный анализ, экспертное заключение, художественная ценность, модель данных.

Введение

Проверка и установка подлинности объектов художественной и исторической ценности являлась и является актуальным направлением при исследовании различных объектов мирового культурного наследия. В силу этого искусствоведческая экспертиза становится все более востребованным направлением в деятельности различных специалистов, которые занимаются исследованием такого рода объектов. Как правило, цель искусствоведческой экспертизы – определение ценности объекта, его исторической эпохи, степени сохранности и авторской принадлежности.

Специалисты выделяют два вида экспертиз: (1) атрибуция – исследование объекта с целью определения его ключевых характеристик, классификации и стоимости; (2) искусствоведческая экспертиза – установка подлинности объекта, т.е. соответствие исследуемого объекта некоторому заявленному набору характеристик (как правило, данный вид экспертизы подтверждает или опровергает результаты атрибуции).

Несмотря на то, что указанные экспертизы во многих аспектах пересекаются, определим их основные задачи. Итак, основные задачи атрибуции – это проведение классификации объекта – фиксация вида искусства или ремесла (начиная от глобальных различий, например, картина, скульптура, оружие и т.п.), определение жанра, эпохи, места изготовления, принадлежности к конкретной школе и т.д.; определение материалов, из которых изготовлен исследуемый объект, а также состава материалов (при возможности и необходимости); указание состояния объекта, его сохранности, наличия или отсутствия дефектов; установление времени изготовления объекта – (эпоха, период, год); определение стоимости исследуемого объекта.

С другой стороны, основными задачами искусствоведческой экспертизы являются: определение культурно-исторической ценности исследуемого объекта; установление степени уникальности объекта; установление авторства исследуемого объекта (автор неизвестен и его нужно идентифицировать; предположительно автор известен, но следует установить, на самом ли деле исследуемый объект им выполнен); определение оригинальности объекта (оригинал,

копия, авторская копия); фиксация переделок, реставрационных работ; установление подлинности объекта.

Отметим, что немаловажную роль в искусствоведческой экспертизе на современном этапе играет лазерный спектральный анализ [1], а также – специализированное программное обеспечение, которое может обрабатывать данные экспертиз объектов художественной ценности, накапливать результаты, формировать требуемые заключения, проводить анализ накопленных данных и т.д.

Об особенностях лазерного метода спектрального анализа

Метод лазерной искровой спектроскопии (LIBS – Laser Induced Breakdown Spectroscopy) имеет существенные преимущества над традиционными методами атомной эмиссионной спектроскопии, так как обеспечивает прямой анализ, возможность он-лайн анализа, одновременный многоэлементный анализ вместе с высоким пространственным разрешением и способностью послойного анализа. Кроме того, аппаратное и программное обеспечение метода может быть развито в полевом портативном варианте, что особенно важно для решения проблем окружающей среды.

Лазерный спектральный анализ является современной разновидностью классического эмиссионного атомного спектрального анализа. Эмиссионный атомный спектральный анализ состоит из следующих этапов [2]: (1) отбор представительной пробы, отражающей средний состав анализируемого материала или местное распределение определяемых элементов в материале; (2) введение пробы в источник излучения, в котором происходят испарение твердых и жидких материалов, диссоциация соединений и возбуждение атомов и ионов; (3) регистрация спектра (либо визуальное наблюдение) с помощью спектрального прибора; (4) расшифровка полученных спектров с помощью таблиц и атласов спектральных линий химических элементов. Обычно испарение пробы и возбуждение спектра ее паров происходит в одном и том же источнике света для спектрального анализа, например, в пламени, в электрических дуге или искре.

В основе количественного эмиссионного анализа лежит прямая зависимость, выраженная формулой (1) и связывающая концентрацию (плотность атомов) определяемого химического элемента (N_z) с интенсивностью регистрируемой атомной спектральной линии этого же элемента:

$$I = F_1 \Delta t (Lld) \Omega \frac{hc}{4\pi\lambda_0} A_{ij} g_i \frac{N_z}{U_z} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где F_1 – безразмерный коэффициент, учитывающий эффективность системы регистрации, Δt – временной интервал регистрации, Lld – объем зоны свечения плазмы, проецируемый на фотодетектор (L – толщина объема плазмы, l – высота пикселя ПЗС-детектора, d – ширина входной щели спектрографа), Ω – телесный угол сбора излучения плазмы, h – постоянная Планка, c – скорость света, λ_0 – длина волны максимума эмиссионной линии, A_{ij} – вероятность перехода с верхнего уровня i на нижний j , g_i – статистический вес уровня i , U_z – сумма по состояниям атомов химического элемента z , E_i – энергия верхнего уровня i , k – постоянная Больцмана, T – температура плазмы, $\int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda) d\lambda = 1$, поскольку $P(\lambda)$ – нормализованный профиль спектральной линии.

Для обеспечения абляции материала анализируемых образцов в условиях микроанализа используется лазер на алюмо-иттриевом гранате, активированном ионами неодима.

Основные требования к программному обеспечению, связанному с формированием экспертных заключений

В настоящее время имеется программное обеспечение, которое поддерживает те или иные работы, связанные с проведением лазерной экспрессной экспертизы. Однако существует

необходимость в формировании общей базы результатов исследований по различным отраслям, а также в комплексной и разносторонней обработке данных. В силу этого актуальным является расширение универсальной веб-системы [2] в двух аспектах: создание хранилища с возможностью последующего анализа данных и разработка системы поддержки экспертизы объектов различной природы, в частности, объектов художественной ценности (произведения искусства, в частности, произведения живописи).

Предлагаемая универсальная система направлена на использование через веб-браузер, носит модульный характер и является расширяемой. Применительно к данной системе, следует отметить следующие особенности. Система также должна хранить расширенные данные об объекте исследования, его характеристиках, а также материалах, используемых при его создании. Следует отметить, что вся работа эксперта по подготовке и составлению отчета требует длительного времени и мало автоматизирована. Кроме того, отсутствует также и программное обеспечение, позволяющее получить необходимую информацию по объектам исследований и заключениям экспертов. В силу этого предлагаемая система и, в частности, модуль, связанный с формированием экспертных заключений, является актуальной разработкой.

На рис. 1 представлена диаграмма вариантов использования, которая отражает необходимые функции для поддержки работы, связанной с формированием экспертных заключений. Основными пользователями системы являются: Администратор, Эксперт, Зарегистрированный пользователь и Гость.

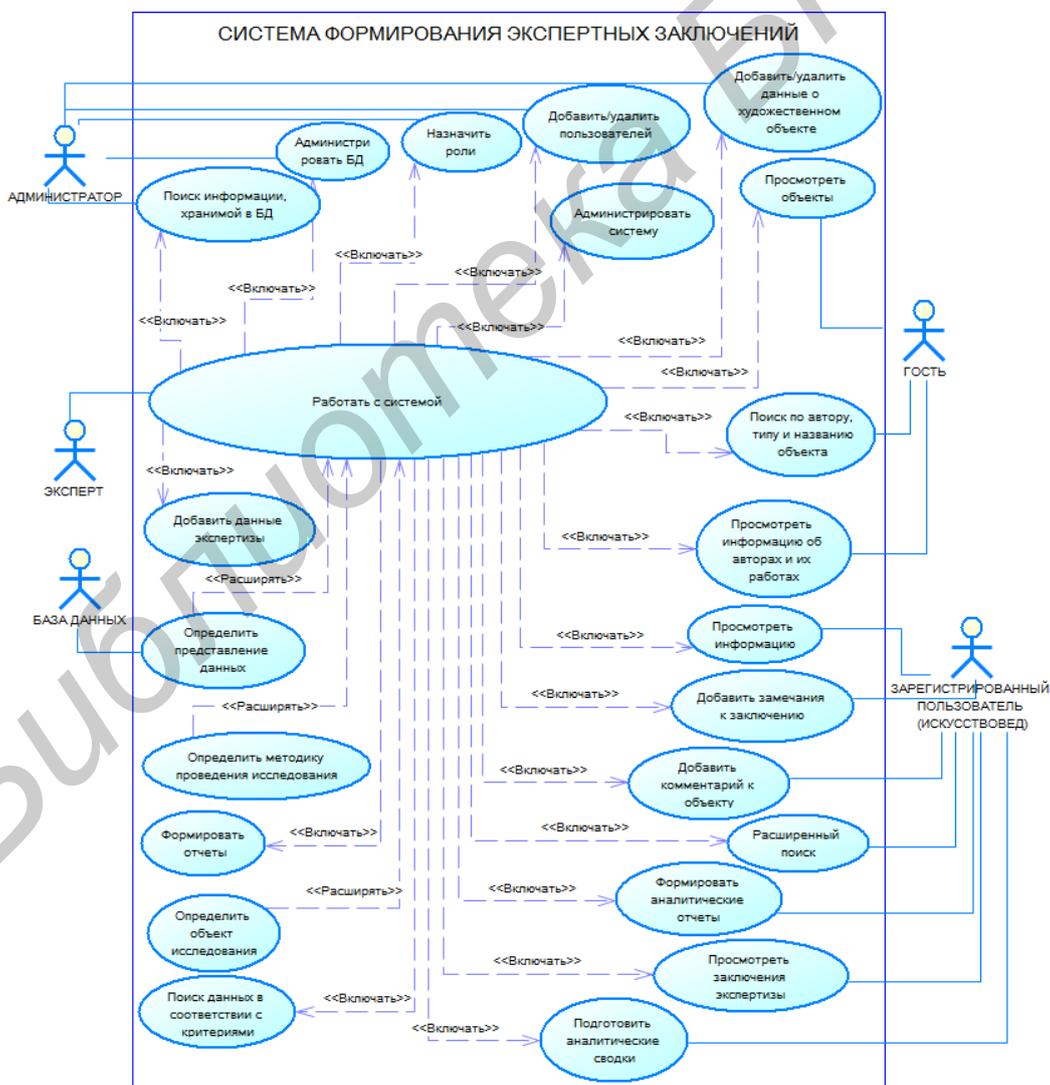


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования системы, связанной с формированием экспертных заключений

На рис. 2 представлен фрагмент концептуальной модели данных, который используется при реализации системы, связанной с формированием экспертных заключений. Для получения модели данных использована структурная методология, определены необходимые сущности, ограничения на данные, ограничения целостности и пользовательские ограничения.

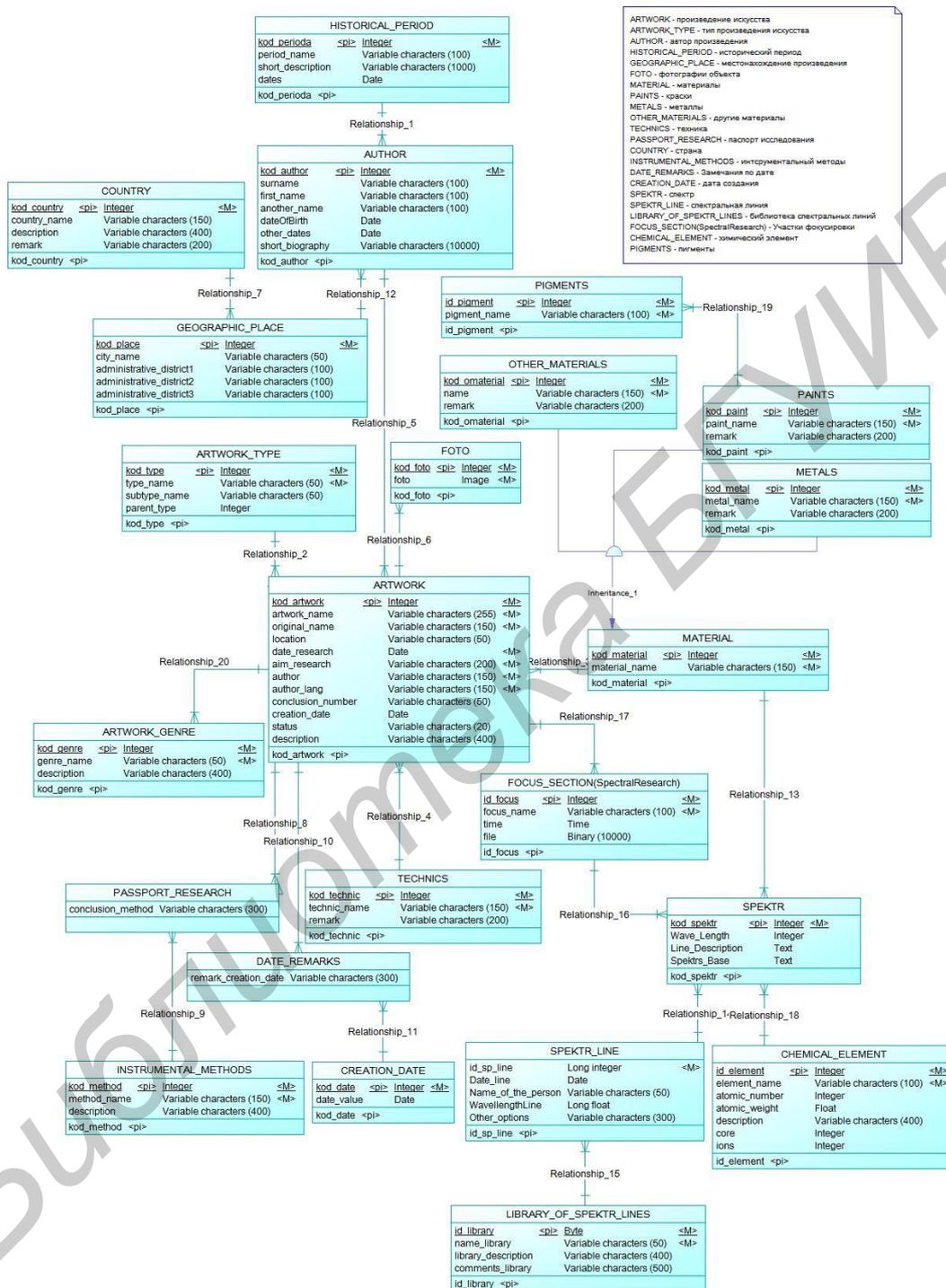


Рис. 2. Фрагмент концептуальной модели данных системы, связанной с формированием экспертных заключений

Следует отметить, что система предполагает поддержку проведения количественного и качественного спектрального анализа различных элементов. Для автоматизации процесса поиска и сопоставления характеристик элементов предусматривается, во-первых, наполнение библиотеки имеющимися базами линий (со всеми необходимыми характеристиками) с указанием учреждения

их регистрации, а также возможностью будущего пополнения за счет новых регистраций и исследований.

Общая архитектура реализации системы базируется на клиент-серверной трехуровневой архитектуре. Система представляется в виде трех уровней, имеющих минимальные связи между собой: база данных, серверное приложение и пользовательское приложение [3].

Сформулируем общие требования к проведению экспертизы художественных объектов с использованием метода LIBS и системы поддержки лазерной экспрессной экспертизы. В силу того, что общая система поддержки лазерной экспрессной экспертизы находится в стадии разработки, в настоящий момент для поддержки проведения экспертизы художественных объектов используются отдельные подсистемы (модули), в частности, визуализатор спектров, с помощью которого и проходит обработка полученных спектрограмм и система накопления экспериментальных данных.

1. Определеление цели и задач текущего исследования. Например, установление авторства художественного изделия, исторической эпохи, определение степени уникальности объекта и т.д.

2. Определеление участков фокусировки лазерного излучения, их фиксация на фотографии объекта.

3. Проведение анализа художественного объекта с использованием мобильной версии лазерно-эмиссионного спектрального анализатора с двух импульсным режимом генерации излучения.

4. Обработка полученных спектрограмм с использованием визуализатора спектров [2].

5. Работа с базами данных накопленных образцов, спектральных баз данных, данных о пигментах и т.д. Помещение результатов исследования в базу данных.

6. Получение итоговых заключений о проведенной экспертизе и представление в отчетном файле необходимого шаблона.

7. Формирование аналитических сводок, отчетов и трендов хранимых данных в базе. Обработка данных экспертиз и данных об объектах исследований с использованием OLAP-технологий и математических методов обработки больших объемов данных.

Пример экспертизы, проведенной с использованием лазерного метода спектрального анализа и специализированного программного обеспечения

В качестве объектов лазерно-эмиссионного анализа были взяты три произведения живописи: два произведения «Сдача крепости Абас-Аббад», (1832 г., холст, масло) и «Сдача крепости Эрзерум 27 июня 1829» (1834 г., холст, масло), местонахождение – г. Гомель, принадлежат известному художнику XIX века Януарию Суходольскому (19.09.1797–20.03.1875), а авторство Суходольского для третьего произведения (название – «Эпизод восстания 1830–1831 гг.», Польша, середина 19 ст., местонахождение – г. Гродно, см. рис. 3) необходимо установить или опровергнуть. Таким образом, целью исследования являлось подтверждение/опровержение авторства Януария Суходольского, определение возможных временных границ создания исследуемого произведения.

При исследовании произведений живописи, указанных выше, использовались следующие методы: лазерно-эмиссионный спектральный анализ и визуальное исследование. Следует заметить, что изучение картин с использованием метода лазерно-эмиссионного спектрального анализа при исследовании произведений живописи на подлинность имеет актуальное значение. Практически до первой трети XX века каждый автор использовал собственные краски, приготовленные на основе природных минералов, растительных, земляных красителей и т.п. Как правило, каждый автор хранил свои собственные рецепты приготовления красок. В силу этого, авторство художников прошлых столетий можно устанавливать по тем пигментам и смесям красок, которые они использовали при создании своих произведений искусства.

Спектральный анализ объектов живописи проводился в художественных музеях различных городов Республики Беларусь («Государственный историко-археологический музей» г. Гродно и «Дворцово-парковый ансамбль» г. Гомель). В полученных спектрограммах наблюдается незначительное отличие интенсивностей спектральных линий красок, которое может быть вызвано различной концентрацией химических соединений, входящих в состав пигментов.

Лазерное излучение фокусировалось в пятно диаметром ~ 1 мм. Исследования проводились при работе прибора в двухимпульсном режиме. Первый импульс формировал лазерно-плазменный факел, а второй его дополнительно возбуждал. Задержка между импульсами составляла 6 мс, частота следования лазерных импульсов 5 Гц. Ток накачки лазера составлял 22 А. Энергия сдвоенного лазерного импульса, при указанных параметрах накачки, составляла 28 мДж. Импульсное лазерное воздействие производилось по краскам различных цветов исследуемых картин, после чего данные отображались в окне программы QSp Client. Полученные спектры красок исследуемой картины неизвестного автора (рис. 3), сравнивались со спектрами красок подлинных образцов живописи Януария Суходольского и обрабатывались с использованием реализованного визуализатора спектров [2].

На рис. 4 представлена спектрограмма белой краски, которая использована для создания всех трех картин. Отметим, что нижний спектр – это подлинник Януария Суходольского (1797–1875 гг.) «Сдача крепости Аббас-Абад» (1832 г., холст, масло), верхний спектр также подлинник Януария Суходольского (1979–1875 гг.) «Сдача крепости Эрзерум 27 июня 1829 г.» (холст, масло), средний – исследуемый образец неизвестного художника (предположительно, Суходольского) «Эпизод восстания 1830–1831 гг.» (Польша, середина 19 ст.). Как видно из спектрограммы (рис. 4), в качестве белой краски для написания всех картин были использованы свинцовые белила с добавлением мела. На спектрограммах также видны следы меди, которые могли попасть на картины в процессе транспортировки при плотном контакте с объектами, изготовленными из меди или включающими ее в свой состав. Итак, спектрограммы, полученные в ходе исследования белого красочного слоя, идентичны.



Рис. 3. Исследуемый объект с участками фокусировки лазерного излучения на поверхности красочного слоя произведения

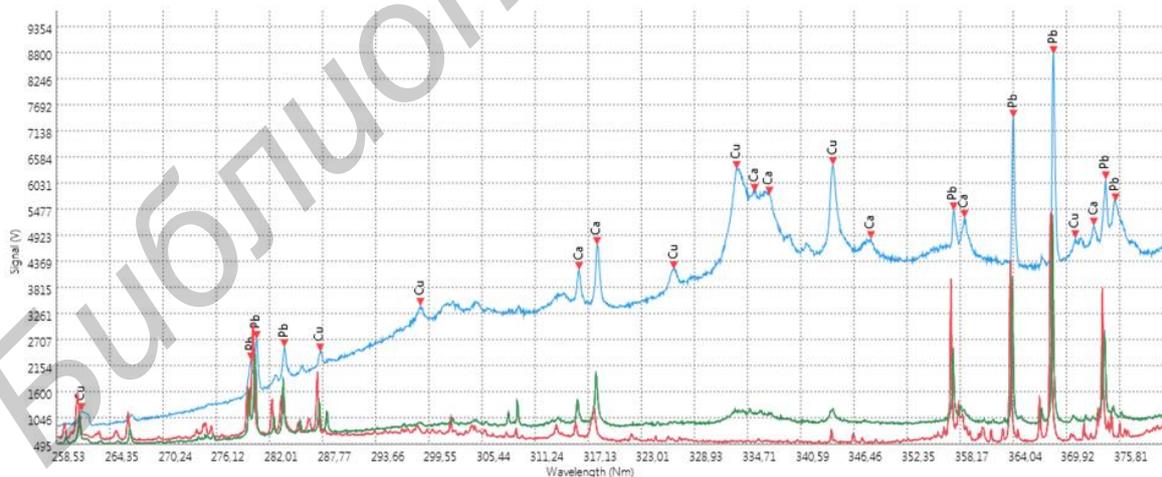


Рис. 4. Спектрограмма белого красочного слоя

Кроме того, проанализированы также образцы следующих красок, которые присутствуют на всех трех исследуемых картинах: темно-зеленый, черный и красный. Темно-зеленый фон красочного слоя исследуемых объектов свидетельствует о присутствии большого количества хрома, что указывает на использование в качестве зеленого пигмента смеси на основе оксида хрома Cr_2O_3 . Данный пигмент (Cr_2O_3 или $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в качестве художественной кроющей краски стал применяться в XIX веке. Наличие цинка в полученных спектрах указывает на присутствие в красочной пасте цинковых белил ZnO , которые в масляной

живописи стали использоваться с середины XIX века. Кроме того, в красочной пасте обнаружены также примеси, содержащие Mg, Ca. Исследование черного красочного слоя всех трех картин показало, что среди элементов, входящих в его состав, значительно доминирует кальций и присутствует магний. Поэтому можно сделать вывод о том, что в качестве черной краски использована слоновая кость. В сравнительно небольших количествах регистрируется также и медь, т.е. возможна добавка черного пигмента – оксида меди CuO. Для пигментов красного цвета основной красочный слой содержит ртуть – киноварь (HgS), разбавленную свинцовыми белилами и мелом с добавлением небольших количеств магния и алюминия. Спектрограммы, полученные в ходе исследования, оказались идентичными. Исключением является лишь факт различия в интенсивностях спектральных линий, что может быть вызвано расхождением в концентрациях химических соединений, которые входят в состав пигмента краски. Итак, исходя из проведенного технико-технологического исследования, можно сделать вывод о времени создания исследуемого произведения – приблизительно середина XIX века. Таким образом, результаты технико-технологического исследования не опровергают авторство художника Януария Суходольского.

Заключение

Изложены общие подходы, связанные с формированием и обработкой экспертных заключений на объекты художественной ценности. В качестве основных методов использованы лазерно-эмиссионный метод спектрального анализа для исследования объектов художественной ценности и структурная методология для разработки основных принципов и моделей общей системы, поддерживающей формирование экспертных заключений. В качестве примера продемонстрировано использование разработанного программного обеспечения (в частности, модуль-визуализатор спектров [2]) для анализа снятых спектрограмм исследуемых образцов. Несомненно, полученные результаты являются актуальными как для специалистов-экспертов, так и для научных работников, которые занимаются разработкой методологии структуризации и обработки данных.

Результаты работы получены в процессе выполнения ГПНИ «Разработка научно-методического обеспечения практического использования мобильных лазерных спектроаналитических систем и рентгенофлуоресцентного анализатора для экспрессной материаловедческой экспертизы в инновационных технологиях, предотвращении чрезвычайных ситуаций, экологии, криминалистике, сохранении историко-художественного наследия. Разработка и адаптация программного обеспечения для использования при проведении экспрессной материаловедческой экспертизы различных изделий и образцов».

FORMATION OF EXPERT OPINIONS USING THE LASER METHOD OF SPECTRAL ANALYSIS AND SPECIAL SOFTWARE

L.V. RUDIKOVA, E.V. ZHAVNERKO, N.N. KURIAN, D.V. LAZAR

Abstract

The general principles of expert opinions on works of artistic value with the use of laser method of spectral analysis and special software are given. An example of direct research, the results of which show the described principles and approaches is presented.

Keywords: spectral analysis, expert opinions, artistic value, data model, special software.

Список литературы

- 1 Burakov V.S., Raikov S.N. // Spectrochimica Acta. Part B. 2007. Vol. 62. P. 217–223.
- 2 Рудикова Л.В. О разработке системы для поддержки лазерной экспрессной экспертизы. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.
- 3 Рудикова Л.В. // Докл. БГУИР. 2015. № 1 (87). С. 47–53.

УДК 004.932.72

СЖАТИЕ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ БЕЗ ПОТЕРЬ НА ОСНОВЕ КОДИРОВАНИЯ ДЛИН СЕРИЙ

Х.К. АЛЬ-БАХДИЛИ, Е.Г. МАКЕЙЧИК, В.Ю. ЦВЕТКОВ, В.К. КОНОПЕЛЬКО

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

Поступила в редакцию 16 ноября 2015

Предложены модифицированные алгоритмы кодирования длин серий для сжатия полутоновых изображений без потерь, отличающиеся от базового алгоритма учетом вероятности повтора значений пикселей изображений и обеспечивающие уменьшение размера кодированных данных.

Ключевые слова: сжатие изображений, кодирование длин серий.

Введение

Для сжатия изображений без потерь в настоящее время широко используются алгоритмы JPEG [1] и JPEG 2000 [2], основанные на энтропийном кодировании (Хаффмана и арифметическом) коэффициентов дискретно-косинусного и вейвлет-преобразований, а также алгоритм Rar и входящие в состав архиватора Zip алгоритмы Deflate и LZMA, кодирующие значения пикселей [3]. Данные алгоритмы позволяют сжимать изображения без потерь примерно до 2 раз, однако их использование требует значительных вычислительных ресурсов и времени на буферизацию всего изображения и реализацию преобразований. В тех случаях, когда временные и вычислительные ресурсы ограничены необходимо использовать более простые алгоритмы эффективного кодирования. К ним относится алгоритм кодирования длин серий RLE (Run-Length Encoding) [4], основанный на учете повторов символов. Он может использоваться для сжатия без потерь изображений с малым числом резких перепадов яркости (мультипликационных, медицинских, квантованных и сегментированных). Недостатком данного алгоритма является отсутствие учета вероятности повтора значений пикселей изображений.

Целью работы является разработка модифицированных алгоритмов кодирования длин серий, основанных на учете вероятности повтора значений пикселей изображений.

Алгоритм RLE

Алгоритм RLE основан на подсчете числа повторов значений следующих друг за другом символов, может иметь блочную и поточную реализацию. Блочная реализация алгоритма RLE предполагает предварительное накопление кодируемых данных для их анализа и выбора параметров кодирования. Анализ производится на основе таблицы I/N-длин серий, в которой одному или нескольким одинаковым по значению и следующим друг за другом символам I ставится в соответствие их количество N (табл. 1).

Таблица 1. Таблица длин серий

I	$i(0)$	$i(1)$...	$i(s)$...
N	$n(0)$	$n(1)$...	$n(s)$...

На основе таблицы длин серий определяются битовая глубина BD_I изображения и битовая глубина значений длин серий BD_N с помощью выражений:

$$BD_I = \left\lceil \log_2 \left(\max(i(s))_{(s=0, S-1)} \right) \right\rceil$$

$$BD_N = \left\lceil \log_2 \left(\max(n(s))_{(s=0, S-1)} \right) \right\rceil$$

где $i(s)$ – значение кодируемого s -го символа из таблицы длин серий; $n(s)$ – число повторов s -го символа (длина серии); S – число кодируемых символов (число строк в таблице длин серий).

Затем осуществляется кодирование длин серий в результате формирования на выходе кодера пар $\{i(s), n(s)\}$. Алгоритм RLE сжатия изображений на основе кодирования длин серий и структура закодированных данных представлены на рис. 1. Блочная реализация алгоритма RLE позволяет получить минимальный объем кода. Ее недостатком является задержка при кодировании, необходимая для накопления данных и построения таблицы длин серий.

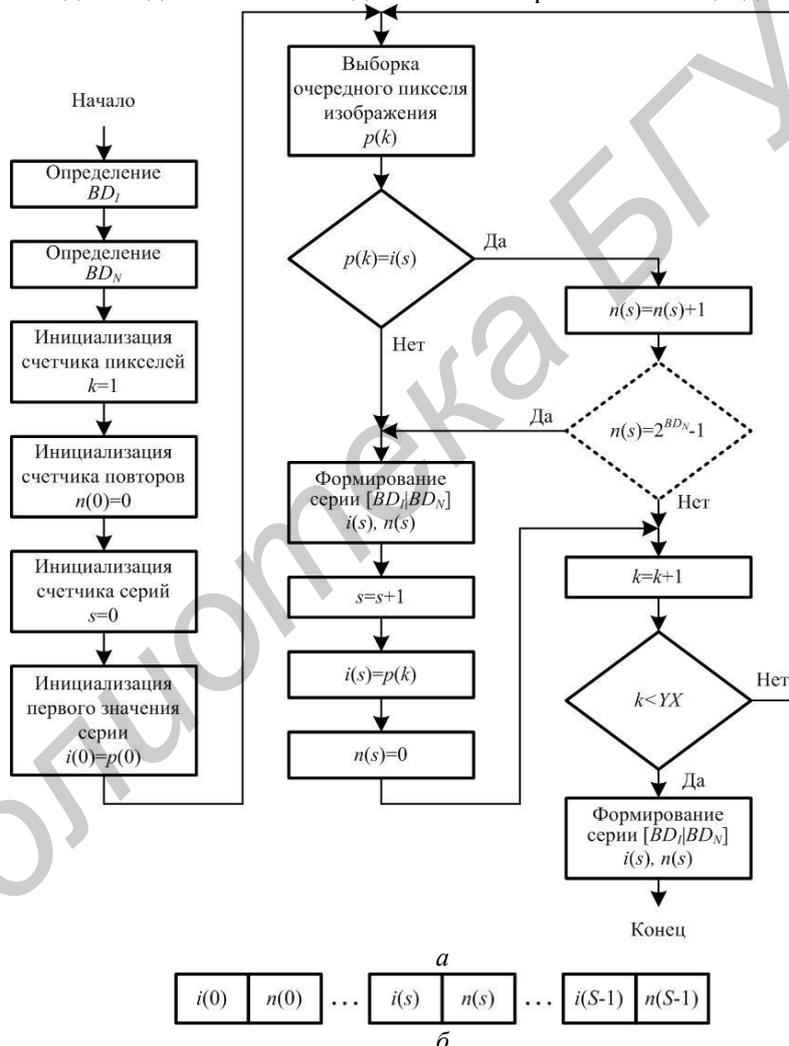


Рис. 1. Кодирование длин серий: a – алгоритм RLE; b – структура закодированных данных

При поточной реализации алгоритма RLE таблица длин серий не строится, а подсчет числа символов осуществляется по мере их поступления. Это позволяет существенно повысить скорость кодирования. Структуры алгоритма и закодированных данных при поточной реализации алгоритма RLE такие же, как при блочной. Значения битовой глубины BD_I изображения и битовой глубины значений длин серий BD_N выбираются независимо от поступающих данных. Они могут быть выбраны с избытком или недостатком (при

переполнении $n(s)$ формируется новая серия $\{i(s), n(s)\}$. В любом случае это приводит к увеличению объема кода, что является недостатком поточной реализации алгоритма RLE.

При кодировании изображений размер $R_{I/N}$ (бит) кода, коэффициент сжатия CR и вычислительная сложность $C_{I/N}$ для алгоритма RLE определяются с помощью выражений:

$$R_{I/N} = S(BD_I + BD_N),$$

$$CR = 8YX/R_{I/N},$$

$$C_{I/N} = YX + 4S,$$

где YX – размер изображения, определяющий число операций на буферизацию и формирование таблицы I/N размером S записей; $4S$ – дополнительные операции на поиск максимального значения по I (S операций), поиск максимального значения по N (S операций), кодирование и передачу ($2S$ операций).

Алгоритм кодирования длин серий I/2B/N

Предлагается модификация I/2B/N алгоритма кодирования длин серий RLE для сжатия полутоновых изображений, основанная на учете вероятности повтора значений пикселей в строках. В процессе выполнения алгоритма строится таблица N/P вероятностей повторов (табл. 2), в которой каждому значению длины серии n ставится число таких серий $p_n(n)$.

Таблица 2. Таблица вероятности повторов

N	1	2	...	n	...
P	$p_n(1)$	$p_n(2)$...	$p_n(n)$...

Для изображений характерно постепенное убывание функции $p_n(n)$ при увеличении значения n . При кодировании длины серии по алгоритму I/2B/N сначала формируется символ I . Затем, если символ I повторяется, то формируется бит $b1(s) = 1$, иначе $b1(s) = 0$ (первый символ повтора). Если символ I повторяется снова, то формируется бит $b2(s) = 1$, иначе $b2(s) = 0$ (второй символ повтора). Если символ I повторяется снова, то формируется символ $n(s)$, учитывающий число повторов (изначально $n(s) = 0$, если символ I повторяется снова, то $n(s) > 0$). В результате могут формироваться серии вида:

$$\{i(s), b1(s) = 0\}, \{i(s), b1(s) = 1, b2(s) = 0\}, \{i(s), b1(s) = 1, b2(s) = 1, n(s)\}.$$

Структуры алгоритма I/2B/N кодирования длин и закодированных им данных серий приведены на рис. 2. Алгоритм I/2B/N кодирования длин серий также, как алгоритм RLE, может иметь блочную и поточную реализации.

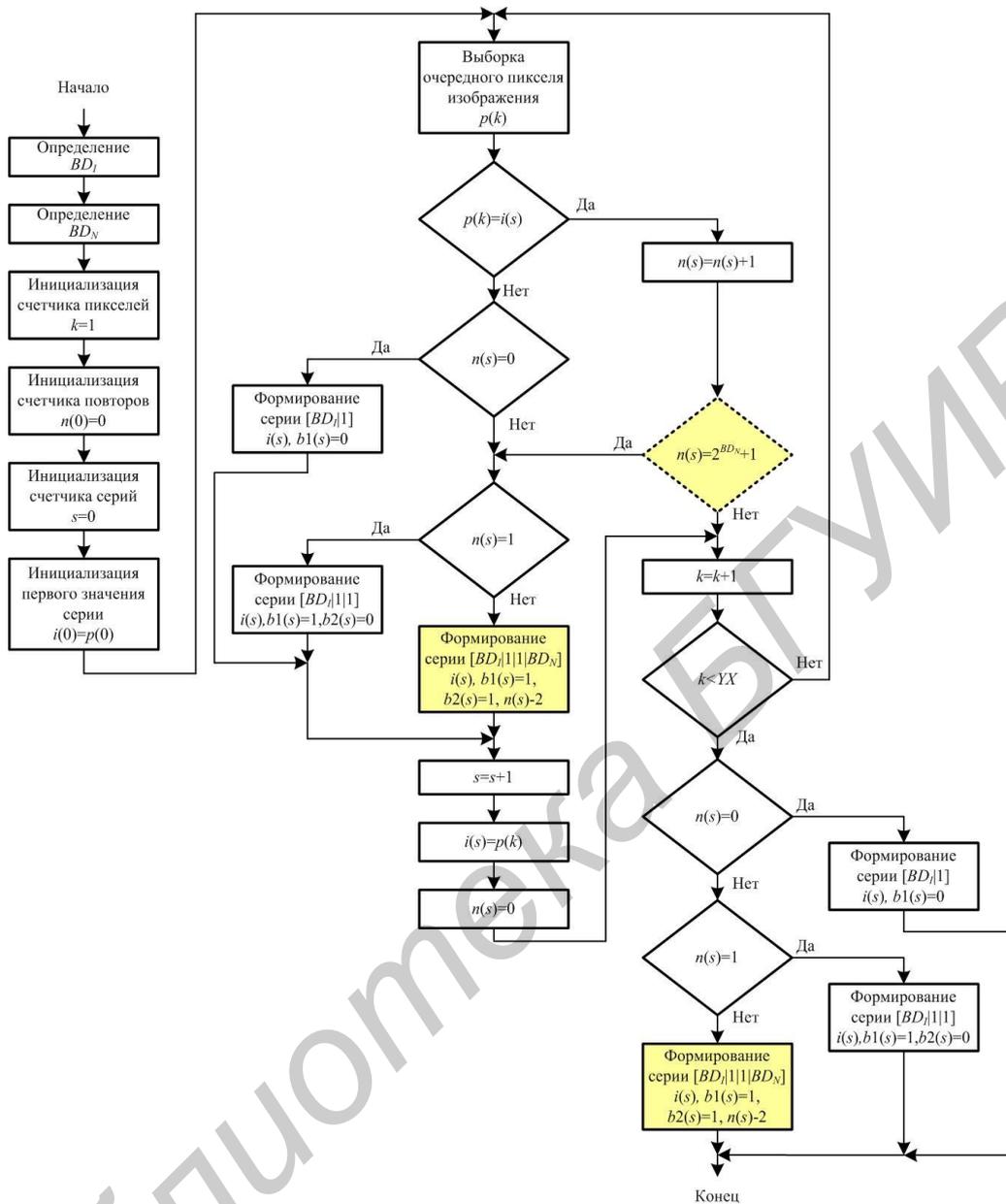
Размер $R_{I/2B/N}$ (бит) кода для алгоритма I/2B/N определяется с помощью выражения

$$R_{I/2B/N} = S(BD_I + 1) + \sum_{s=0}^{S-1} b1(s) + BD_N \sum_{s=0}^{S-1} b2(s).$$

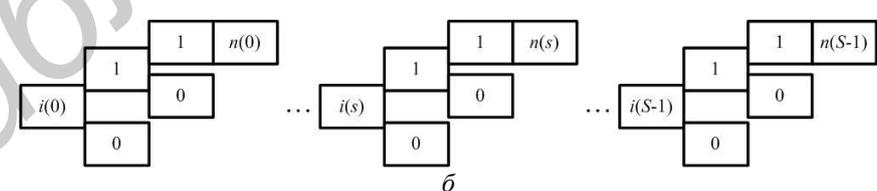
Для определения вычислительной сложности используется выражение

$$C_{I/2B/N} = YX + 4S + \sum_{s=0}^{S-1} b1(s) + \sum_{s=0}^{S-1} b2(s). \quad (1)$$

Выражение (1) учитывает YX операций на буферизацию и формирование таблицы I/N -длин серий размером S записей, S операций на поиск максимального значения по I , S операций на поиск максимального значения по N , $2S + \sum_{s=0}^{S-1} b1(s) + \sum_{s=0}^{S-1} b2(s)$ операций на кодирование и передачу.



a



б

Рис. 2. Модифицированное I/2B/N кодирование длин серий: а – алгоритм I/2B/N кодирования длин серий; б – структура закодированных данных по алгоритму I/2B/N

Алгоритм кодирования длин серий I/3B/N

Предлагается модификация I/3B/N алгоритма кодирования длин серий RLE для сжатия полутоновых изображений, основанная на учете вероятности повтора значений пикселей в строках. Алгоритм I/3B/N отличается от алгоритма I/2B/N использованием дополнительного символа $b3(s)$, который принимает значение 1, если символ I повторяется в

третий раз подряд, и принимает значение 0, если третий повтор символа I отсутствует. Структура закодированных данных в соответствии с алгоритмом I/3B/N приведена на рис. 3.

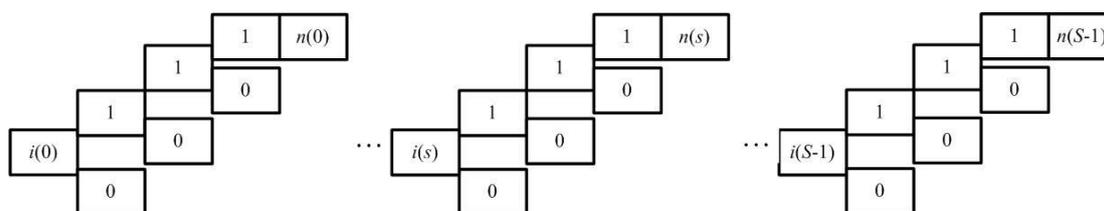


Рис. 3. Структура закодированных по алгоритму I/3B/N данных

Размер $R_{I/3B/N}$ (бит) кода для алгоритма I/3B/N определяется с помощью выражения

$$R_{I/2B/N} = S(BD_I + 1) + \sum_{s=0}^{S-1} b1(s) + \sum_{s=0}^{S-1} b2(s) + BD_N \sum_{s=0}^{S-1} b3(s).$$

Вычислительная сложность алгоритма I/3B/N оценивается с помощью выражения

$$C_{I/2B/N} = YX + 4S + \sum_{s=0}^{S-1} b1(s) + \sum_{s=0}^{S-1} b2(s) + \sum_{s=0}^{S-1} b3(s). \quad (2)$$

Выражение (2) учитывает YX операций на буферизацию и формирование таблицы I/N длин серий размером S записей, S операций на поиск максимального значения по I , S операций на поиск максимального значения по N , $2S + \sum_{s=0}^{S-1} b1(s) + \sum_{s=0}^{S-1} b2(s) + \sum_{s=0}^{S-1} b3(s)$ операций на кодирование и передачу.

Другие модификации алгоритма кодирования длин

Для сжатия полутоновых изображений кроме алгоритмов I/2B/N и I/3B/N разработаны другие модифицированные алгоритмы кодирования длин серий, основанные на учете вероятности повтора значений пикселей в строках, отличающиеся использованием различного числа дополнительных символов для кодирования повторов символов (табл. 3).

Таблица 3. Модифицированные алгоритмы кодирования длин серий

№	Алгоритм	Особенность структуры закодированных данных
1	I/S/N	переменный размер поля длины серии
2	I/B/N	дополнительный символ повтора
3	I/B/S/N	дополнительный символ повтора и переменный размер поля длины серии
4	I/2B/N	два дополнительных символа повтора
5	I/2B/S/N	два дополнительных символа повтора и переменный размер поля длины серии
6	I/3B/N	три дополнительных символа повтора
7	I/3B/S/N	три дополнительных символа повтора и переменный размер поля длины серии
8	2I/N	повтор кодируемого символа
9	2I/S/N	повтор кодируемого символа и переменный размер поля длины серии
10	2I/B/N	повтор кодируемого символа и дополнительный символ повтора
11	2I/B/S/N	повтор кодируемого символа, дополнительный символ повтора и переменный размер поля длины серии
12	2I/2B/N	повтор кодируемого символа и два дополнительных символа повтора
13	2I/2B/S/N	повтор кодируемого символа, два дополнительных символа повтора и переменный размер поля длины серии
14	2I/B/2N(L/R)	повтор кодируемого символа, дополнительный символ повтора и двухсегментное поле длины серии

Оценка эффективности использования алгоритмов кодирования длин серий для сжатия полутоновых изображений

Для тестовых изображений, представленных на рис. 4, в табл. 4 приведены размеры кода R_X , полученные для алгоритма RLE, алгоритмов из табл. 3, а также алгоритма Хаффмана, архиваторов Zip и Rar, где X – обозначение алгоритма в табл. 3.



Рис. 4. Тестовые изображения: *a* – M1 (128×128 пикселей);
б – M2 (256×256 пикселей); *в* – M3 (512×12 пикселей)

Таблица 4. Размеры кода при сжатии тестовых изображений без потерь

Алгоритм	Размер кода (байт) для изображений			Алгоритм	Размер кода (байт) для изображений		
	M1	M2	M3		M1	M2	M3
RLE	18620	77896	242604	2I/S/N	34484	135364	261921
I/S/N	18739	72412	143162	2I/B/N	32599	127870	222123
I/B/N	21504	91397	303235	2I/B/S/N	32826	128820	225640
I/B/S/N	20957	81407	165901	2I/2B/N	32713	128345	223002
I/2B/N	14694	57583	106871	2I/2B/S/N	32825	128753	225460
I/2B/S/N	17689	68649	118177	2I/B/2N(L/R)	30046	118028	208692
I/3B/N	14577	56701	103512	Zip	13070	44603	76470
I/3B/S/N	17687	68581	117997	Rar	12505	43062	75887
2I/N	30714	120377	208857	Хаффмана	14361	58281	113091

Из табл. 4 следует, что минимальный размер кода обеспечивают алгоритмы Rar и Zip. По сравнению с ними алгоритм I/3B/N показывает примерно на 26 % худший результат, но превосходит на 57 % и 8 % алгоритмы RLE и Хаффмана соответственно. При этом алгоритмы RLE, I/2B/N, I/3B/N обеспечивают по сравнению с алгоритмами Rar и Zip уменьшение времени кодирования в 31,2 и 53,0 раз соответственно при размере изображения 256×256 пикселей, в 18,5 и 16,6 раз соответственно при размере изображения 1024×1024 пикселей, в 10,0 и 13,5 раз соответственно при размере изображения 8192×8192 пикселей (рис. 5).

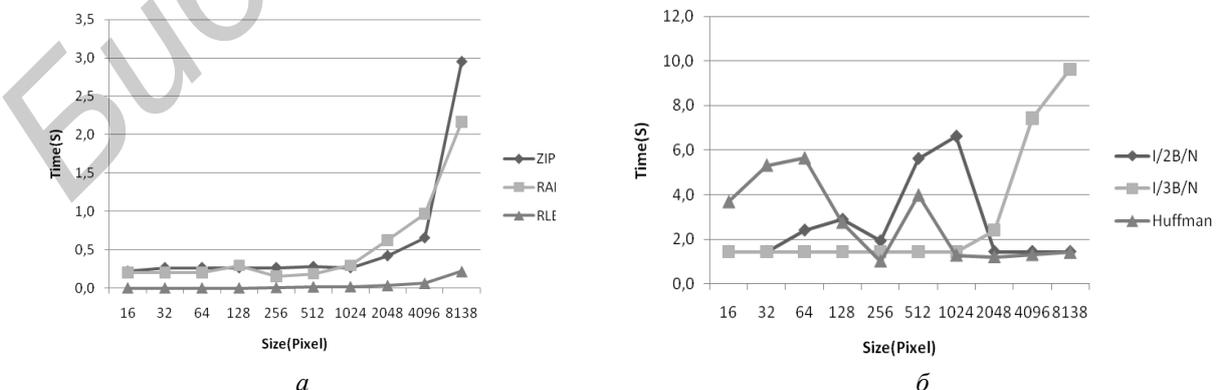


Рис. 5. Зависимости времени кодирования изображений от их размера:
a – для алгоритмов Zip, Rar, RLE и его предложенных модификаций в операционной системе Windows 7;
б – для алгоритмов Хаффмана, I/2B/N и I/3B/N в среде Matlab 2012

Заключение

Предложены модифицированные алгоритмы кодирования длин серий для сжатия без потерь полутоновых изображений, отличающиеся от базового алгоритма RLE учетом вероятности повтора значений пикселей в строках изображения. Показано, что предложенные алгоритмы обеспечивают уменьшение размера закодированных данных на 57% и 8% по сравнению с алгоритмами RLE и Хаффмана соответственно; уменьшение времени кодирования в 10–31 раз и в 13–53 раза при изменении размера изображений от 256×256 пикселей до 8192×8192 пикселей по сравнению с алгоритмами Rar и Zip соответственно.

LOSSLESS COMPRESSION OF THE HALFTONE IMAGES BASED ON RUN-LENGTH ENCODING

H.K. AL-BAHADILY, E.G. MAKEICHIK, V.Yu. TSVIATKOU, V.K. KANAPELKA

Abstract

The modified algorithms length coding to compress grayscale images without losses that are different from the basic algorithm taking into account the likelihood of the occurrence of pixel values and images that reduce the size of the encoded data.

Keywords: images compression, run-length encoding.

Список литературы

1. *Pennebaker W.B., Mitchell J.L.* JPEG Still Image Compression Standard. New York, 1993.
2. *Ebrahimi T.* // Proc. of the SPIE. San Diego, July–August 2000. Vol. 4115. P. 446–454.
3. *Ватолин Д.* Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. М., 2003.
4. *Golomb S.W.* // IEEE Transactions on Information Theory. 1966. July. P. 399–401.

УДК 615.47

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ МОМЕНТА ОБРАЗОВАНИЯ ФИБРИНОВОГО СГУСТКА В ПЛАЗМЕ КРОВИ

А.А. УШАКОВА, П.В. КАМЛАЧ, В.М. БОНДАРИК

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

Поступила в редакцию 3 декабря 2015

Предложены ультразвуковые методы регистрации момента образования фибринового сгустка при проведении коагулологических тестов плазмы крови человека. В ходе проведения исследований для запуска каскада свертывания применялись методики проведения тестов для определения времени свертывания плазмы крови активированного частичного тромбопластинового времени и протромбинового времени. Приведены результаты исследования регистрации момента образования фибринового сгустка по изменению амплитуды и сдвига фаз ультразвукового сигнала.

Ключевые слова: система гемостаза, образование сгустка, ультразвук, амплитуда, сдвиг фазы.

Введение

Быстрое возрастание роли лабораторной диагностики – характерная черта современного этапа развития клинической медицины. С каждым днем все большая роль в диагностике и лечении широкого спектра заболеваний отводится анализу крови, как наиболее широко используемому биологическому материалу. В норме сохранение крови в жидком состоянии, предупреждение и остановку кровотечений, а так же целостность кровеносных сосудов обеспечивает система гемостаза. Система гемостаза тесно связана с функционированием организма в целом и меняет свое функциональное состояние в зависимости от состояния всего организма. Нарушения в работе системы гемостаза такие, как кровотечения и тромбозы могут быть смертельно опасными. Такие состояния легче предотвратить, чем лечить. Все это обуславливает необходимость лабораторной оценки состояния системы гемостаза [1].

Первой попыткой в изучении системы гемостаза было визуальное наблюдение физиологического процесса свертывания крови при нарушениях целостности сосудистой стенки. Позже использование прозрачных стеклянных пробирок позволило наблюдать коагуляционные процессы *in vitro*. При наблюдении за процессом свертывания крови в стеклянной пробирке с помощью секундомера определяли время свертывания – параметр, характеризующий состояние системы гемостаза. Следующим шагом в развитии лабораторных методов исследования гемостаза был переход от визуального наблюдения к простейшим приборам, которые использовали либо метод регистрации момента образования сгустка крови по изменению ее вязкости в процессе коагуляции, либо оптический метод регистрации, основанный на изменении оптической плотности по мере образования фибринового сгустка. В полуавтоматических приборах добавилась функция автоматического запуска после внесения реагента, активирующего каскад свертывания. Такие приборы возможно применять для скрининговых исследований. Современные полностью автоматизированные системы применяются для клинических исследований в больших диагностических лабораториях, они дают возможность проводить определение любых коагулометрических, хромогенных и иммунологических тестов и позволяют полностью исследовать коагулологический статус пациентов.

В настоящее время наиболее распространенным подходом оценки состояния системы гемостаза в скрининговых исследованиях являются коагуляционные тесты для определения времени свертывания крови. Все коагуляционные тесты основаны на определении промежутка времени от добавления стартового реактива, запускающего каскад свертывания крови, до наступления момента коагуляции (выпадения фибрина) и различаются методом регистрации момента образования фибринового сгустка крови. В последние годы появляются все новые методы исследования системы гемостаза: низкочастотная кондуктометрия, лазерный метод, электрохимические методы. Однако по-прежнему основными методами регистрации момента образования сгустка в современных коагулометрах остаются оптический, механический либо оптико-механический. Несмотря на ряд достоинств существующих методов, они обладают и рядом недостатков. С помощью оптического метода можно исследовать только оптически прозрачные среды, что не позволяет проводить исследования на цельной крови. Основным недостатком механического метода является низкая чувствительность.

Одним из перспективных направлений в скрининге гемостаза является применение ультразвука (УЗ). Ультразвуковой метод исследования гемостаза обладает таким важным преимуществом, как возможность исследования цельной крови и в тоже самое время в нем отсутствует самый главный недостаток механических методов – низкая чувствительность.

Методика эксперимента

Первым ультразвуковым методом регистрации момента образования сгустка был предложен метод, основанный на изменении амплитуды ультразвукового сигнала при образовании фибринового сгустка [2]. Однако величина амплитуды ультразвукового сигнала сильно зависит от качества акустического контакта, которое довольно сложно обеспечить. В связи с этим был предложен еще один ультразвуковой метод, основанный на определении момента коагуляции по изменению сдвига фаз между зондирующим ультразвуковым сигналом и сигналом, прошедшим через кювету с исследуемым образцом плазмы крови [3]. Изменение сдвига фазы происходит из-за того, что при образовании фибринового сгустка путь прохождения ультразвуковой волны удлиняется. До свертывания плазмы крови непрерывные упругие колебания проходят через кювету с плазмой кратчайшим путем в виде продольной волны, а при образовании сгустка путь ультразвукового луча, огибающего образующийся фибриновый сгусток больше, чем прямой путь через несвернутую плазму крови. Запаздывание прихода сквозного сигнала на приемный преобразователь и является причиной изменения сдвига фаз между излученным и принятым сигналами.

В ходе исследования для запуска каскада свертывания применялись методики двух самых распространенных коагуляционных тестов: определение активированного частичного тромбопластинового времени (АЧТВ) и протромбинового времени (ПТВ). В тесте для определения АЧТВ время свертывания плазмы крови определяется после активации контактных факторов без добавления тканевого тромбопластина, поэтому тест отражает общую эффективность внутреннего пути свертывания. Протромбиновое время свидетельствует об общей эффективности внешнего пути свертывания, так как время коагуляции плазмы крови определяется в присутствии оптимальной концентрации тромбопластина [4]. Исследования проводились по двум методикам разработанным для определения АЧТВ и ПТВ по изменению величины амплитуды и по изменению сдвига фаз, основанным на стандартных клинических методиках.

Проведение исследований АЧТВ и ПТВ происходит в несколько этапов:

- 1) подготовка реактивов;
- 2) перемешивание реактивов с плазмой;
- 3) регистрация образования фибринового сгустка.

При проведении исследований АЧТВ и ПТВ с помощью различных методик первых два этапа проводят согласно стандартизированным методикам кефалин-каолинового времени плазм по Саен и Квику [5]. Для измерения АЧТВ используется набор для определения АЧТВ К-350 (PZ Cormay S.A. (Польша)) и Calcium Chloride 0,025 M (HemosIL), а для измерений ПТВ – набор для определения протромбинового времени К-251 (PZ Cormay S.A. (Польша)).

Для проведения исследований параметров гемостаза по изменению величины амплитуды ультразвукового сигнала, прошедшего через кювету с исследуемым образцом, был разработан

лабораторный макет (рис. 1), который состоит из генератора Г4-102 (1), двух пьезокерамических преобразователей прямоугольной формы (2,4), размещенных на одной оси на стенках полистирольной круглой кюветы (3), двухканального цифрового осциллографа С8-46/1 (5) и термостатируемого кюветного отделения (6).

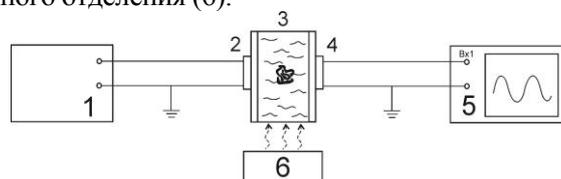


Рис. 1. Схема лабораторного макета для регистрации момента образования фибринового сгустка в плазме крови по изменению величины амплитуды УЗ

Электрический сигнал с генератора поступает на входной пьезопреобразователь, где преобразуется в ультразвук. Ультразвуковой сигнал проходит через кювету с исследуемым образцом плазмы крови и преобразуется обратно в электрический сигнал выходным пьезопреобразователем. Значение амплитуды выходного сигнала фиксируется на экране осциллографа. При образовании фибринового сгустка в плазме крови изменяется акустическое сопротивление исследуемой среды и уменьшается амплитуда выходного сигнала. Уменьшение величины амплитуды выходного сигнала свидетельствует об образовании фибринового сгустка.

Для определения сдвига фаз ультразвукового сигнала, прошедшего через кювету с исследуемым образцом плазмы крови по отношению к зондирующему сигналу при исследованиях параметров гемостаза в лабораторном макете использовался двухканальный осциллограф (рис. 2). На вход первого канала осциллографа подавался зондирующий сигнал, на вход второго канала сигнал прошедший через кювету. На экране осциллографа измерялся временной сдвиг между двумя сигналами и производился расчет сдвига фаз.

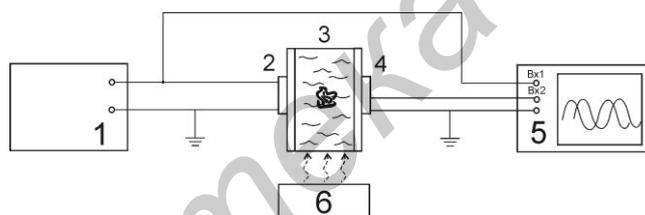


Рис. 2. Схема лабораторного макета для регистрации момента образования фибринового сгустка в плазме крови по изменению сдвига фаз УЗ

Результаты и их обсуждение

Был проведен ряд исследований по измерению величины амплитуды выходного сигнала и сдвига фазы, с плазмой крови различных групп и резус факторов, в диапазоне от 100 кГц до 1800 кГц. В результате проведения измерений были получены усредненные характеристики изменения напряжения выходного сигнала на разных частотах и усредненные характеристики изменения сдвига фазы до наступления момента коагуляции и после него при проведении теста для определения АЧТВ (рис. 3, 5) и ПТВ (рис. 4, 6).

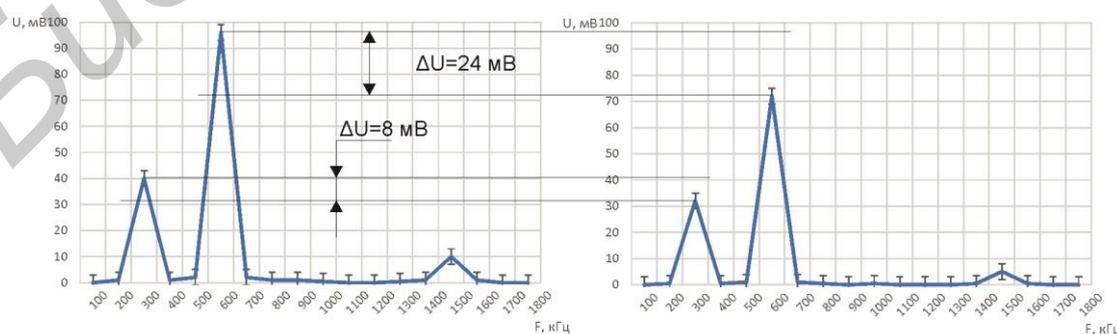


Рис. 3. Графики зависимости величины амплитуды от частоты до момента образования фибринового сгустка в плазме крови и после него при проведении теста АЧТВ

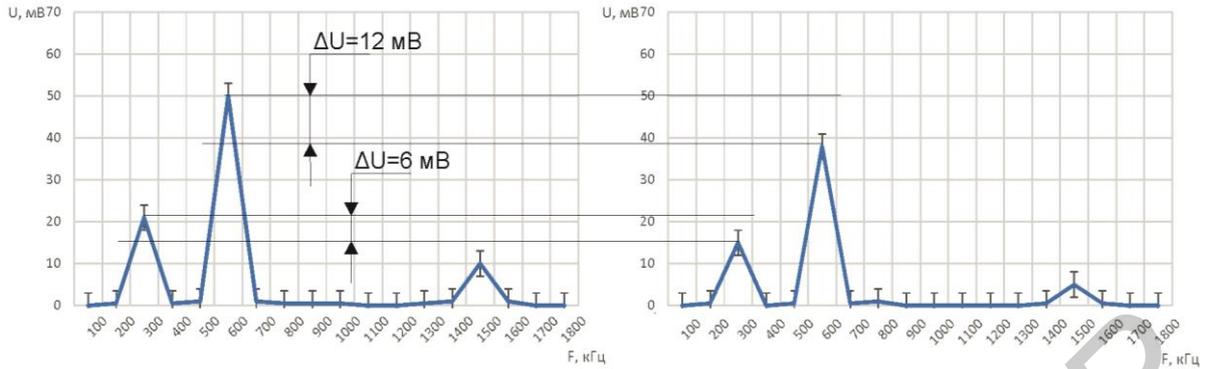


Рис. 4. Графики зависимости величины амплитуды от частоты до момента образования фибринового сгустка в плазме крови и после него при проведении теста ПТВ

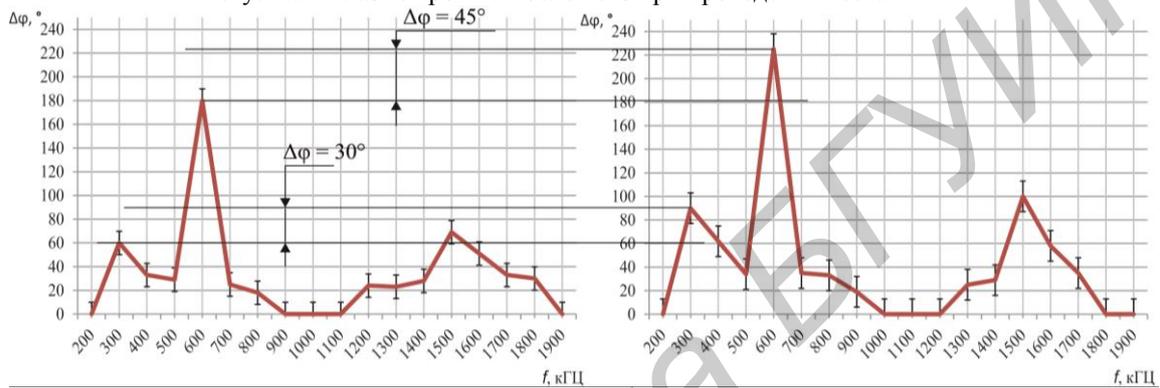


Рис. 5. Графики зависимости величины амплитуды от частоты до момента образования фибринового сгустка в плазме крови и после него при проведении теста АЧТВ

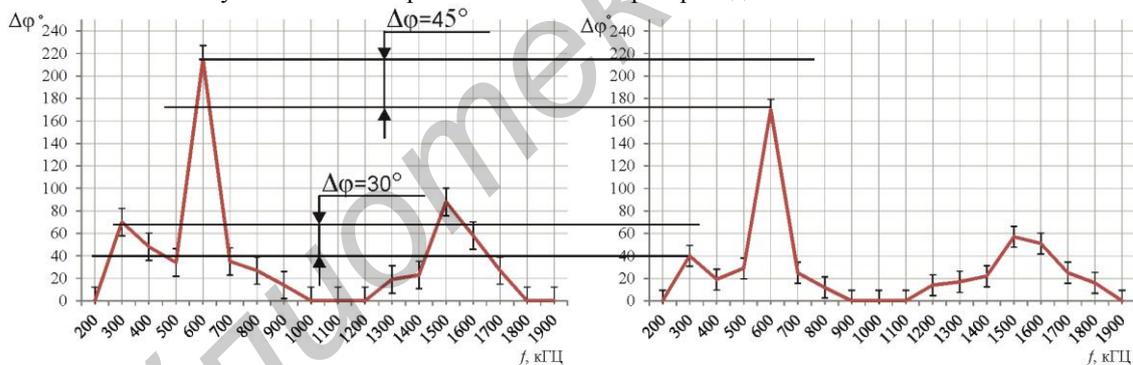


Рис. 6. Графики зависимости величины амплитуды от частоты до момента образования фибринового сгустка в плазме крови и после него при проведении теста ПТВ

На передаточных характеристиках максимальный пик наблюдается на частоте 600 кГц. Данный пик обусловлен тем, что резонансная частота пьезокерамических преобразователей прикрепленных к стенкам кюветы составляет 600 кГц и длина прохождения ультразвука в плазме кратна длине волны. Для проведения дальнейших исследований рекомендуется использовать соответственно частоту 600 кГц.

Из рис. 3 видно, что при проведении теста для определения АЧТВ до наступления момента коагуляции на частоте 600 кГц величина амплитуды выходного сигнала составляла 96 мВ, а после образования фибринового сгустка в плазме крови составила 72 мВ. Из рис. 4 видно, что при проведении теста для определения ПТВ величина амплитуды выходного сигнала до момента образования фибринового сгустка в плазме крови составляла 51 мВ, а после образования сгустка – 39 мВ. Таким образом, можно сделать вывод, что при образовании фибринового сгустка в исследуемой плазме крови происходит уменьшение величины амплитуды выходного сигнала на $20 \pm 5\%$.

Из характеристики, представленной на рис. 5, видно, что при проведении теста для определения АЧТВ на частоте 600 кГц величина сдвига фазы между зондирующим и выходным сигналом составляет 45°. При проведении теста для определения ПТВ сдвиг фазы на частоте 600 кГц так же составляет 45°. То есть при образовании фибринового сгустка в плазме крови сдвиг фазы изменяется на постоянную величину.

Заключение

Разработан способ для определения АЧТВ и ПТВ с помощью ультразвуковых колебаний, основанный на стандартных методиках кефалин-каолинового времени плазм по Саен и методу Квика. Суть способа заключается в прохождении ультразвука через плазму крови и фиксации сдвига фаз при образовании сгустка крови. Разработанные методики являются бесконтактными, но лишены основного недостатка существующих бесконтактных методик – работы только с оптически прозрачными материалами. Предлагаемые методики позволяют проводить исследования параметров гемостаза для цельной крови без погружения в пробу датчика и влияния на исследуемые параметры.

Установлена взаимосвязь между параметрами гемостаза и параметрами ультразвука. По результатам исследований установлено, что:

– при измерении АЧТВ и ПТВ на частоте 600 кГц величина сдвига фазы между зондирующим и выходным сигналом составляет 45°;

– при регистрации момента образования сгустка по изменению сдвига фазы, величина на которую изменяется сдвиг фазы остается постоянной, так же влияние интерференционных помех на величину сдвига фазы практически отсутствует, что повышает стабильность результатов измерения.

Предложенный способ, позволяющий проводить исследования параметров гемостаза (активированное частичное тромбопластиновое время и протромбиновое время) с помощью зондирования ультразвуковыми колебаниями, может использоваться при разработке новых приборов лабораторной диагностики системы гемостаза.

ULTRASONIC DETECTION METHOD OF BLOOD PLASMA FIBRIN CLOT FORMATION MOMENT

A.A. USHAKOVA, P.V. KAMLACH, V.M. BONDARIK

Abstract

The ultrasonic method for detecting of the fibrin clot formation during the coagulation tests is propose. To start clotting cascade in research APTT and PTV tests were used. The results of investigation for detecting fibrin clot formation by changing the amplitude and phase shift of the ultrasonic signal are presented.

Keywords: hemostatic system, clot formation, ultrasound, amplitude, phase displacement.

Список литературы

1. Долгов В.В., Свириг П.В. Лабораторная диагностика нарушений гемостаза. Тверь, 2005.
2. Камлач П.В., Бондарик В.М., Дегтярев Ю.Г. // Изобретатель. 2012. № 10. С. 36–39.
3. Ушакова А.А., Камлач П.В., Бондарик В.М. // Матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Медэлектроника 2014. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии». Минск, 10–11 декабря 2014. С. 235–237.
4. Петрищева Н.Н., Папаян Л.П. Гемостаз. Физиологические механизмы, принципы диагностики основных форм геморрагических заболеваний. СПб, 1999.
5. Зубовская Е.Т., Светлицкая С.Г. Система гемостаза. Теоретические основы и методы исследования. Минск, 2010.

УДК 621.391.82

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СКАНИРУЮЩИХ СЛУЧАЙНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С РАЗНОЙ ФОРМОЙ РАСКРЫВА

И.Ф. ШАЛЯПИН, С.А. ЗАВАДСКИЙ, О.А. ЮРЦЕВ

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

Поступила в редакцию 14 декабря 2015

Приведены результаты численного моделирования антенной решетки с прямоугольным, эллиптическим и 8-угольным раскрывом и случайным расположением излучателей в апертуре. Исследуются зависимости диаграммы направленности и коэффициента направленного действия отдельных реализаций и среднего значения указанных параметров от амплитудно-фазового распределения возбуждения излучателей, степени разрежения по отношению к эквидистантной решетке.

Ключевые слова: антенная решетка, равномерный закон распределения, диаграмма направленности, коэффициент направленного действия.

Введение

Антенные решетки со случайным расположением излучателей в апертуре (случайные решетки) теоретически исследованы весьма подробно, опубликован ряд работ [1–9]. В известных работах исследованы средние значения диаграммы направленности (ДН) и коэффициента направленного действия (КНД) и их флуктуации. При этом использован аппарат теории вероятности. Рассмотрены, в том числе, решетки с круглой формой раскрыва [3, 9]. Причем в работе [3] рассмотрен случай, когда разрежение в расположении излучателей увеличивается от центра решетки к ее краям по закону спадающего амплитудного распределения (АР) возбуждения излучателей. Вариант случайной решетки при равномерном амплитудном распределении и равномерном законе распределения излучателей в решетке имеет больший КНД, чем решетки с неравномерным законом распределения. Кроме того, такие решетки более универсальны, с точки зрения обеспечения требуемого уровня боковых лепестков. Заданный уровень боковых лепестков реализуется выбором амплитудного распределения.

В отличие от известных работ в настоящей статье рассматриваются решетки с прямоугольной, эллиптической и многоугольной формами раскрыва, в которых расположение излучателей в апертуре решетки подчиняется случайному закону с равномерным законом распределения.

Решетки с восьмиугольным раскрывом и случайным расположением излучателей в апертуре в известных работах не рассмотрены, хотя они имеют более низкий уровень боковых лепестков по отношению к решеткам с прямоугольным раскрывом, а при некоторых геометрических параметрах раскрыва – и по отношению к решеткам с эллиптическим раскрывом.

Другим отличием настоящей статьи от опубликованных в известных источниках является то, что при анализе использован численный метод. Это позволило определить не только средние значения ДН и КНД, но и их случайные реализации. Анализ отдельных случайных реализаций важен потому, что при изготовлении случайной решетки практическая конструкция будет представлять собой одну из возможных реализаций. В этом случае надо

знать ее характеристики и параметры. Кроме того, применение численного метода позволяет анализировать решетки с любой формой апертуры.

Методика численного анализа

Анализ проведен с использованием теоремы перемножения ДН [10]. В качестве элементарного излучателя использован гипотетический излучатель с задаваемой шириной главного лепестка ДН ($2\theta_{0,5}^1$) и задаваемым уровнем максимального бокового лепестка (F_{bm}^1). В частности, весь численный анализ сделан для случая $2\theta_{0,5}^1 = 90^\circ$ при отсутствии боковых лепестков в переднем полупространстве.

Рассмотрим методику задания амплитудного и фазового распределения (АР и ФР) возбуждения излучателей в апертуре. Воспользуемся рис.1, на котором условно показана эквидистантная антенная решетка с прямоугольной апертурой и прямоугольной сеткой расположения излучателей. Основные геометрические параметры: Dx, Dy – расстояния между соседними излучателями по осям X, Y ; Nx, Ny – число излучателей в решетке по осям X, Y ; Lx, Ly – размеры решетки по осям X, Y . Причем $Lx = Dx \cdot Nx$, $Ly = Dy \cdot Ny$. Ось Z ориентирована перпендикулярно плоскости апертуры решетки. На рисунке пунктирной линией показан также контур эллиптической решетки. При расчете поля эллиптической решетки путем суммирования полей всех излучателей исключаются излучатели, расположенные за пределами эллипса.

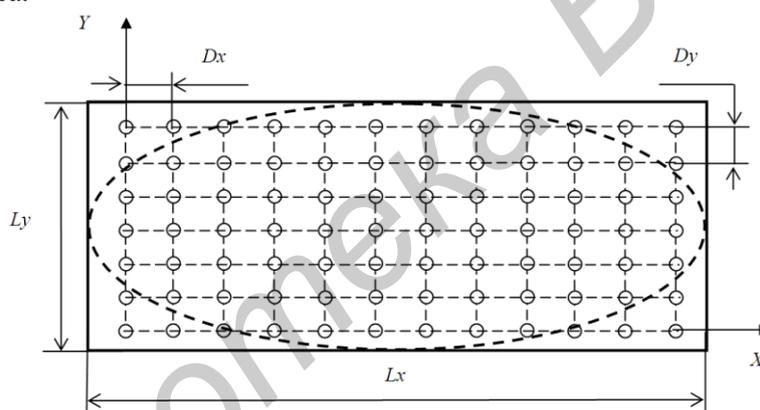


Рис. 1. Антенная решетка

Амплитудное распределение в прямоугольной решетке задается разделяющимся по координатам X, Y , спадающим к концам решетки по закону синуса по оси X и по оси Y до уровня $\Delta x \leq 1, \Delta y \leq 1$. В центре решетки амплитуда возбуждения излучателя максимальна и равна 1. Степень синуса по осям X, Y произвольна и равна Px, Py . Аналогично задается амплитудное распределение в 8-угольной решетке.

На рис. 2 показан пример 8-угольной решетки. На правом рисунке удалена часть излучателей для получения разреженной решетки со случайным расположением излучателей в апертуре. Численное моделирование решеток выполнено при различном соотношении сторон Lx/Ly , при значениях Dx, Dy , удовлетворяющих и не удовлетворяющих условию единственности главного лепестка нулевого порядка, различных значениях Nx, Ny , различном амплитудном распределении (значениях $\Delta x, \Delta y, Px, Py$) и различном числе удаленных излучателей для получения разреженной решетки (Nb). При сканировании задавался угол сканирования относительно нормали к плоскости решетки $\theta_m = 0 \dots \theta_{max}$. В качестве угла максимального отклонения θ_{max} взято значение, равное половине ширины главного лепестка ДН элементарного излучателя $\theta_{max} = \theta_{0,5}^1 = 45^\circ$. Расстояния Dx, Dy взяты равными $0,53\lambda$, что обеспечивает в эквидистантной решетке выполнение условия единственности главного лепестка нулевого порядка в секторе сканирования.



Рис. 2. Восьмиугольная решетка

Некоторые результаты моделирования, характеризующие основные закономерности, приведены ниже. В качестве примеров, иллюстрирующих закономерности, рассмотрены решетки, получаемые из решетки с прямоугольным раскрывом с числом излучателей $N_x = 30$ и $N_y = 30$ при $L_x/L_y=1$. Средняя ДН находилась в результате усреднения 100 случайных реализаций решеток при заданном N_b . По средней ДН рассчитывался коэффициент направленного действия (КНД). На последующих графиках приводятся средние ДН, максимальный уровень боковых лепестков (УБЛ) средней ДН и средний КНД.

Результаты и их обсуждение

Проведенный анализ показал, что с ростом N_b (ростом разрежения решетки) максимальный уровень боковых лепестков решетки (F_{bm}) и ширина главного лепестка решетки ($2\theta_{0,5}$) практически не меняются. Причем это наблюдается как для средней ДН, так и для отдельных случайных реализаций ДН. Коэффициент направленного действия уменьшается с ростом N_b . Для иллюстрации на рис. 3, а представлена ДН решетки в плоскости XZ (горизонтальной на рис. 2) для углов сканирования $\theta_m = 0$ и $\theta_m = 45^\circ$ при $N_b = 0$. На рис. 3, б показана средняя ДН при $N_b = 50\%$. Амплитудное распределение возбуждения излучателей равномерное ($\Delta x = 1, \Delta y = 1$).

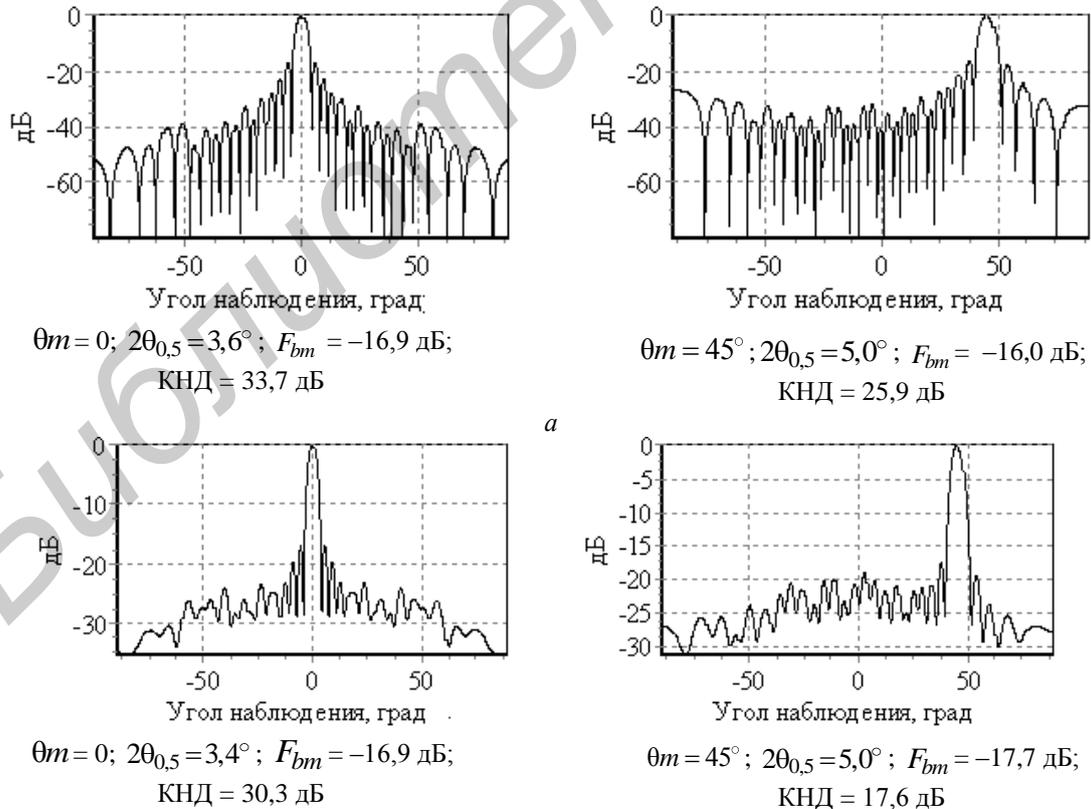


Рис. 3 Диаграммы направленности решетки с круглым раскрывом

На рис. 4 показана зависимость значений КНД решетки от числа удаленных излучателей Nb при двух углах сканирования ($\theta_m = 0$ и $\theta_m = 45^\circ$) для трех форм раскрыва – прямоугольной (1), круглой (2) и восьмиугольной (3). Размеры всех сторон в восьмиугольной решетке сделаны одинаковыми для обеспечения одинаковых параметров $2\theta_{0,5}$ и F_{bm} в вертикальной, горизонтальной и наклонной плоскостях. Амплитудное распределение возбуждения излучателей равномерное ($\Delta x = 1$, $\Delta y = 1$).

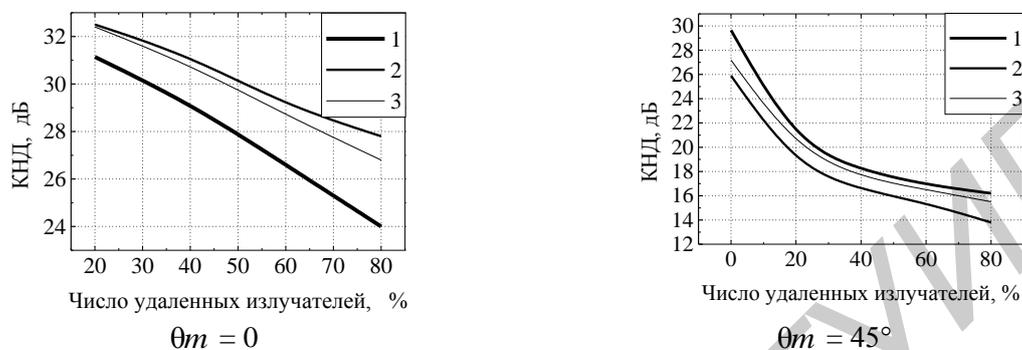


Рис. 4. Зависимость КНД от числа удаленных излучателей при двух углах сканирования θ_m для трех форм раскрыва – прямоугольной (1), круглой (2) и восьмиугольной (3)

На рис. 5 показана зависимость КНД от угла сканирования для трех форм раскрыва при двух значениях $Nb = 30$ и 60 %, а на рис. 6 зависимость максимального уровня боковых лепестков (УБЛ) от угла сканирования при тех же значениях Nb .

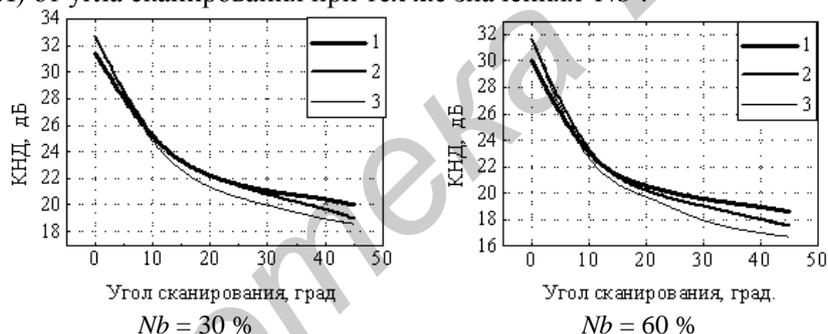


Рис. 5. Зависимость КНД от угла сканирования для трех форм раскрыва

Проведенный численный анализ решеток с тремя формами раскрывов – экидистантных и разреженных по случайному закону позволяет сделать следующие выводы. При равномерном амплитудном распределении:

- по величине КНД при нулевом угле сканирования при одинаковых габаритных размерах на первом месте антенная решетка с круглым раскрывом, при сканировании преимущество имеет решетка с прямоугольным раскрывом;

- по уровню УБЛ при тех же условиях и всех углах сканирования преимущество на стороне 8-угольной решетки.

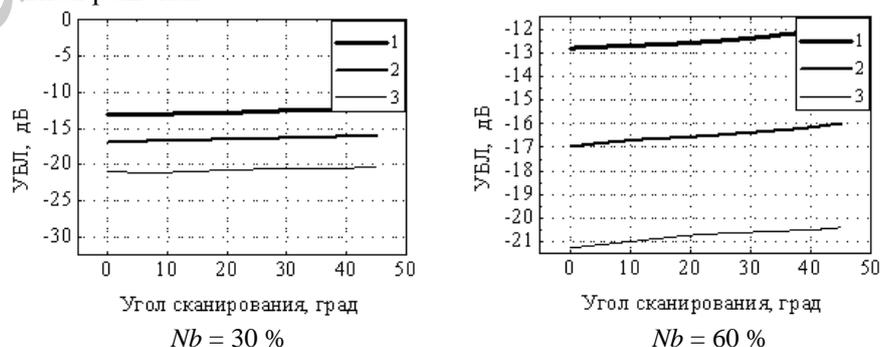


Рис. 6. Зависимости максимального уровня боковых лепестков (УБЛ) от угла сканирования

Сравнительный анализ был сделан для равномерного амплитудного распределения потому, что в активных антенных решетках важно, чтобы приемо-передающие модули всех излучателей работали в режиме передачи с максимальной мощностью. В решетке с 8-угольным раскрывом в одной из продольных плоскостей УБЛ, как известно, может быть сделан меньшего размера, чем во всех других плоскостях. Для этого длина в ортогональной продольной плоскости делается меньше. Эта возможность сохраняется и в разреженной решетке.

Характер изменения параметров ДН и КНД в отдельных реализациях необходимо знать при практическом изготовлении разреженной решетки. Выбор той или иной реализации решетки определяется требованиями к УБЛ и КНД. На рис. 7 проиллюстрировано изменение параметров в разреженной решетке от реализации к реализации. Расчеты сделаны для решеток с 8-угольным раскрывом и числом удаленных излучателей $Nb = 60\%$. Как и ранее, число излучателей по осям X и Y равно 30, расстояние между соседним излучателями вдоль этих осей равно $0,53\lambda$, что обеспечивает в эквидистантной решетке выполнение условия единственности главного лепестка нулевого порядка при максимальном угле сканирования $\theta_m = 45^\circ$.

Все предыдущие результаты получены для решеток, в которых при $Nb = 0$ выполнено условие единственности главного лепестка нулевого порядка в секторе сканирования. Известно, что в зависимости от степени невыполнения этого условия при угле сканирования, большем некоторого значения, в множителе системы решетки появляются главные лепестки порядка ± 1 . На их месте в ДН решетки возрастают боковые лепестки (дифракционные). Удаление части излучателей по случайному закону приводит к нарушению эквидистантности в решетке. Однако это не приводит к «размыванию» дифракционных боковых лепестков.

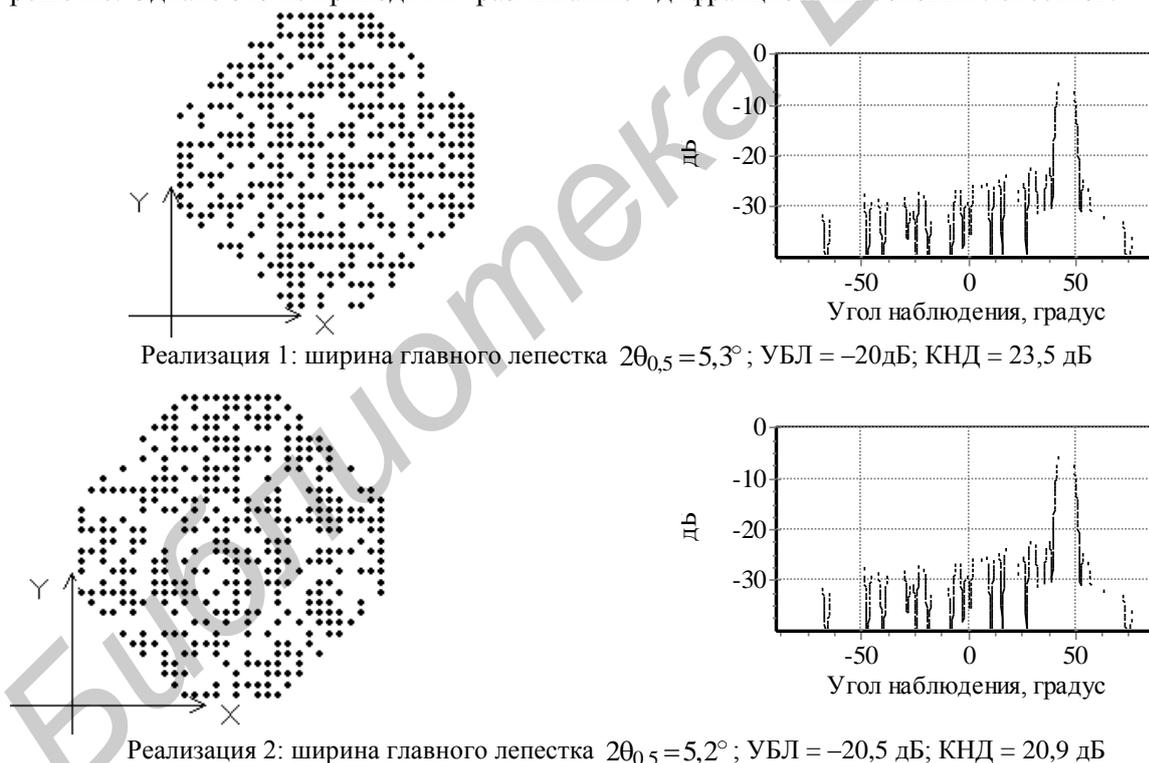


Рис. 7. Параметры отдельных реализаций случайной решетки при $Nb = 60\%$

Для иллюстрации этого свойства на рис. 8 показана средняя ДН решетки с круглым раскрывом при $Nb = 50\%$, и двух значениях угла сканирования $\theta_m = 0$ и $\theta_m = 45^\circ$. Расстояние между соседними излучателями равно λ (не выполняется условие единственности главного лепестка нулевого порядка). Этот рисунок надо сравнить с рис. 3, б. На рис. 8 при $\theta_m = 0$ слева появился дифракционный главный лепесток порядка -1, справа – лепесток порядка +1, в центре рабочий главный лепесток нулевого порядка. На рис. 8 при $\theta_m = 45^\circ$ слева расположен лепесток порядка -1, справа – рабочий главный лепесток нулевого порядка при угле

сканирования $\theta_m = 45^\circ$. Расчеты сделаны для равномерного амплитудного распределения. От него зависит уровень боковых лепестков, расположенных между главными лепестками. Уровень же дифракционных главных лепестков от амплитудного распределения не зависит.

Таким образом, для получения разреженной антенной решетки из эквидистантной решетки путем удаления части излучателей по случайному закону необходимо в эквидистантной решетке выполнить условие единственности главного лепестка нулевого порядка.

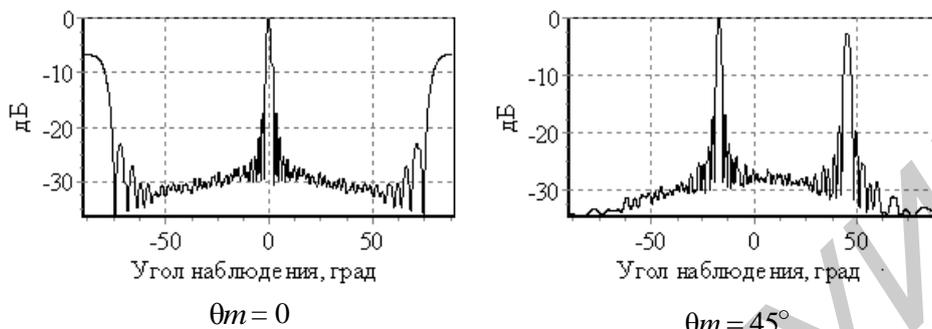


Рис. 8. ДН решетки с круглым раскрытием при невыполнении условия единственности главного лепестка, $Nb = 50\%$

Заключение

Проведенный численный анализ зависимости параметров ДН и КНД от угла сканирования и степени разрежения эквидистантной решетки по случайному закону позволяет более обоснованно подходить к вопросам применения разреженных сканирующих антенных решеток и выбору формы раскрытия.

COMPARATIVE ANALYSIS OF RANDOM SCANNING ANTENNA ARRAYS WITH DIFFERENT FORMS OF APERTURE

I.F. SHALYAPIN, S.A. ZAVADSKI, O.A. YURTSEV

Abstract

The results of numerical simulation of antenna array with rectangular, elliptical and octagonal aperture and uniform distribution of radiators are presented.

Keywords: antenna array, uniform distribution law, directional pattern, directivity.

Список литературы

1. Lo Y.T. // IEEE Trans. 1963. Vol. AP-11, № 4. P. 511–512.
2. Lo Y.T. // IEEE Trans. 1964. Vol. AP-12, № 3. P. 257–269.
3. Scolnik M.J, Sherman J.W., Ogg F.C. // IEEE Trans. 1964. Vol. AP-12, № 4. P. 408–417.
4. Lo Y.T., Simcoe R.J. // IEEE Trans. 1967. Vol. AP-15, № 2. P. 231–235.
5. Закон М.Б., Меркулов В.В. // Радиотехника и электроника. 1965. № 1. С. 7–13.
6. Меркулов В.В. // Радиотехника и электроника. 1966. № 5. С. 128–130.
7. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. М., 1979.
8. Содин Л.Г. // Радиотехника и электроника. 1966. № 11. С. 1953–1959.
9. Шифрин Я.С., Назаренко В.А. // Радиотехника и электроника. 1991. № 1. С. 52–62.
10. Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. Основы теории антенн. М., 2007.

УДК 621.396.1

СИНТЕЗ ИЗМЕРИТЕЛЯ УГЛОВОЙ КООРДИНАТЫ И ДАЛЬНОСТИ В СИСТЕМАХ СО СВЕРХБЫСТРЫМ СКАНИРОВАНИЕМ ЛУЧА ПРИ СОПРОВОЖДЕНИИ ПО ПАЧКАМ

С.В. АНИКЕЕВ, В.А. КУРЕНЁВ

*Военная академия Республики Беларусь
Минск-57, 220057, Беларусь*

Поступила в редакцию 14 января 2016

Представлен метод измерения угловой координаты в системах со сверхбыстрым сканированием луча (СБС). Сканирование слоями видимости по дальности позволяет получать информацию об угловой координате из задержки пачки отраженных от цели сигналов. Совместная (комплексная) обработка информации от СБС и метода сопровождения угловой координаты по пачкам (МСП) применена в синтезированном двухкоординатном измерителе.

Ключевые слова: синтез измерителя координат, сверхбыстрое сканирование луча, метод сопровождения по пачкам.

Введение

Концепция систем со сверхбыстрым сканированием как способ электронного сканирования луча диаграммы направленности антенны во всем секторе за время длительности импульса впервые была предложена в [1]. Дальнейшее распространение способ нашел в задачах томографического распознавания объектов [2], радиолокационного контроля метеорологической обстановки [3] и сверхширокополосного обнаружения целей [4]. В [5] проведен синтез и статистическое моделирование двухкоординатного измерителя со сверхбыстрым сканированием луча. В статье рассматривается вопрос применения СБС (МСП) для прецизионного измерения координат цели.

Описание метода

При МСП достаточно узкий слой видимости сканирует в некотором диапазоне дальностей, перекрывающем диапазон d возможных значений дальности цели. На вход приемника поступает периодическая последовательность пачек импульсов. Задержка пачки относительно исходного слоя видимости отслеживается с помощью электронной схемы.

Комплексный закон модуляции сигнала, определяющийся сканированием слоями видимости, обозначим

$$\dot{G}_d \left(\frac{t - \tau_d}{T_n} \right), \quad (1)$$

где $\tau_d = r_d/V_d$ – время задержки пачки относительно начала сканирования слоями видимости по дальности; r_d – дальность до цели относительно исходного положения слоя видимости перед сканированием; $V_d = d/T_d$ – скорость сканирования по дальности; $d = c\tau_n/2$ – длительность элемента разрешения, обеспечиваемая импульсом передатчика; T_d – период

сканирования слоями видимости по дальности; T_n – длительность пачки сигналов, однозначно связанная с радиальной скоростью V_r и радиальным размером L_r лоцируемого объекта

$$T_n = \frac{d_0 + L_r}{V_d \mp V_r} = T_{n0} \frac{1 + \frac{L_r}{d_0}}{1 \mp \frac{V_r}{V_d}}, \quad (2)$$

где $d_0 = d\theta_0/\Phi$ – толщина слоя видимости; θ_0 – ширина диаграммы направленности по уровню 0,707; Φ – сектор сканирования; $T_{n0} = T_d \theta_0/\Phi$ – длительность пачки сигналов от точечной цели.

В рассматриваемом случае по аналогии с равенством $d/V_d = \Phi/\Omega$, будет выполняться равенство $r_d/V_d = \theta_{ц}/\Omega$, или $r_d/d = \theta_{ц}/\Phi$, т.е. дальность до цели r_d относительно исходного положения слоя видимости, отнесенная к расстоянию между слоями видимости d составляет такую же величину, как и угловая координата цели $\theta_{ц}$ относительно начала сектора сканирования, отнесенная к величине сектора сканирования Φ . Это значит, что дальность до цели r_d , а, следовательно, и временное запаздывание пачки импульсов относительно начала сканирования по дальности τ_d зависит от угловой координаты цели, т.е. $r_d = d\theta_{ц}/\Phi$, а $\tau_d = r_d/V_d = T_d \theta_{ц}/\Phi$.

Таким образом, при сканировании слоями видимости по дальности на входе приемной системы будет приниматься периодическая последовательность пачек, имеющих форму (1) и задержанных относительно начала сканирования на время, зависящее от угловой координаты цели $\tau_d = T_d \theta_{ц}/\Phi$.

Длительность пачек зависит от ряда факторов: отношения радиального размера цели к толщине слоя видимости L_r/d_0 , отношения радиальной скорости цели к скорости сканирования слоями видимости по дальности V_r/V_d и направления сканирования (вдогон или навстречу).

Для измерения угловой координаты цели необходимо осуществлять слежение за временным положением пачек с помощью электронной схемы. При этом факторы, приводящие к расширению пачек импульсов, будут уменьшать точность измерения угловой координаты, а приводящие к уменьшению длительности – повышать точность. К первым относится увеличение радиального размера цели и сканирование вдогон, а ко вторым – уменьшение радиального размера цели и сканирование навстречу. То есть измерение угловой координаты радиально протяженной цели при сканировании вдогон будет осуществляться с большими ошибками, чем точечной цели при сканировании слоями видимости навстречу. Это следует из выражения для длительности пачки (2).

Скорость сканирования по дальности, с одной стороны, не должна быть очень высокой, чтобы обеспечить требуемое время накопления t_n сигнала, а с другой, – она не может быть малой, чтобы не увеличить ошибки измерения координат за счет дискретности поступления информации.

Если частота сканирования $\omega_{ск}$ постоянна, то время накопления обеспечивается, если выполняется условие

$$\omega_{ск} \leq \frac{d_0}{t_n d}, \text{ т.е. } V_d \leq \frac{d_0}{t_n}. \quad (3)$$

При дискретном облучении цели в промежутках между облучением положение цели не контролируется. Если цель маневрирует с ускорением $a_{ц}$, ее дальность за период сканирования может измениться на величину

$$\Delta r = \frac{a_{ц} T_d^2}{2}.$$

Потребовав, чтобы это изменение не превысило допустимой ошибки измерения дальности $\delta r_{\text{доп}}$, можно найти минимальное значение частоты сканирования:

$$\omega_{\text{ск}} \geq \sqrt{\frac{a_{\text{ц}}}{2\delta r_{\text{доп}}}}, \text{ т.е. } V_d \geq \sqrt{\frac{d^2 a_{\text{ц}}}{2\delta r_{\text{доп}}}}. \quad (4)$$

Таким образом, скорость сканирования по дальности выбирается в диапазоне, определяемом соотношениями (3) и (4).

Постановка задачи синтеза

Модель наблюдения в одном периоде повторения сигнала T_r при измерении угловой координаты цели и ее дальности может быть записана в виде [5]:

$$y(t) = \sqrt{2P_{\text{ск}}} \operatorname{Re} \left\{ \dot{G}_d [V_d(t - \tau_d)] \dot{G}_p [\Omega(t - \tau_{\text{ц}} - \tau_3)] \dot{u}(t - \tau_{\text{ц}}) e^{j\omega_0 t} \right\} + n(t), \quad (5)$$

где $\dot{G}_p(\theta)$ – комплексный закон модуляции сигнала, определяющийся сканированием диаграммы направленности; $\tau_{\text{ц}} = 2r_{\text{ц}}/c$ и $\tau_3 = \theta_{\text{ц}}/\Omega$ – временные запаздывания сигналов, обусловленные дальностью и угловым положением цели.

Измеряемые координаты цели $\theta_{\text{ц}}$ и $r_{\text{ц}}$ в земной сферической системе координат полагаем случайными функциями времени с описанием в пространстве состояний системой стохастических дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\theta_{\text{ц}}(t)}{dt} = \theta'(t), \quad (6)$$

$$\frac{d\theta'(t)}{dt} = -\alpha_0 \theta'(t) + g_0 \xi_0(t), \quad \theta'(0) = \theta'_0, \quad (7)$$

$$\frac{dr_{\text{ц}}(t)}{dt} = v_{\text{ц}}(t), \quad (8)$$

$$\frac{dv_{\text{ц}}(t)}{dt} = g_v \xi_v(t), \quad v_{\text{ц}}(0) = v_{\text{ц}0}, \quad (9)$$

где θ' – угловая скорость цели; α_0 , $g_0 = \sqrt{\frac{2\alpha_0 \sigma_0^2}{N_{\xi_0}}}$, g_v – величина, характеризующая маневренные свойства цели; σ_0 – среднеквадратическое отклонение (СКО) случайного процесса $\theta'(t)$; N_{ξ_0} – односторонняя спектральная плотность $\xi_0(t)$; $\xi_0(t)$, $\xi_v(t)$ – компоненты векторного центрированного белого гауссовского шума с матрицей интенсивностей \mathbf{V} ; $v_{\text{ц}}$ – радиальная скорость цели.

Решение задачи синтеза

Для удобства дальнейшего изложения запишем модель наблюдения (6)–(9) и априорные уравнения (6)–(9) в векторной форме:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{s}(t, \boldsymbol{\lambda}) + \mathbf{n}(t),$$

$$\frac{d\boldsymbol{\lambda}(t)}{dt} = \mathbf{A}\boldsymbol{\lambda}(t) + \mathbf{G}\mathbf{v}(t),$$

где $\mathbf{s}(t, \boldsymbol{\lambda})$ – сигнал цели; $\boldsymbol{\lambda}(t)$ – вектор фильтруемых параметров. Белые шумы $\mathbf{n}(t)$ и $\mathbf{v}(t)$ считаются независимыми.

В случае гауссовой аппроксимации апостериорной плотности вероятности искомые уравнения фильтрации для принятой модели имеют вид [6, с. 493]

$$\frac{d\hat{\boldsymbol{\lambda}}(t)}{dt} = \mathbf{A}\hat{\boldsymbol{\lambda}}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{Z}(t), \quad (10)$$

$$\frac{d\mathbf{K}(t)}{dt} = \mathbf{G}\mathbf{V}\mathbf{G}^T + \mathbf{K}(t)\mathbf{A}^T + \mathbf{A}\mathbf{K}(t) + \mathbf{K}(t)\frac{d\mathbf{Z}(t)}{d\lambda^T}\mathbf{K}^T(t),$$

где $\mathbf{K}(t)$ – корреляционная матрица ошибок оценивания;

$$\mathbf{Z}(t) = \frac{ds^T(t, \hat{\lambda})}{d\lambda} \mathbf{N}^{-1} [\mathbf{y}(t) - \mathbf{s}(t, \hat{\lambda})] \quad (11)$$

– вектор сигналов ошибок оптимального многомерного дискриминатора.

Уравнение оценок (10) раскрывает структуру сглаживающего фильтра (СФ) измерителя, уравнение (11) – оптимального дискриминатора (рис. 1).

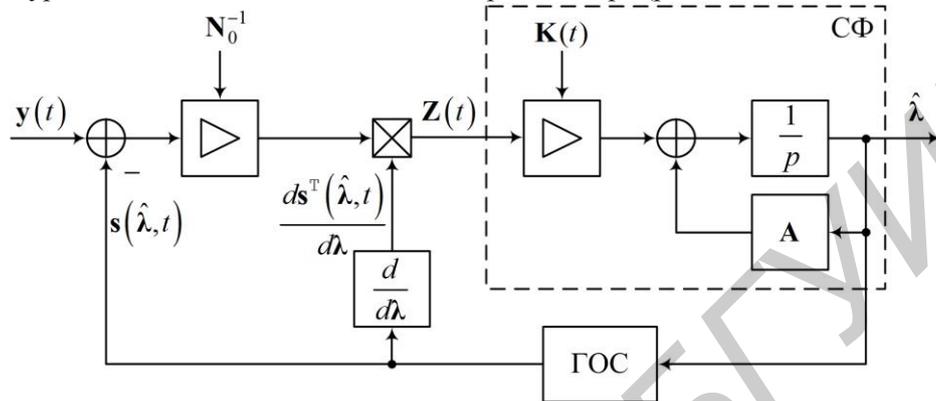


Рис. 1. Схема измерителя

Оптимальный комплексный измеритель угла места и дальности цели имеет структуру измерителя с перекрестными связями по выходам дискриминаторов и перекрестными связями по оценкам координат.

Анализ статистических эквивалентов

Потенциально достижимые характеристики системы измерения как при раздельном, так и при совместном измерении координат полностью зависят от статистических эквивалентов оптимальных дискриминаторов. В ряде случаев их нахождение имеет самостоятельный интерес. Для случая плоской задачи, поставленной выше, многомерный дискриминатор имеет два парциальных канала – угловой и дальномерный. Получим алгоритм функционирования применительно к модели наблюдения (5).

Операции, выполняемые оптимальными дискриминаторами исходя из (11), можно представить следующим образом:

$$Z_0(t) = -\frac{\sqrt{2P_{\text{ск}}}}{N_0} \text{Re} \left\{ \left(V_d \frac{d\hat{\tau}_d}{d\theta_u} \dot{G}'_d [V_d(t - \hat{\tau}_d)] \dot{G}'_p [\Omega(t - \hat{\tau}_u - \hat{\tau}_s)] + \right. \right. \quad (12)$$

$$\left. + \dot{G}'_d [V_d(t - \hat{\tau}_d)] \dot{G}'_p [\Omega(t - \hat{\tau}_u - \hat{\tau}_s)] \dot{u}(t - \hat{\tau}_u) e^{j\omega_0 t} \right\} y(t)$$

$$Z_r(t) = -\frac{\sqrt{2P_{\text{ск}}}}{N_0} \text{Re} \left\{ \dot{G}'_d [V_d(t - \hat{\tau}_d)] \frac{d\hat{\tau}_u}{dr_u} (\Omega \dot{G}'_p [\Omega(t - \hat{\tau}_u - \hat{\tau}_s)] \dot{u}(t - \hat{\tau}_u) e^{j\omega_0 t} + \right. \quad (13)$$

$$\left. + \dot{G}'_p [\Omega(t - \hat{\tau}_u - \hat{\tau}_s)] \dot{u}'(t - \hat{\tau}_u) e^{j\omega_0 t} \right\} y(t),$$

где штрих означает производную по аргументу.

Усредняя формулы (12) и (13) статистически, а имеющиеся периодические функции по периоду их повторения, получаем выражения для дискриминационных характеристик

$$\bar{Z}_0 = -\frac{P_{\text{ск}}}{N_0} \text{Re} \left\{ \left(V_d \frac{d\hat{\tau}_d}{d\theta_u} \dot{C}'_d (V_d \Delta\tau_d) \dot{C}'_p [\Omega(\Delta\tau_u + \Delta\tau_s)] + \dot{C}'_d (V_d \Delta\tau_d) \dot{C}'_p [\Omega(\Delta\tau_u + \Delta\tau_s)] \right) \dot{C}'_u (\Delta\tau_u) \right\}$$

$$\bar{Z}_r = -\frac{P_{\text{ск}}}{N_0} \frac{d\hat{\tau}_u}{dr_u} \text{Re} \left\{ \dot{C}'_d (V_d \Delta\tau_d) (\Omega \dot{C}'_p [\Omega(\Delta\tau_u + \Delta\tau_s)] \dot{C}'_u (\Delta\tau_u) + \dot{C}'_p [\Omega(\Delta\tau_u + \Delta\tau_s)] \dot{C}'_u (\Delta\tau_u)) \right\},$$

где $\dot{C}_d(V_d \Delta\tau_d)$, $\dot{C}_p[\Omega(\Delta\tau_u + \Delta\tau_s)]$ и $\dot{C}_u(\Delta\tau_u)$ – корреляционные функции закона модуляции сигнала, зависящие от ошибок измерения $\Delta\tau = \tau - \hat{\tau}$.

Эквивалентные статистические характеристики измерителя со сканированием слоями видимости представлены относительно характеристик измерителя в режиме СБС.

Матрица крутизн оптимального дискриминатора при нулевых рассогласованиях имеет вид:

$$\mathbf{K}_d = \begin{vmatrix} \frac{P_{\text{сбс}}}{P_{\text{сбс}}} \left(1 + V_d^2 \left(\frac{d\tau_d}{d\theta_u} \right)^2 \frac{\text{Re}\{\dot{C}_d''(0)\}}{\text{Re}\{\dot{C}_p''(0)\}} \right) \times K_{d.\theta\theta.\text{сбс}} & \frac{P_{\text{сбс}}}{P_{\text{сбс}}} \times K_{d.\theta r.\text{сбс}} \\ \frac{P_{\text{сбс}}}{P_{\text{сбс}}} \times K_{d.\theta r.\text{сбс}} & \frac{P_{\text{сбс}}}{P_{\text{сбс}}} \times K_{d.r r.\text{сбс}} \end{vmatrix}.$$

Анализ матрицы крутизн показывает, что на фоне уменьшения, относительно режима СБС ($K_{d.\text{сбс}}$), отношения сигнал/шум всех каналов происходит увеличение крутизны углового канала измерителя в $\left(1 + V_d^2 \left(\frac{d\tau_d}{d\theta_u} \right)^2 \frac{\text{Re}\{\dot{C}_d''(0)\}}{\text{Re}\{\dot{C}_p''(0)\}} \right)$ раз.

Матрица эквивалентных спектральных плотностей находится обращением матрицы крутизн $\mathbf{S}_{\text{экр}} = \mathbf{K}_d^{-1}$. Элементы матрицы эквивалентных спектральных плотностей шума имеют вид:

$$S_{\text{экр.}\theta\theta.\text{сбс}} = \frac{P_{\text{сбс}}}{P_{\text{сбс}}} \frac{1}{1 + V_d^2 \left(\frac{d\tau_d}{d\theta_u} \right)^2 \frac{\text{Re}\{\dot{C}_d''(0)\}}{\text{Re}\{\dot{C}_p''(0)\}} \left(1 + \Omega^2 \frac{\text{Re}\{\dot{C}_p''(0)\}}{\text{Re}\{\dot{C}_u''(0)\}} \right)} \times S_{\text{экр.}\theta\theta.\text{сбс}},$$

$$S_{\text{экр.}r r.\text{сбс}} = \frac{P_{\text{сбс}}}{P_{\text{сбс}}} \frac{1 + V_d^2 \left(\frac{d\tau_d}{d\theta_u} \right)^2 \frac{\text{Re}\{\dot{C}_d''(0)\}}{\text{Re}\{\dot{C}_p''(0)\}}}{1 + V_d^2 \left(\frac{d\tau_d}{d\theta_u} \right)^2 \frac{\text{Re}\{\dot{C}_d''(0)\}}{\text{Re}\{\dot{C}_p''(0)\}} \left(1 + \Omega^2 \frac{\text{Re}\{\dot{C}_p''(0)\}}{\text{Re}\{\dot{C}_u''(0)\}} \right)} \times S_{\text{экр.}r r.\text{сбс}},$$

$$S_{\text{экр.}\theta r.\text{сбс}} = \frac{P_{\text{сбс}}}{P_{\text{сбс}}} \frac{1}{1 + V_d^2 \left(\frac{d\tau_d}{d\theta_u} \right)^2 \frac{\text{Re}\{\dot{C}_d''(0)\}}{\text{Re}\{\dot{C}_p''(0)\}} \left(1 + \Omega^2 \frac{\text{Re}\{\dot{C}_p''(0)\}}{\text{Re}\{\dot{C}_u''(0)\}} \right)} \times S_{\text{экр.}\theta r.\text{сбс}}.$$

По сравнению с режимом СБС уменьшаются все элементы матрицы $\mathbf{S}_{\text{экр}}$. В дальномерном канале это уменьшение проявляется в меньшей степени.

Гауссовская аппроксимация корреляционных функций $\dot{C}_d(V_d \Delta\tau_d)$, $\dot{C}_p[\Omega(\Delta\tau_u + \Delta\tau_s)]$ и $\dot{C}_u(\Delta\tau_u)$ позволяет наглядным образом представить результаты анализа режимов работы измерителя. При следящем приеме в установившемся режиме слежения взаимного влияния каналов нет, оно имеет место лишь в переходном режиме. При переходе в режим медленного сканирования (МСК) эквивалентные спектральные плотности углового и дальномерного каналов возрастают пропорционально отношению Φ/θ_0 , ввиду уменьшения отношения сигнал-шум при сопровождении цели по пачкам импульсов.

Режим СБС при раздельном измерении позволяет уменьшить $S_{\text{экр}}$ в канале дальности в $(1 + \Phi^2/\theta_0^2)$ раз, не изменяя $S_{\text{экр}}$ в угловом канале. При СБС и совместном измерении угловой координаты и дальности происходит резкий рост в $(1 + \Phi^2/\theta_0^2)$ раз эквивалентной спектральной плотности флуктуаций в угловом канале.

Сканирование слоями видимости по дальности в режиме СБС (МСП) позволяет уменьшить эквивалентную спектральную плотность угломерного канала в $(\Phi/\theta_0 + 2\theta_0/\Phi)$ раз

и одновременно уменьшить эквивалентную спектральную плотность дальномерного канала в $(\Phi/2\theta_0 + \theta_0/\Phi)$ раз. В обоих случаях выигрыш растет с ростом отношения Φ/θ_0 , уменьшая дисперсии флуктуационных ошибок.

Моделирование

Исследование проводилось путем моделирования алгоритма оптимальной нелинейной фильтрации (10) на примере оценивания параметров движения цели со случайным некоррелированным радиальным ускорением и экспоненциально-коррелированной угловой скоростью. На рис. 2 апостериорные значения среднеквадратических ошибок оценивания представлены сплошными ($\Phi=5$) и пунктирными ($\Phi=10$) линиями для трех режимов работы измерителя: 1 – медленное сканирование, 2 – СБС, 3 – СБС (МСП).

Моделирование проводилось при следующих начальных условиях: $P_{\text{ск}}/N_0 = 2000 \text{ с}^{-1}$, $\theta_0 = 1$ град., $d = 150 \text{ м}$, $\alpha_0 = 0,1 \text{ с}^{-1}$, $\sigma_0 = 2,2 \text{ град/с}$, $g_v = 1 \text{ с}^{-1}$, спектральные плотности мощности формирующих шумов радиальной и угловой скорости равны соответственно $N_{\xi_v} = 100 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ и $N_{\xi_\theta} = 1 \text{ град}^2\text{с}^{-1}$.

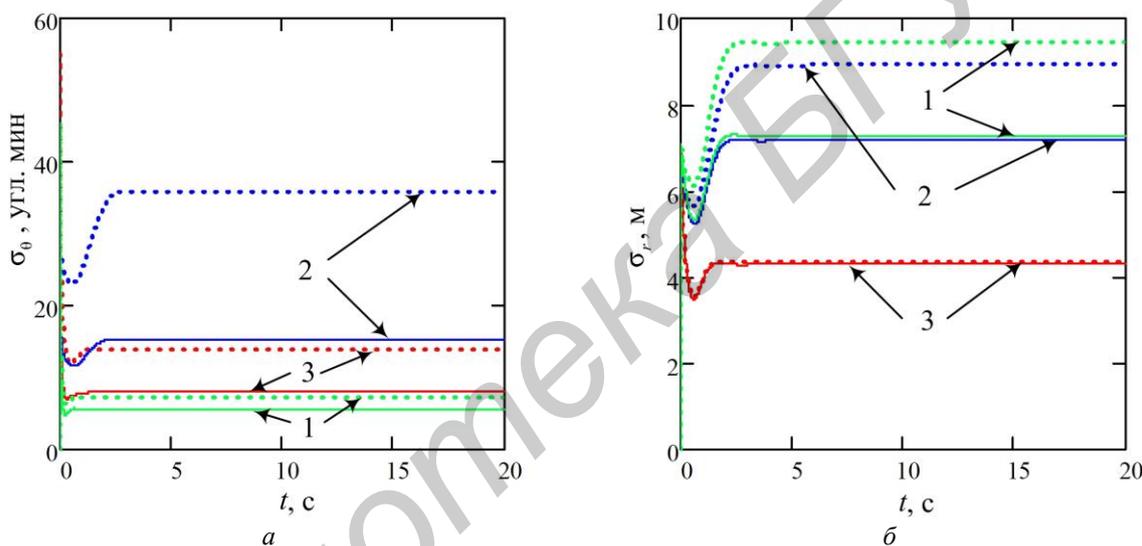


Рис. 2. Апостериорные СКО угломерного (а) и дальномерного (б) каналов

Главные диагонали горизонтальных $C = \text{const}$ сечений тел рассогласования сигналов (рис. 3) позволяют судить об амплитуде движения рабочей точки по двумерной дискриминационной характеристике.

В предлагаемом режиме работы значения эллипса рассогласования теснее группируются около большой оси и разброс в направлении малой оси менее значим.

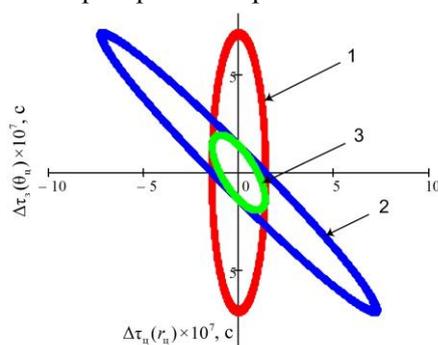


Рис. 3. Сечения тел рассогласования ($C = 0,5, \Phi = 5$)

Анализ результатов статистического моделирования показывает, что при переходе от медленного к сверхбыстрому сканированию (МСП) среднеквадратическая ошибка оценивания дальности уменьшается на 41 % ($\Phi=5$).

Заклучение

В системах со сверхбыстрым сканированием луча принимаемый сигнал становится модулированным по амплитуде с законом модуляции, зависящим как от углового положения, так и от дальности до цели. Применяя метод сопровождения по пачкам, сигнал дополнительно модулируется законом, зависящим от направления на цель, т.е. становится более информативным, что приводит к увеличению точности измерения угловой координаты.

SYNTHESIS OF ANGLE AND RANGE MEASURER IN TRACK-WHILE-SCAN SUPER-FAST BEAM SCANNING SYSTEMS

S.V. ANIKEEV, V.A. KURENJOV

Abstract

The method of angle measurement in super-fast scanning (SFS) systems is presented. The SFS range cells scanning allows to get the angle information from envelop of received pulses dwell time. Complex information processing of SFS and range cell scanning in synthesized two dimensional measurer is employed.

Keywords: synthesis of coordinates measurer, super-fast beams scanning, method of tracking through packs.

Список литературы

1. *Davies D.E.N.* // Radar systems with electronic sector scanning. J. Br. Inst. Radio Eng. 1959. Vol. 18. P. 709–713.
2. *Гинзбург В.М.* Формирование и обработка изображений в реальном масштабе времени. Методы быстрого сканирования. М., 1986.
3. *Lai K.H., Longstaff I.D., Callaghan G.D.* // IEE Proc.-Radar Sonar Navig. 2004. № 5. Vol. 151. P. 271–279.
4. *Чапурский В.В.* Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем. М., 2012.
5. *Аникеев С.В., Куренёв В.А.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2015. №1. С. 112–117.
6. *Тихонов В.И. Харисов В.Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М., 2014.

УДК 681.396.96

СНИЖЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ СРЫВА СОПРОВОЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИ НАБЛЮДАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ В КОРРЕЛЯЦИОННЫХ АЛГОРИТМАХ СОПРОВОЖДЕНИЯ ЗА СЧЕТ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИСХОДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИК- И ТВ-ДИАПАЗОНОВ

Д.С. ШАРАК, А.В. ХИЖНЯК, А.В. ШЕВЯКОВ, Е.И. МИХНЕНОК

Военная академия Республики Беларусь
Минск, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 25 января 2016

Описана типовая корреляционная система автоматического сопровождения оптически наблюдаемых объектов. Предложен и обоснован способ снижения вероятности срыва сопровождения, основанного на комплексировании исходных изображений ИК и ТВ диапазона. Приведены результаты экспериментов, подтверждающих эффективность предлагаемого решения.

Ключевые слова: алгоритмы сопровождения, взаимные корреляционные функции изображений, срыв сопровождения, эталонные изображения.

Введение

На сегодняшний день разработано множество вариантов автоматического сопровождения оптически наблюдаемых объектов. Большинство из этих алгоритмов показывают высокую точность и устойчивость только в определенном ограниченном диапазоне условий применения (ограниченный диапазон размеров объектов, достаточно высокое значение требуемого контраста объекта, наличие цветового признака, отсутствия действий маскировки, ограниченный набор допустимых типов объектов и др.). В критически важных ситуациях, таких как военное применение, накладываемые ограничения могут свести на нет эффективность применения технических систем. В частности, для военного применения необходимы алгоритмы адаптирующиеся (или нечувствительные) к размерам объектов (в пределах вычислительных возможностей), не делающих различия в типах сопровождаемых объектов и обеспечивающих возможность работы с различными типами источников видеoinформации. В этих условиях в военной области наиболее популярными остаются корреляционные алгоритмы автоматического сопровождения, эффективность которых не зависит от типов и формы сопровождаемых объектов, особенно в условиях применения средств маскировки [1–3]. В статье предлагается способ снижения вероятности срыва сопровождения оптически наблюдаемых объектов, основанный на комплексировании исходных изображений ИК- и ТВ-диапазонов в процессе расчета взаимной корреляционной функции фрагментов текущего и эталонного изображений.

Типовой корреляционный алгоритм сопровождения

Принцип работы типовой корреляционной системы сопровождения основан на сравнении фрагментов изображения наблюдаемого пространства с некоторым эталонным изображением (ЭИ), полученным заранее, и последующим выбором фрагмента текущего изображения, наиболее соответствующего (на основании выбранной метрики) эталонному. На рис. 1 представлена структура типовой корреляционной системы сопровождения [3].

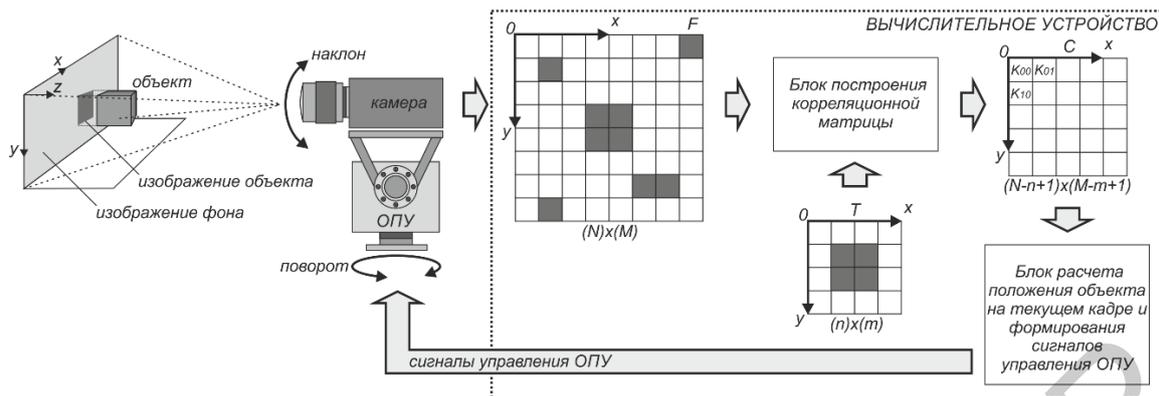


Рис. 1. Структура типовой корреляционной системы сопровождения

Камера формирует текущие изображения (F) наблюдаемого пространства и передает их в вычислительное устройство. Блок построения корреляционной матрицы для каждого возможного положения сопровождаемого объекта рассчитывает значение некоторой корреляционной функции с ЭИ (T). Эталонное изображение формируется в момент захвата объекта на сопровождение путем копирования участка текущего изображения, ограниченного стробом захвата в память. Рассчитанное значение корреляционной функции записывается в однозначно соответствующую анализируемому участку ТИ позицию корреляционной матрицы (C). После того, как корреляционная матрица сформирована, осуществляется поиск элемента с наибольшим значением. Позиция данного элемента в корреляционной матрице будет указывать на наиболее вероятное положение изображения объекта на ТИ. После определения наиболее вероятного положения сопровождаемого объекта производится расчет рассогласования (разницы между предыдущим и текущим положением сопровождаемого объекта), на основании которого формируются управляющие воздействия для опорно-поворотного устройства (ОПУ).

В качестве корреляционной функции наиболее универсальной является нормированная взаимная корреляционная функция (1) ввиду малой чувствительности к различиям в общей яркости сравниваемых изображений и строго определенному диапазону возможных значений: от -1 до 1 . При этом значение 1 означает полное совпадение изображений, а значение -1 означает, что изображения противофазно (значения всех соответствующих пикселей лежат по разные стороны от их средних значений).

$$K = \frac{M \{ [f(x) - M(f)] [t(x) - M(t)] \}}{\sigma(f)\sigma(t)}, \quad (1)$$

где x – вектор координат элемента изображения, f – фрагмент текущего изображения, t – эталонное изображение, M – символ математического ожидания, $M(f)$, $M(t)$ – математическое ожидание значений яркости пикселей фрагмента текущего и эталонного изображений соответственно, $\sigma(f)$, $\sigma(t)$ – среднеквадратическое отклонение значений яркости пикселей фрагмента текущего и эталонного изображений соответственно.

Применительно к цифровым изображениям и учитывая отсутствие априорной информации о параметрах распределения значений яркости пикселей изображений, выражение для нормированной корреляционной функции можно записать в следующем виде:

$$K = \frac{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m (f(x, y) - M(f))(t(x, y) - M(t))}{\sqrt{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m (f(x, y) - M(f))^2} \sqrt{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m (t(x, y) - M(t))^2}}, \quad (2)$$

где n , m – количество пикселей изображений по вертикали и горизонтали соответственно (размеры изображения), x , y – горизонтальная и вертикальная координаты пикселя изображения соответственно, $f(x, y)$, $t(x, y)$ – значение яркости пикселя изображений в указанных координатах (x , y).

Способ снижения вероятности срыва сопровождения оптически наблюдаемых объектов, основанный на комплексировании исходных изображений ИК- и ТВ-диапазонов

Для доказательства снижения вероятности срыва сопровождения в корреляционном алгоритме при комплексировании исходных ИК- и ТВ-изображений примем следующие начальные условия. Предположим, что значение пиксела яркости является случайной величиной, распределенной нормально со среднеквадратическим отклонением равным 30 и математическим ожиданием равным 128 при допустимом диапазоне значений от 0 до 255. Справедливость данного предположения можно пояснить следующим образом. В данном случае не рассматриваются процессы формирования изображения со своими характеристиками шума. Предполагается, что значение пиксела точно отражает свойства наблюдаемого камерой пространства и не содержит аддитивного шума, обусловленного внутренними процессами компонентов камеры, формирующей изображение. Так как в данной ситуации не рассматриваются процессы формирования изображения, то применительно к плотности распределения значений яркости пиксела изображения необходимо рассматривать плотность распределения лучистой энергии, исходящей от наблюдаемого пространства и улавливаемой ячейкой фоточувствительной матрицы камеры. Рассматривая распределение лучистой энергии в конкретной точке пространства, а именно ячейке матрицы камеры, нельзя с уверенностью утверждать о каком-либо законе распределения, так как он будет зависеть от наблюдаемого камерой пространства. Утверждать какой-либо определенный закон распределения лучистой энергии в конкретной точке пространства равносильно утверждению, что элементы изображения наблюдаемого пространства, как и само пространство (область пространства в пределах разрешения элемента изображения), распределены по этому закону, что в свою очередь является неверным обобщением ввиду бесконечности вариантов расположения предметов, освещения и т.д. В то же время, для представления аналитического доказательства необходимо совершенно конкретно определить начальные условия для ясности доказательства. В рассматриваемой ситуации справедливым будет выбор любого удобного распределения вероятностей яркости пикселей изображения, что эквивалентно частному случаю наблюдаемого пространства. На основании вышеизложенного в качестве закона распределения яркости пикселей выбран нормальный закон распределения, как наиболее удобный для аналитических расчетов.

Для аналитического доказательства эффективности предлагаемого метода комплексирования исходных изображений рассмотрим следующую ситуацию. Пусть имеется некоторое эталонное изображение T , полученное заранее, и содержащее изображение объекта на некотором фоне. Также пусть имеется некоторая область поиска W – изображение в котором будет производиться поиск фрагмента, наиболее соответствующего эталонному изображению. В области поиска выберем два непересекающихся фрагмента I и F , один из которых содержит искомый объект на некотором фоне, как показано на рис. 2 (серым цветом помечены пиксели, относящиеся к объекту, а белые – к фону).

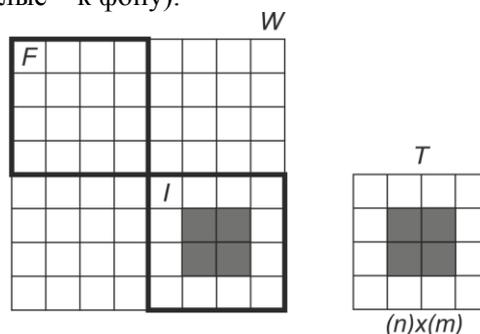


Рис. 2. Фрагменты изображений, содержащие искомый объект на некотором фоне

Фрагменты I и F имеют размеры равные размерам эталонного изображения. Предположим, что все пиксели фона независимы и имеют случайное значение, распределенное нормально. Будем вычислять значение коэффициента корреляции фрагментов I и F с эталонным изображением T . При этом фрагмент I содержит искомый объект, а фрагмент F нет. Исходя из описанного выше принципа работы корреляционного алгоритма сопровождения

оптически наблюдаемых объектов, срыв сопровождения произойдет, если коэффициент корреляции между фрагментом F и эталонным изображением T окажется больше либо равным коэффициенту корреляции между фрагментом I и эталонным изображением. Необходимо найти для случая использования комплексирования и без него вероятность срыва сопровождения – вероятность того, что значение коэффициента корреляции эталонного изображения с фрагментом без объекта окажется выше значения коэффициента корреляции с фрагментом, содержащим объект. Введем следующие обозначения: K_1 – коэффициент корреляции между фрагментом F и эталонным изображением T , K_2 – коэффициент корреляции между фрагментом I и эталонным изображением T . Поскольку мы принимаем, что пиксели фона являются независимыми случайными величинами, то в таком случае коэффициенты корреляции являются функциями множества случайных величин. Найдем отношение коэффициентов корреляции:

$$P = \frac{K_1}{K_2}. \quad (3)$$

В данном случае срывом сопровождения является ситуация, когда значение K_1 будет больше или равным K_2 , то для ситуации срыва сопровождения соответствующее значение $P \geq 1$. Следовательно, для того, чтобы сравнить вероятность срыва сопровождения при использовании комплексирования и без него, необходимо найти вероятность того, что P превысит значение 1. Для этого необходимо найти плотность распределения случайной величины P .

Для вывода аналитического выражения для плотности распределения случайной величины P примем ряд допущений. Ввиду того, что нам неважны форма и тип объекта сопровождения, как и характер эталонного изображения, то для удобства записи выражений примем следующее. Пусть эталонное изображение является реализацией N -мерного случайного процесса ($N = n \cdot m$), каждый пиксел которого независим и распределен нормально. Пусть половина пикселей эталонного изображения относится к объекту, а остальные – к фону. Пусть пиксели эталонного изображения имеют такое значение, что оценка среднеквадратического отклонения яркости независимых пикселей равна принятому для доказательства среднеквадратическому отклонению яркости пикселей (30), а среднее значение равно среднему значению яркости пикселей, принятому для доказательства (128). Пусть для фрагмента I соответствующие объекту пиксели имеют значение равное соответствующим пикселям эталонного изображения, а значение остальных пикселей является случайным, как показано на рис. 3.

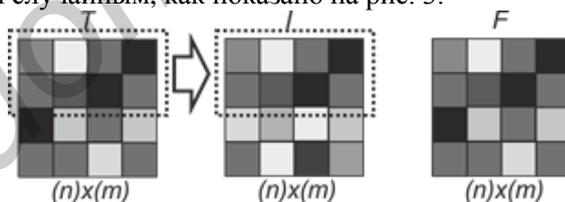


Рис. 3. Вариант распределения яркости пикселей для эталонного изображения

Принимая во внимание сделанные предположения и переходя от математического ожидания к его оценке [5, 6] – среднему значению яркости пикселей изображения, выражение (1) для изображения F и эталонного изображения T примет следующий вид:

$$K_1 = \frac{\sum_{x=1}^N \{ (f(x) - M_f)(t(x) - M_t) \}}{N \sigma_f \sigma_t}, \quad (4)$$

где x – индекс положения пиксела в одномерном массиве изображений; $f(x)$ – одномерный массив изображения со всеми случайными элементами; $t(x)$ – одномерный массив эталонного изображения.

Для изображения I и эталонного изображения T с учетом сделанных допущений выражение (4) примет следующий вид:

$$K_2 = \frac{\sum_{x=0}^{N_0} (t(x) - M)^2 + \sum_{x=N_0+1}^N \{(I(x) - M_I)(t(x) - M_I)\}}{N\sigma_f\sigma_t}, \quad (5)$$

где $I(x)$ – одномерный массив изображения с $N - N_0$ случайными пикселями.

Таким образом, мы имеем эталонное изображение T , N_0 пикселей которого относится к объекту, а остальные к фону. Также мы имеем изображение I , где пиксели, относящиеся к объекту, идентичны соответствующим пикселям эталонного изображения, а остальные $N - N_0$ пикселей имеют значения, изменяющиеся по случайному закону. Кроме этого, мы имеем изображение F , где все пиксели имеют случайные значения. Таким образом, мы моделируем ситуацию, когда имеется заранее сформированное эталонное изображение с элементами фона, имеется объект от кадра к кадру, располагающийся на различной фоновой обстановке (Изображение I) и имеем изображение, где находятся только элементы фона.

Для определения вероятности срыва сопровождения необходимо найти плотность распределения случайной величины P . Как видно из выражений (4) и (5), коэффициенты корреляции являются линейными комбинациями независимых нормально распределенных случайных величин (согласно начальным условиям). Следовательно, коэффициенты корреляции также будут распределены нормально [5] со следующими математическими ожиданиями и среднеквадратическими отклонениями:

$$\sigma_{K_1} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left\{ \left(\frac{(t(x) - M_t)}{N\sigma_f\sigma_t} \right)^2 \sigma_f^2 \right\}}; \quad (6)$$

$$\sigma_{K_2} = \sqrt{\sum_{i=N_0+1}^N \left\{ \left(\frac{(t(x) - M_t)}{N\sigma_I\sigma_t} \right)^2 \sigma_I^2 \right\}}; \quad (7)$$

$$M_{K_2} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{(t(x) - M_t)^2}{N\sigma_I\sigma_t}. \quad (8)$$

Математическое ожидание коэффициента корреляции K_1 равно нулю ($M_{K_1} = 0$). Для нахождения плотности распределения P необходимо найти плотность распределения системы случайных величин (K_1, K_2) [5, 6]. Ввиду того, что случайные величины независимы, плотность распределения системы случайных величин будет равна произведению их плотностей распределения [5, 6]:

$$f(K_1, K_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_{K_1}\sigma_{K_2}} e^{-\left[\frac{K_1^2}{2\sigma_{K_1}^2} + \frac{(K_2 - M_{K_2})^2}{2\sigma_{K_2}^2} \right]}. \quad (9)$$

Соответственно плотность распределения частного случайных величин K_1 и K_2 будет иметь следующий вид [6]:

$$f(P) = \int_{-\infty}^0 [K_2 f(PK_2, K_2)] dK_2 + \int_0^{+\infty} [K_2 f(PK_2, K_2)] dK_2, \quad (10)$$

где $f(PK_2, K_2)$ – плотность распределения системы случайных величин (K_1, K_2) (9) с эквивалентной подстановкой $K_1 = PK_2$, согласно выражению (3).

Соответственно вероятность срыва сопровождения в данном случае будет рассчитывается согласно выражению [6]:

$$p(P \geq 1) = \int_1^{\infty} f(P) dP. \quad (11)$$

Примем следующие начальные условия для проведения расчетов: $\sigma_f = \sigma_I = \sigma_r = 30$, $M_f = M_I = M_r = 128$ (возможные значения яркости пикселей от 0 до 255), $N = 16$, $N_o = 8$, $t(x) = \{-30, 30, -30, 30, -30, 30, -30, 30, -30, 30, -30, 30, -30, 30, -30, 30\}$. Значения элементов эталонного изображения $t(x)$ выбраны так, чтобы оценка среднеквадратического отклонения соответствовала начальным условиям $\sigma_f = \sigma_r = 30$. График плотности распределения случайной величины P имеет вид, как показано на рис. 4.

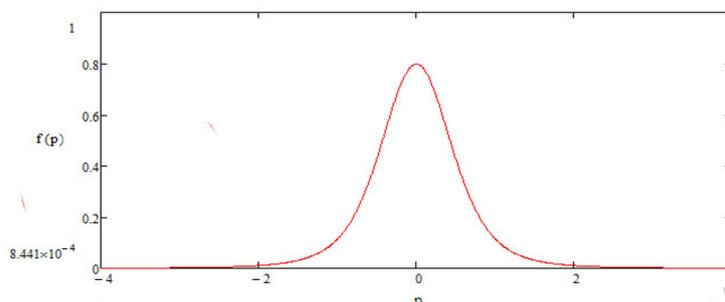


Рис. 4. Плотность распределения случайной величины P

Для различных значений СКО комплексированного изображения рассчитывалась вероятность срыва сопровождения оптически наблюдаемых объектов. При данных начальных условиях график зависимости вероятности срыва сопровождения от значения СКО комплексированного изображения представлен на рис. 5.

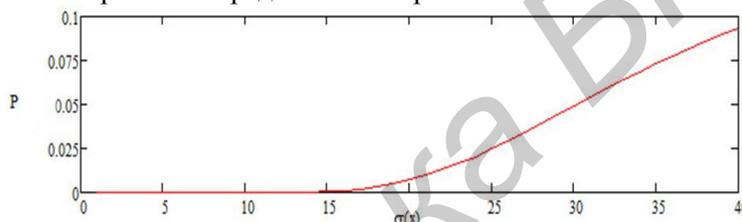


Рис. 5. Зависимость вероятности срыва сопровождения от значения СКО комплексированного изображения

Как видно из графика, при уменьшении значения СКО комплексированного изображения вероятность срыва снижается. Для значения СКО исходных изображений ($\sigma_f = \sigma_r = 30$) вероятность срыва составляет 5%. При уменьшении значения СКО комплексированного изображения ($\sigma_k = 15$) вероятность срыва стремится к нулю. Приведенные выше результаты аналитических исследований доказывают принципиальную эффективность предложенного метода.

Для подтверждения аналитических расчетов был проведен эксперимент с использованием предложенной корреляционной функции (5). Схема эксперимента аналогична схеме аналитического доказательства. При каждом отдельном опыте изображение F и I представляли собой реализацию многомерного нормального процесса. Требуемое количество экспериментов равнялось 316179 исходя из доверительной вероятности $Q = 0,99$ и доверительного интервала $\beta = 0,001$ для определения частоты срыва сопровождения. Результаты эксперимента отличаются от аналитических расчетов не более чем на 0,001, что говорит о верности предположений и справедливости допущений. Используя метод математической индукции полученные закономерности можно распространить и на изображения большего размера.

Заключение

Предложен способ снижения вероятности срыва сопровождения оптически наблюдаемых объектов, основанный на комплексировании исходных изображений ИК и ТВ диапазона при расчете корреляционной функции изображений. Показано, что возможно значительно уменьшить вероятность срыва сопровождения (до 5 раз). При этом предлагаемый способ повышения эффективности корреляционных алгоритмов сопровождения оптически наблюдаемых объектов может быть комбинирован с уже известными способами повышения

эффективности, такими как предварительная обработка изображений, сложные алгоритмы анализа и изменения эталонного изображения в процессе сопровождения, обработка корреляционной матрицы и анализ траекторной информации без необходимости их адаптации. Таким образом, применение предлагаемого способа является перспективным и не требует значительных дополнительных вычислительных ресурсов.

LOWERING OF FAILURE PROBABILITY OF OPTICALLY OBSERVABLE OBJECTS IN CORRELATION TRACKING ALGORITHMS BASED ON THE INTEGRATION OF THE INITIAL IMAGES OF IR AND TV RANGES

D.S. SHARAK, A.V. KHIZHNIAK, A.V. SHEVYAKOV, E.I. MIKHNIIONOK

Abstract

The typical automatic tracking correlation system of optical observable objects is described. The method of tracking failure probability lowering based on the integration of the initial images of IR and TV ranges is offered and proved. Results of the experiments confirming efficiency of the offered decision are resulted.

Keywords: tracking algorithms, correlation functions of images, tracking failure, reference images.

Список литературы

1. *Баклицкий В.К.* Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения. Тверь, 2009.
2. *Wong S.* // The Proceedings of SPIE: Acquisition, Tracking and Pointing. 2005. Vol. 19.
3. *Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е. и др.* Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М., 2008.
4. *Садыхов Р.Х., Дудкин А.А.* // Штучный интеллект. 2006. № 3. С. 643–644.
5. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М., 2000.
6. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М., 1969.

УДК 681.518

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ СИЛ ИНЕРЦИИ

А.В. ПАШУК, М.К. ХАДЖИНОВ, О.А. ШВЕДОВА

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

Поступила в редакцию 4 ноября 2015

Приведены результаты моделирования влияния сил инерции на поведение тележки и груза грузоподъемного механизма поворотного типа, разработки и исследования способов компенсации данных сил в разомкнутых системах управления. Проведено моделирование эффективности алгоритмов управления с формирующими фильтрами в системах с компенсацией сил инерции.

Ключевые слова: грузоподъемные механизмы, подавление колебаний, компенсация сил инерции.

Введение

В настоящее время при исследовании способов эффективного управления грузоподъемными механизмами особого внимания заслуживают вопросы, связанные с подавлением колебаний, возникающих при одновременном перемещении тележки и повороте стрелы грузоподъемного механизма поворотного типа. При выполнении операций по перемещению полезного груза возникают колебания, амплитуда которых может превышать заданный предел, они должны быть подавлены, иначе операция должна быть остановлена, это приводит к ухудшению быстродействия системы. Проблемы, связанные с подавлением колебаний, привели к появлению множества алгоритмов управления, позволяющих автоматизировать операции грузоподъемного механизма. Однако большинство из них не являются подходящими для практического применения, поэтому большое количество промышленных грузоподъемных механизмов не автоматизированы и все еще зависит от действий человека. При этом обеспечить должную компенсацию колебаний в состоянии только высококвалифицированный крановщик.

Глобальной целью исследования является изучение способов эффективного подавления колебаний, обеспечивающих оптимальное по быстродействию управление грузоподъемными механизмами поворотного типа.

Теоретический анализ

Анализируя работу грузоподъемных механизмов по перемещению полезного груза, можно выделить следующие виды движения исполнительных элементов, которые могут способствовать возникновению колебаний груза:

- поступательное изменение длины подвеса при подъеме груза;
- поступательное движение тележки по мосту или стреле грузоподъемного механизма;
- поступательное движение моста грузоподъемного механизма;
- вращательное движение стрелы грузоподъемного механизма;
- смешанное или одновременное движение, когда присутствуют несколько видов движения.

Поступательное движение можно считать самым простым для моделирования поведения системы случаем перемещения груза. Этот вид движения присущ порталным, мостовым или козловым кранам. В качестве смешанного движения нескольких поступательных можно выделить одновременное движение моста и тележки крана, когда перемещение тележки в продольном направлении и перемещение моста в поперечном направлении происходят одновременно. При определенных допущениях, такое движение при моделировании можно рассматривать как два независимых поступательных движения [1].

Считая изменения длины подвеса и угол отклонения малыми, можно получить линейную модель системы, которую затем использовать при разработке или проверке различных методов управления. Существует множество различных алгоритмов подавления колебаний, возникающих при поступательном движении, начиная с методов, основанных на определении периода колебаний, и заканчивая управлением с использованием интеллектуальных моделей [2].

Вращательное движение и поступательное, смешанное с ним, являются более сложными для анализа и моделирования. Система уравнений, описывающая процессы в системе, приобретает значительную нелинейность, что усложняет разработку эффективных алгоритмов управления грузоподъемными механизмами поворотного типа. Эти виды движения присущи стреловым и башенным кранам.

Методика эксперимента

Для анализа и моделирования вращательного движения используется схематическая модель грузоподъемного механизма поворотного типа [3], которая представлена на рис. 1.

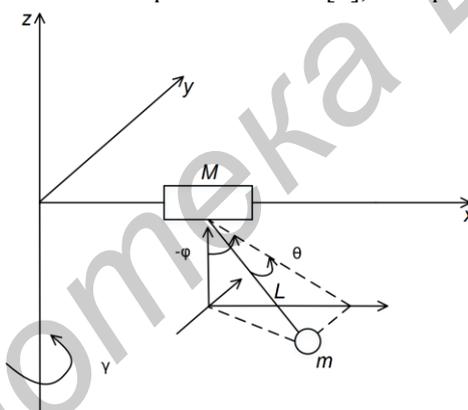


Рис. 1. Модель грузоподъемного механизма поворотного типа с указанием действующих сил

Полная система уравнений, описывающая такую модель, является громоздкой и нелинейной и, как следствие, непригодна для синтеза системы управления. Однако при небольших величинах углов отклонения и незначительном изменении длины подвеса уравнения можно упростить [1]. При указанных допущениях система уравнений, описывающая грузоподъемный механизм, приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} M \cdot \ddot{x} + m \cdot g \cdot \varphi = F_x \\ L \cdot \ddot{\varphi} + g \cdot \varphi - \ddot{x} + L \cdot \ddot{\gamma} \cdot \theta = 0 \\ (J_0 + M \cdot x^2) \cdot \ddot{\gamma} - m \cdot g \cdot x \cdot \theta = T_\gamma \\ L \cdot \ddot{\theta} + g \cdot \theta + x \cdot \ddot{\gamma} - L \cdot \ddot{\gamma} \cdot \varphi = 0 \end{cases}$$

Используя упрощенную систему уравнений, можно получить линеаризованную модель объекта, представленную на рис. 2, где приняты следующие обозначения: v_{tel} – задание скорости тележки вдоль стрелы, v_{bashni} – задание скорости поворота стрелы, R_{tel} – расстояние от башни до тележки, V_{tel} – скорость тележки вдоль стрелы, dx_{gruz} – отклонение груза по оси x , dy_{gruz} – отклонение груза по оси y , V_{bashni} – угловая скорость стрелы.

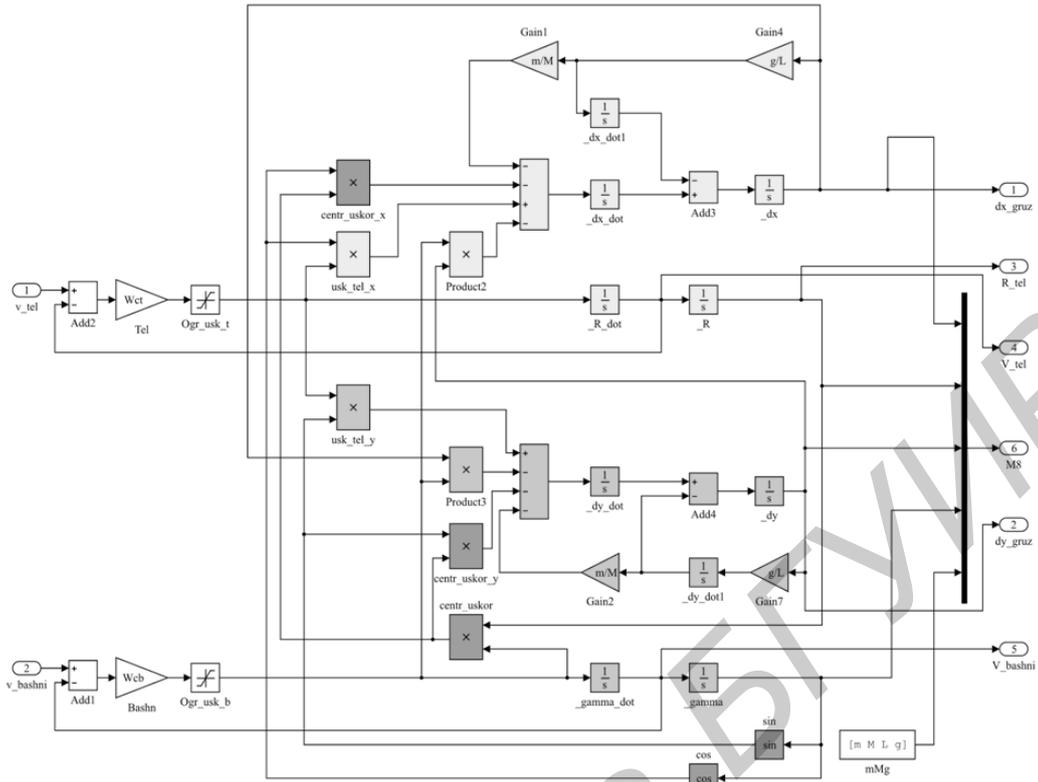


Рис. 2. Модель грузоподъемного механизма поворотного типа в программе Matlab Simulink

Для оценки влияния сил инерции на качество управления грузоподъемным механизмом поворотного типа с подавлением колебаний была рассмотрена модель системы управления с формирующими фильтрами (input shaping filters) [1, 4], изображенной на рис. 3.

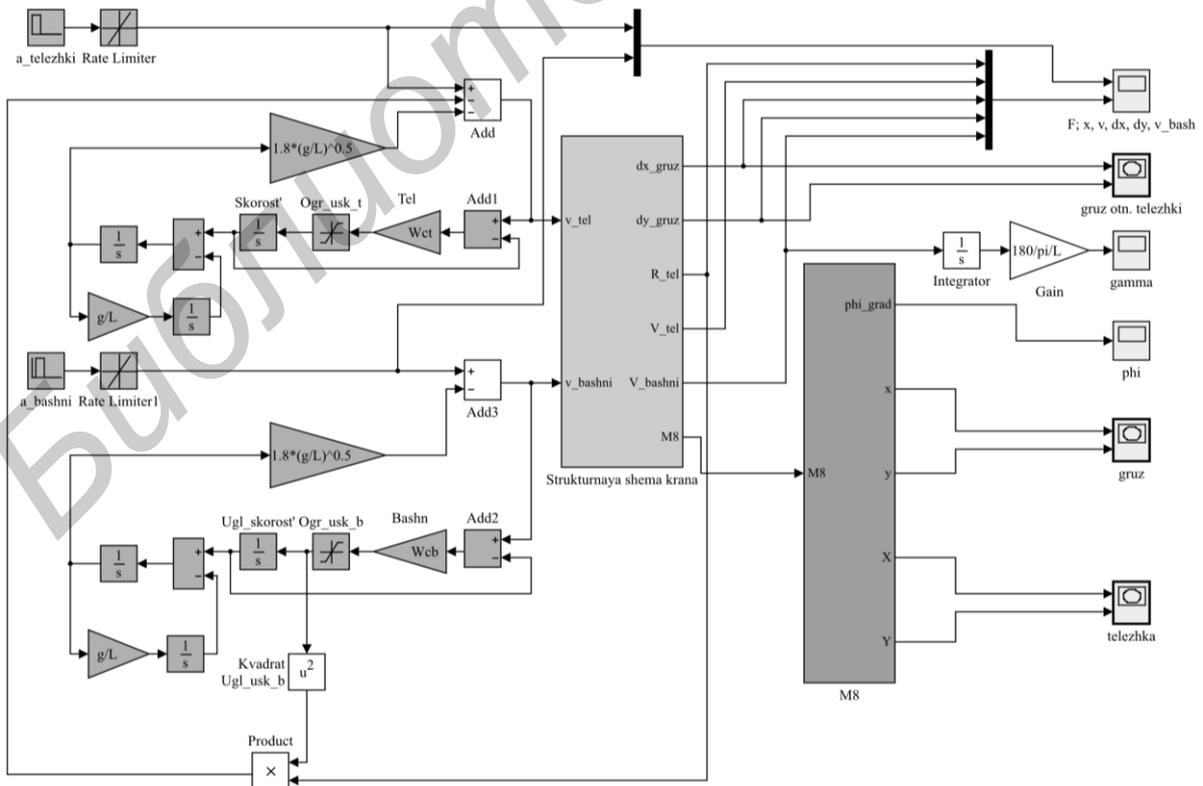


Рис. 3. Модель системы управления с шейпинг-фильтрами в программе Matlab Simulink

Стоит отметить, что для упрощения расчетов из модели удалены взаимосвязи, характеризующие влияние отклонения груза и скорости башни на тележку и влияние всех элементов крана на башню. Предполагается, что электроприводы тележки и башни реализованы таким образом, что они способны поддерживать заданные ускорения (скорости) даже в условия сильных возмущений.

Данная модель уже использовалась для исследования эффективности управления грузоподъемными механизмами с помощью формирующих фильтров [1, 4]. Однако быстрое развитие промышленности и постоянная необходимость в ускорении процессов приводят к вынужденному увеличению производительности промышленной техники. В случае с подъемными кранами — это увеличение скоростей при перемещении грузов. Таким образом, можно предположить, что полученная система управления нуждается в пересмотре, т.к. увеличение скоростей ведет к увеличению сил инерции, действующих на груз.

Экспериментальная часть

С помощью рабочей модели грузоподъемного механизма поворотного типа было проведено моделирование и получены необходимые значения ускорений, порождающих силы инерции: центробежного ускорения и ускорения Кориолиса. На рис. 4 приведены графики изменения ускорений при ускорении тележки $at = 1 \text{ м/с}^2$ и ускорении башни $ab = 0,05 \text{ рад/с}$, длина подвеса 10 м.

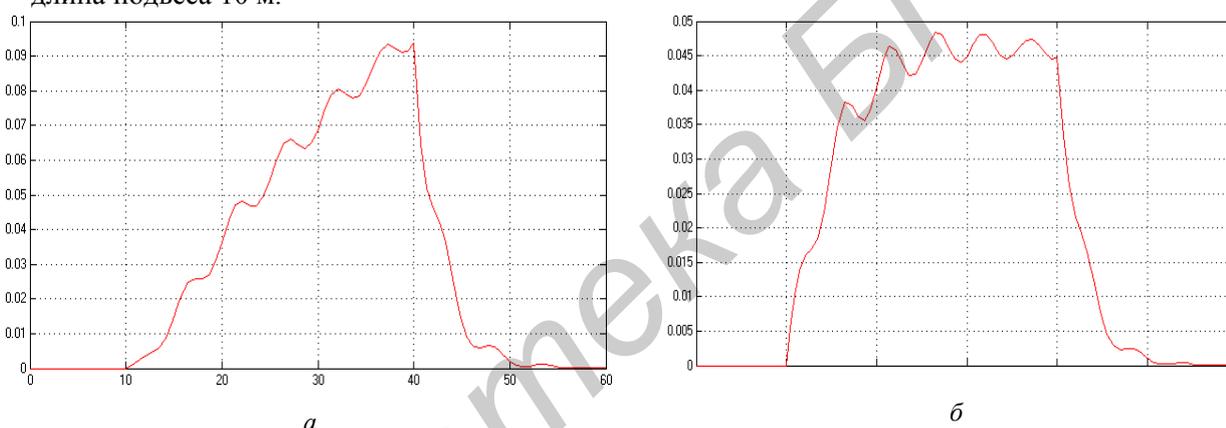


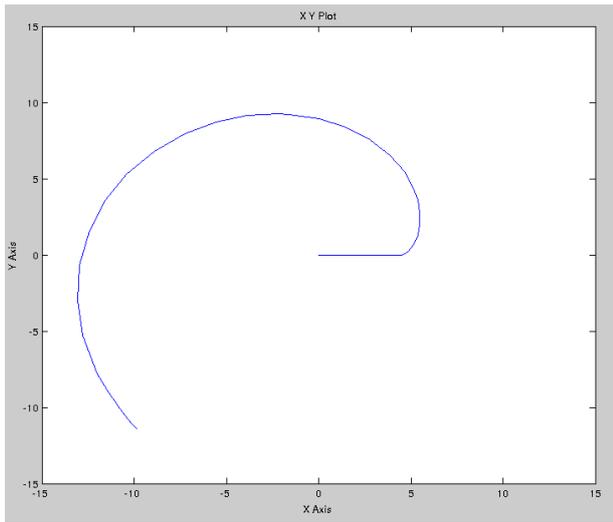
Рис. 4. Графики изменения ускорений тележки при перемещении полезного груза:
a – центробежного; *б* – Кориолиса

Из приведенных графиков видно, что центробежное ускорение и ускорение Кориолиса полезного груза достигают $0,1 \text{ м/с}^2$ и $0,05 \text{ м/с}^2$. Таким образом, значения ускорений соизмеримы со значениями задаваемых параметров и необходимо провести дополнительные исследования для выяснения влияния сил инерции, порождаемых этими ускорениями. При необходимости ввести дополнительные связи, позволяющие оценить и устранить влияние сил инерции на груз.

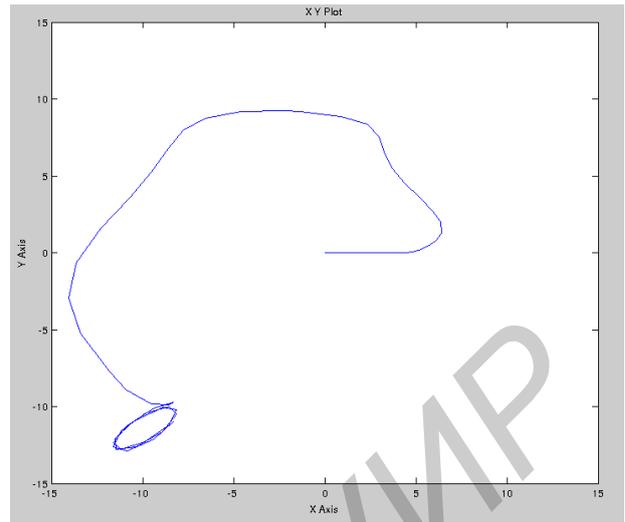
Центробежное ускорение может быть компенсировано противоположным управляющим воздействием. Для компенсации центростремительного ускорения можно ввести дополнительное поступательное смещение тележки по стреле, пропорциональное величине центробежного ускорения. Таким образом, центробежное ускорение от стрелы компенсируется введением ускорения от перемещения точки подвеса вовнутрь на величину, пропорциональную квадрату угловой скорости стрелы и расстоянию от оси вращения. Ускорение Кориолиса может быть компенсировано аналогичным способом: введением дополнительного смещения башни.

Результаты и их обсуждение

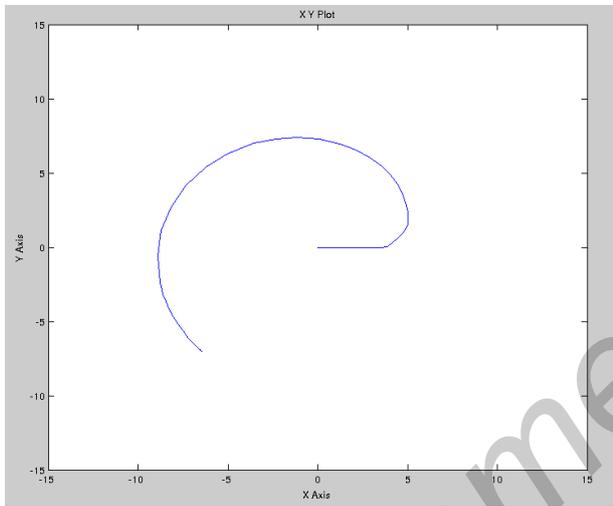
Рассмотренное управление с подавлением колебаний за счет использования формирующих фильтров при добавлении связей, учитывающих центростремительное ускорение, дает результат, показанный на рис. 5. Графики *a*, *в*, *д* изображают траектории движения тележки, груза и траекторию движения груза относительно тележки в системе без учета сил инерции, графики *б*, *г*, *е* – в системе с компенсацией данных сил.



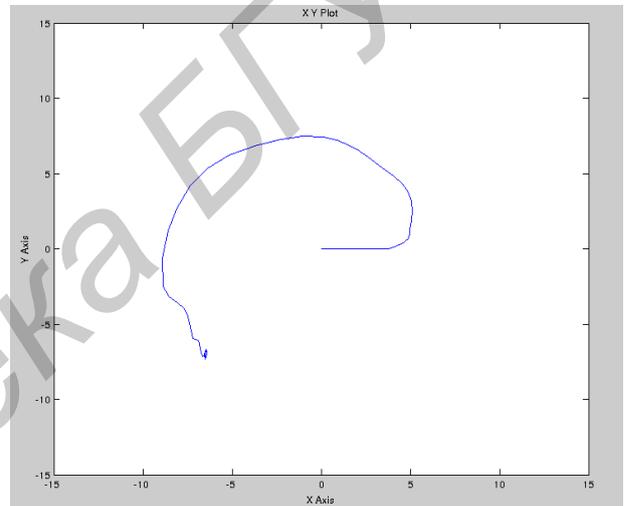
a



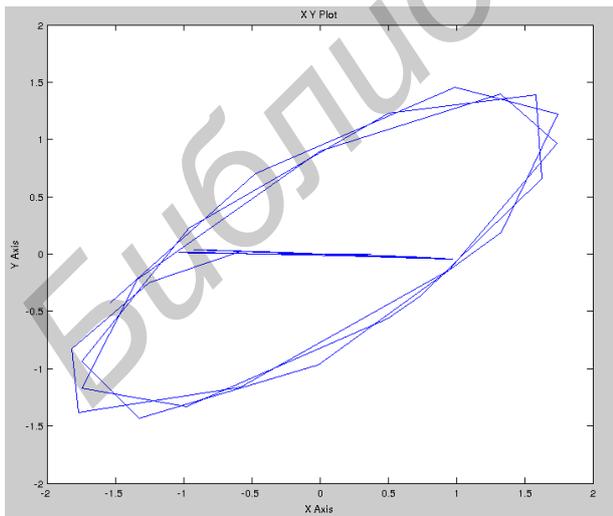
б



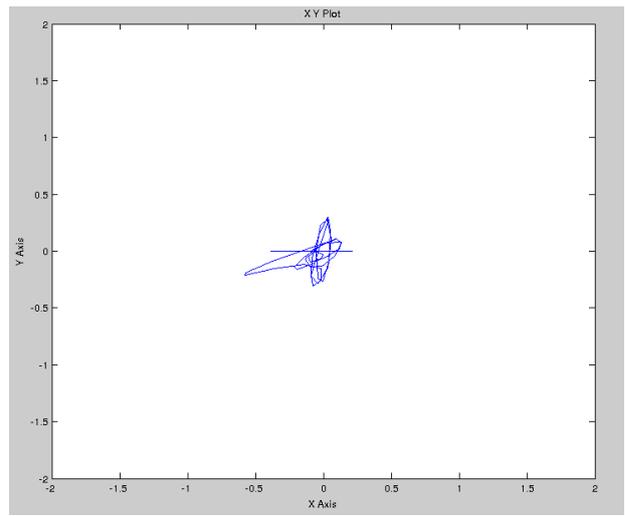
в



г



д



e

Рис. 5. Траектории движения тележки и груза: *a, в* – траектория движения тележки, при неподвижной ориентации, наблюдение с башни; *б, г* – траектория движения груза, при неподвижной ориентации, наблюдение с башни; *д, e* – траектория движения груза при неподвижной ориентации, наблюдение с тележки

Графики 5 а, в представляют собой траекторию движения тележки в системе управления без учета сил инерции и с компенсацией данных сил, соответственно. Аналогично, графики 5 б, г характеризуют поведение груза при перемещении тележки и повороте башни. Из рис. 5, б видно, что в системе без компенсации сил инерции присутствуют значительные остаточные колебания (от 0,2 м до 2 м). В то же время, в системе с компенсацией колебания практически отсутствуют (до 0,1 м до 0,4 м). Графики 5 д, е отражают траекторию движения груза относительно тележки.

Из рис. 5 следует, что, несмотря на подавление колебаний, эффективность фильтров заметно снизилась. Таким образом, необходимы другие способы управления, учитывающие особенности вращательного движения. Комбинация алгоритма управления с подавлением колебаний и дополнительными связями, компенсирующими инерционные силы, позволяет устранить большую часть колебаний в системе без учета внешних воздействий.

Стоит отметить, что при работе реального объекта, которым и является любой грузоподъемный механизм, также нельзя исключать влияние внешних возмущений, таких как погодные условия. Для компенсации таких возмущений необходимы замкнутые системы управления с использованием наблюдателей состояния или регуляторов на базе нечеткой логики (fuzzy-controller) [2, 3].

Заключение

Моделирование грузоподъемных механизмов в полной мере отражает тот факт, что ввиду различий между поступательным и вращательным движениями использование алгоритмов управления для поступательного движения не дает высоких показателей качества при вращательном движении без внесения соответствующих изменений или разработки новых алгоритмов. При реализации новых систем управления необходимо учитывать, что качество управления во многом определяется точностью используемых математических моделей, в частности, если речь идет о разомкнутых системах управления. Полученные в данной работе результаты моделирования показывают, что при разработке систем управления с подавлением колебаний для грузоподъемных механизмов необходимо также учитывать силы инерции, порождаемые центробежным ускорением и ускорением Кориолиса. Характеристики современных грузоподъемных механизмов достигли уровня, при котором становится невозможным игнорировать данные силы.

MODELING OF MANAGEMENT SYSTEM WITH INERTIAL FORCES COMPENSATION FUNCTIONING ALGORITHMS

A.V. PASHUK, M.K. HADZHINOV, O.A. SHVEDOVA

Abstract

The analysis results of inertial forces effect on the behavior of cargo and trolley, development and research methods of compensation this forces in anti-sway control systems are presented. As shown by simulation, inertial forces should be taken into account when develop anti-sway control methods. We have proposed ways to compensate this forces in control system with input shaping control system.

Keywords: lifting mechanism, vibration suppression, compensation of inertial forces.

Список литературы

1. Шмарловский А.С. Алгоритмы и системы управления приводами подъемно-транспортных механизмов: Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2012.
2. Эняяталлах Алави Сейед Система гашения колебаний груза подъемных кранов на основе методов нечеткой логики: Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2011.
3. Omar H.M. Control of gantry and tower cranes. PhD Dissertation. Virginia, 2003.
4. Пашук А.В. Микроконтроллерная система управления электроприводом подъемного крана: Дипломный проект. Минск, 2014.

УДК 537.531

ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ ГЛОБАЛЬНЫХ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТАМАТЕРИАЛЬНЫХ ЭКРАНОВ

А.С. АБУКРАА, М.А. ВИЛЬКОЦКИЙ, Л.М. ЛЫНЬКОВ

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

Поступила в редакцию 4 ноября 2015

Приводятся результаты численного и экспериментального анализов эффективности применения метаматериальных экранов для совместного использования с антеннами приемников сигналов глобальной системы спутниковой навигации. Из множества возможных конструкций экранов были выбраны конструкции регулярной геометрии, не обладающие кривизной. Численно, методом перебора, исследованы строго периодические экраны, затем экраны конечных размеров. Теоретически достигнуты значения подавления помеховых сигналов 8...10 дБ. Экспериментальные исследования, проведенные в реальной обстановке, в основном, это подтвердили.

Ключевые слова: защита информации, помехозащищенность спутниковых систем, метаматериалы, экраны электромагнитного излучения.

Введение

Проблема обеспечения помехозащищенности систем спутниковой навигации в последнее время существенно обострилась. В ряде опубликованных результатов исследований показано, что искусственные помехи в виде когерентного, шумоподобного или псевдонавигационного сигналов могут парализовать абонентскую навигационную систему при относительно небольшой мощности источника помехового сигнала. Увеличение помехоустойчивости может быть достигнуто путем применения специальных методов частотной и пространственной фильтрации на входе приемников сигналов глобальной системы спутниковой навигации (ГНСС). Под пространственной фильтрацией понимается антенная система, которая подавляет сигналы, поступающие от направления на источник помех.

Создание частотного фильтра не составляет проблемы, поскольку при этом используются средства микроэлектроники с приемлемым уровнем потерь полезного сигнала. Антенна не может быть создана на основе технологий микроэлектроники. Поскольку для обеспечения ее эффективности габариты должны быть сравнимы с длиной волны, то применение технологий микроэлектроники при создании таких антенн представляет проблему в смысле обеспечения приемлемых массогабаритных показателей. Общепринятым в практике является использование микрополосковых антенн, расположенных на подложке из диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью, в абонентских приемниках бытового назначения. Такие антенны компактны, обладают малым весом, но имеют широкую диаграмму направленности и низкий коэффициент усиления в направлении передатчиков ГНСС. Последнее приводит к тому, что сигналы помехи искусственного либо многолучевого типа не фильтруются на входе абонентского приемника и, попадая в приемный тракт, нарушают точность работы приемника либо блокируют его работу. Существует два способа борьбы с помехами в данной ситуации. Первый заключается в использовании адаптивных антенных решеток, второй – в создании антенных систем, имеющих низкий коэффициент усиления в направлениях возможного прихода сигналов помех. Как правило, сектор излучения прихода многолучевых и искусственных помеховых сигналов лежит вблизи горизонта в направлениях

выше касательной к горизонту до $0,1 \dots 0,2$ рад. Для уменьшения коэффициента усиления в таком секторе необходимы антенны с большой апертурой. Известно, что провал в излучении широконаправленного источника электромагнитного излучения вдоль поверхности может быть получен путем расположения отражающего экрана.

Поле излучения источника в присутствии безграничного однородного экрана может быть представлено в виде суммы полей двух источников – действительного и мнимого, обусловленного отражением поля действительного источника от экрана. Глубина и ширина провала обусловлена фазовыми и амплитудными соотношениями полей мнимого и действительного источников. В случае металлического экрана, расположенного на высоте h , поле излучения описывается следующими выражениями.

Для вертикальной поляризации:

$$E = AF(\theta) \cdot \sqrt{1 + |R|^2 + 2|R| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} 2h \cos\theta + \Phi\right)}; \quad (1)$$

для горизонтальной поляризации:

$$E = AF(\theta) \cdot \sqrt{1 + |R|^2 - 2|R| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} 2h \cos\theta + \Phi\right)}. \quad (2)$$

Для металлического экрана $R = 1$. В случае экрана с комплексной проводимостью в соответствии с моделью Зоммерфельда, для обеих поляризаций коэффициент отражения имеет следующий вид:

$$R = \frac{\cos\varphi - \sqrt{1 + (\sin^2\theta / \alpha^2)}}{\cos\varphi + \sqrt{1 + (\sin^2\theta / \alpha^2)}}, \quad (3)$$

где R – коэффициент отражения экрана; α – комплексная постоянная экрана; θ – угол отражения.

Таким образом, при $\alpha \gg 1$; $R \rightarrow -\text{tg}^2 \frac{\theta}{2}$ вне зависимости от поляризации.

Из приведенных выражений следует, что сплошной металлический экран не обладает помехозащитными свойствами, поскольку в направлениях, касательных к поверхности экрана, увеличивает поле излучения-приема для вертикальной поляризации на 3 дБ и настолько же уменьшает поле горизонтально поляризованной составляющей. Это сводит к нулю выигрыш в помехозащищенности в касательном направлении за счет свойств металлического экрана в случае кругополяризованного поля.

Увеличение помехозащищенности может быть достигнуто при применении диэлектрического экрана, но при этом экран должен иметь значительную толщину. Вместе с тем известно, что существуют искусственные диэлектрики, т.н. метаматериалы, поверхности которых могут иметь свойства, которые соответствуют свойствам экранов металлического, диэлектрического и поглощающего типов [1, 2].

Конструкции таких экранов могут быть весьма разнообразны, но в обобщенном виде они представляют собой периодические структуры, образованные металлическими элементами, расположенными в среде с малыми потерями. Теория их синтеза не разработана. На практике это приводит к тому, что для определения их геометрии и параметров материала, разработчикам приходится действовать методами перебора конструкций и свойств материалов, из которых они изготовлены, опираясь на приближенные модели. При этом параметры модели экрана зачастую определяются технологическими соображениями, доступностью средств их изготовления и стоимостью материалов, из которых они изготовлены.

Методики расчета и эксперимента

В качестве объекта теоретического и экспериментального исследований были выбраны экраны, расположенные вблизи приемника электромагнитного излучения, образованные взаимоперпендикулярными элементами рамочного типа. Период расположения элементов соответствовал условию отсутствия многолучевости для регулярной структуры в исследуемом диапазоне длин волн.

Метод исследования заключался в том, что на первом этапе проводились численные исследования бесконечного экрана, образованного регулярно повторяющимися элементами. Использовался метод перебора коэффициента K , основанный на предположении о том, что экран представляет собой систему связанных резонаторов с нижней критической длиной волны

$$\lambda_{кр} = \Pi \cdot K(\epsilon), \quad (4)$$

где Π – периметр замкнутого элемента, K – коэффициент, учитывающий влияние межэлементных электродинамических связей конструкции и диэлектрических элементов, обеспечивающих механическую связность конструкции.

Все параметры периода экрана удовлетворяли условию отсутствия многолучевости в предположении регулярности элементов и периода. Объект исследования был выбран исходя из соответствия резонансных частот экрана несущим частотам информационных сигналов ГНСС GPS и ГЛОНАС. Расчеты параметров регулярных экранов и экранов ограниченных размеров проводились численными методами. Эксперимент проводился с использованием экрана, который был изготовлен в соответствии с анализом результатов численных расчетов. При этом использовался источник помех в диапазоне L_1 и L_2 и навигационный приемник с выносной антенной, которая располагалась вблизи поверхности экрана. Параметры источника помех излучения были определены по результатам измерений в калиброванной ГТЕ-камере. Источник помех построен на основе генератора управляемого напряжением с полосами свипирования, соответствующими полосам занимаемыми сигналами ГНСС. Одиночный элемент регулярного экрана имел форму, представленную на рис. 1.

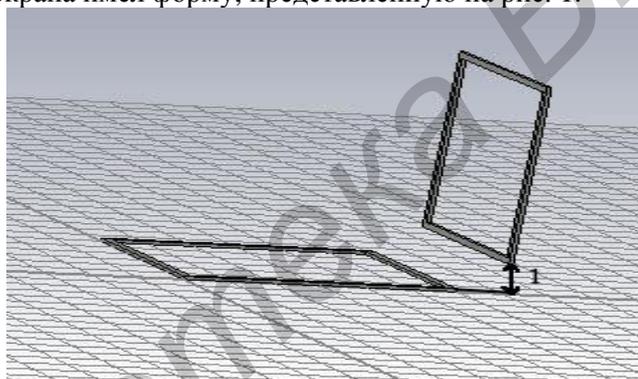


Рис. 1. Элементарная ячейка экрана:

1 – расстояние между вертикальными и горизонтальными элементами

При определении базовой модели экрана было постулировано, что период решетки удовлетворяет условию отсутствия многолучевости, а ее конструкция не содержит одиночных элементов, обладающих кривизной. Последнее условие принято с целью обеспечения технологичности и механической конформности конструкции экрана, который в неэксплуатируемом положении должен иметь минимальные объем и вес. Условие отсутствия многолучевости для регулярной и безграничной структуры обусловлено только периодом, но служит только ориентировочным параметром для нерегулярной решетки, так как реальная конструкция имеет ограниченные размеры и ошибки в изготовлении. Один из способов учета параметров ограниченности размеров экрана на поле излучения и рассеяния радиоволн был предложен П.Я. Уфимцевым [2]. Суть метода состоит в том, что влияние ограниченности размеров экрана на его поле рассеяния представляется в виде краевых волн, источником которых являются края экрана. В случае прямолинейной формы экрана для определения параметров краевой волны используется строгое решение для клина, впервые полученное Зоммерфельдом [3]. Очевидно, что в случае импедансного экрана, который рассматривается в данном случае, такое представление также может быть полезным. В упрощенном рассмотрении экран ограниченных размеров может быть представлен в виде совокупности источников, образованных зеркальными изображениями приемного элемента в экране и на краях. В силу принципа взаимности удобнее рассматривать ДН приемной антенны навигатора как ДН передающей антенны, т.е. источника излучения, который имеет распределения поля такое же, как и у абонентского приемника навигатора (АП) с учетом его зеркальных

изображений. При таком рассмотрении следует вывод о том, что для образования провала в направлениях наземных источников помех как искусственного, так и естественного происхождения необходимо, чтобы независимо от импедансных свойств экрана его размеры удовлетворяли условию $(2n+1)\frac{\lambda}{2}$, где $n = 0, 1, 2, \dots$ в плоскости размещения экрана, что необходимо для взаимной компенсации полей излучения краевых волн в касательном направлении.

Результаты и их обсуждение

Расчеты коэффициентов рассеяния проводились путем перебора параметра K при неизменном периоде, составляющим 0,35 средней длины волны диапазона ГНСС. Последний был принят равным 1,4 ГГц. Типичный вид частотной зависимости коэффициентов прохождения и отражения приведен на рис. 2.

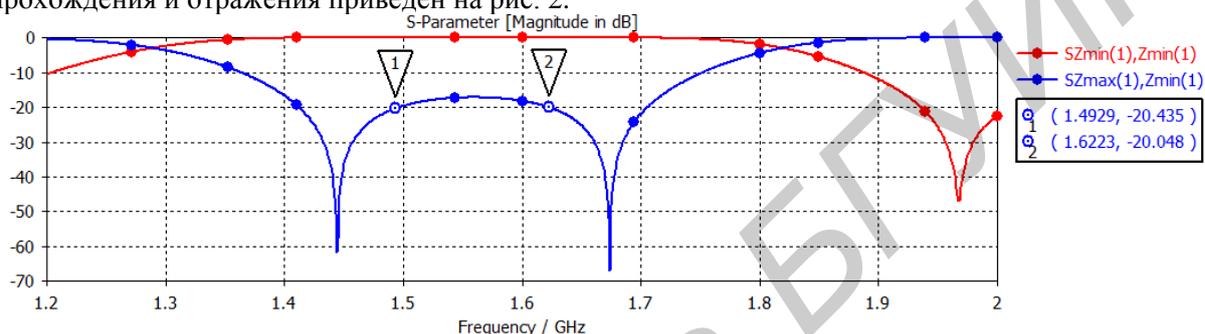


Рис. 2. Частотные характеристики регулярного экрана, образованного рамочными элементами

Видно, что экран имеет два резонанса, частотный разнос между которыми близок к разному частот диапазонов L_1 и L_2 . Численные исследования с экранами размером $4 \times 4 + 4 \times 4$ и $n = 2$ элемента показали, что экраны подавляют излучение в плоскости расположения экрана в среднем на 8...10 дБ. При ширине провала по уровню 0,5 порядка 0,2 рад. Типичная пространственная диаграмма направленности излучателя с экраном приведена на рис. 3. Анализ посредством расчета в сечениях показал, что поле в направлении касательной к экрану ослаблено на 8...10 дБ относительно максимального значения.

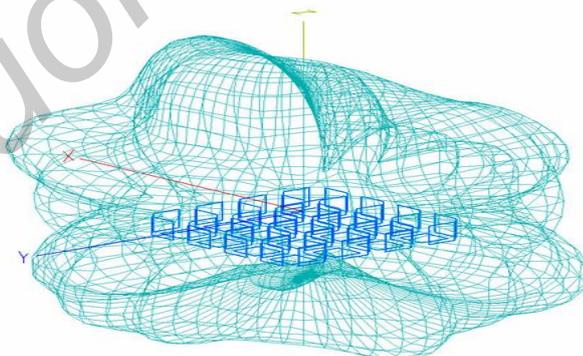


Рис. 3. Пространственная диаграмма направленности источника поля круговой поляризации, расположенного вблизи экрана ограниченных размеров

Из приведенных пространственных распределений поля очевидно, что теоретический анализ эффективности применения экрана крайне затруднителен. В связи с этим для оценки практической эффективности экрана были проведены натурные испытания. Макет экрана был изготовлен на основе пенополистирольных панелей плотностью 40 кг/м^3 и рамочных медных элементов диаметром 2 мм. Источник помех имел спектр излучения, приведенный на рис. 4.

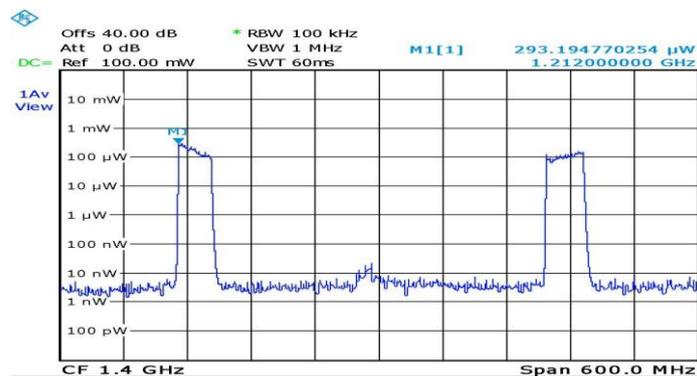


Рис. 4. Спектральные характеристики источника помех

Внешний вид экрана в развернутом состоянии приведен на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид экрана

В процессе эксперимента источник помех перемещался в одном направлении от приемника ГНСС на расстоянии от 5 до 20 метров. Место проведения эксперимента – площадь Независимости г. Минска.

Анализ числа спутников и соотношения сигнал/шум (с/ш) показал, что в отсутствие помехового сигнала число наблюдаемых спутников составляло 12...15 для группировок GPS и ГЛОНАСС. Почти все они использовались в решении навигационной задачи при среднем соотношении с/ш 30...40 дБ/Гц. В присутствии источника помех соотношение с/ш уменьшалось в среднем на 20 дБ, т.е. до уровня 15 дБ/Гц. Когда расстояние между антенной ГНСС и источником помех составляло 5 м, приемник приводился в неработоспособное состояние относительно сигналов данных спутниковых группировок. При увеличении расстояния до 15 м приемник восстанавливался, в решении навигационной задачи участвовали все спутники ГЛОНАСС (8 и 8 в данном случае) и 3 из 5-ти спутников GPS. Такое соотношение, по-видимому, объясняется более высокой помехоустойчивостью сигналов ГЛОНАСС. Применение экрана существенно сказалось на работоспособности приемника, которая начиная с расстояния 5 м не реагировала на сигналы от источника помех.

Заключение

Проведены теоретические и экспериментальные исследования возможности применения метаматериальных экранов для улучшения защищенности систем ГНСС от искусственных помех и многолучевых спутниковых сигналов.

Теоретически и экспериментально исследованы экраны, образованные элементами рамочного типа, в результате которых определена геометрия экрана.

Результаты натурных испытаний экрана совместно с выносной антенной приемника сигналов ГНСС группировок GPS и ГЛОНАСС показали следующее. На расстоянии 5 метров от антенны приемника источник помех при отсутствии экрана приводил приемник ГНСС в состояние неработоспособности. На расстояниях 15...20 и более метров наличие источника помех не сказывалось на работоспособности приемника. При размещении приемной антенны ГНСС на поверхности экрана работоспособность приемника сохранялась относительно этих

группировок при расстоянии от источника помех 5 м вне зависимости от угловой ориентации экрана в плоскости Земли. Вследствие этого может быть сделан вывод, что применение экранов рассмотренного типа может улучшить помехозащищенность искусственного и естественного происхождения на 8...10 дБ, источники которых расположены на малых углах возвышения.

EMISSIONS SECURE OF GLOBAL SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS WITH USE OF METAMATERIAL SHIELDS

A.S. ABUKRAA, M.A. VILKOTSKY, L.M. LYNKOU

Abstract

The results of numerical and experimental analysis of the metamaterial shields effectiveness for use with the receiver antenna signals of global satellite navigation systems are given. From the many possible designs the screens with regular geometry design without curvature were chosen. Numerically, brute force, strictly periodic shields and shields of finite size were investigated. The suppressing interfering signals values of 8...10 dB were theoretically achieved. Experimental studies in the real situation, basically, confirmed it.

Keywords: information security, emissions secure of satellite systems, metamaterials, electromagnetic radiation shields.

Список литературы

1. *Слюсар В.* // Электроника: НТБ. 2009. № 7.
2. *Hwang R.B., Peng S.T.* // IEEE Trans. AP. 2003. Vol. 51. № 6.
3. *Зоммерфельд А.* Оптика. М., 1963.
4. *Уфимцев П.Я.* Метод краевых волн в физической теории дифракции. М., 1962.

УДК 621.391

ПРЕДСКАЗАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА КАДРАХ ВИДЕОПОТОКА С БОРТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

И.А. БОРИСКЕВИЧ

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

Поступила в редакцию 26 февраля 2016

Предложены алгоритмы стабилизации видеоизображения с борта легкого беспилотного летательного аппарата и поиска малоразмерных целей на кадрах видеопоследовательности с предсказанием. Установлено, что по сравнению с методом SURF предложенный метод обеспечивает сокращение до 5,2 раз времени параметризации и локализации реперов. Показано, что в условиях непрерывного сопровождения предложенный алгоритм обеспечивает повышение скорости обработки кадров примерно до 6,2 раза по сравнению с ковариационным методом.

Ключевые слова: видеоизображение, малоразмерная цель, поиск, стабилизация, дескриптор, предсказание.

Введение

Эффективным подходом к сопровождению малоразмерных целей (не менее 4×4 пикселей) в условиях нестационарной видеокамеры является использование интегрального ковариационного дескриптора, учитывающего как яркостные, так и текстурные свойства цели [1–3]. 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. Данная проблема обостряется при сопровождении малоразмерных целей с борта легкого беспилотного летательного аппарата (БЛА), неустойчивого к ветровым воздействиям. Устранение данных недостатков возможно за счет 1) стабилизации видеоизображения, поступающего с борта БЛА и 2) предсказания положения цели на кадрах видеопотока.

Стабилизация сглаживает траекторию объекта на видеоизображении, что повышает вероятность его обнаружения при предсказании положения и позволяет уменьшить время поиска. Для стабилизации видеокадров широко используются методы градиентной параметризации и идентификации реперов, такие как SIFT (Scale-Invariant Feature Transform – масштабно-независимое преобразование особенностей) [4] и SURF (Speeded-Up Robust Features – ускоренные устойчивые особенности) [5]. Однако в случае обработки видеопоследовательности с борта легкого БЛА они не эффективны из-за высокой чувствительности градиентного дескриптора к шуму и изменению контрастно-яркостных характеристик видеокadres. Кроме того, данные методы обладают высокой вычислительной сложностью и не могут быть применены для обработки видеопоследовательности в реальном масштабе времени. Более эффективным в данных условиях является использование дескриптора на основе ковариационных вейвлет-признаков [6], обладающего меньшей чувствительностью к изменению контрастно-яркостных характеристик изображения и лучшим отношением сигнал/шум за счет концентрации энергии в ограниченном количестве вейвлет-коэффициентов. Кроме того, вейвлет-дескриптор учитывает как яркостные, так и текстурные свойства признаков (реперных) областей на соседних кадрах. Эти свойства обеспечивают эффективность ковариационных вейвлет-дескрипторов для обработки видеопотока не только с

цифровой, но и с аналоговой видеокамер. Ограничением на практическое применение ковариационных признаков для стабилизации видеоизображения в реальном масштабе времени является высокая вычислительная сложность, связанная с размером ковариационной матрицы и признаковых образов. Один из способов повышения быстродействия заключается в уменьшении количества окон-кандидатов, для каждого из которых требуется вычисление ковариационной матрицы. Без ущерба для качества сопровождения это возможно за счет предсказания и минимизации размера области поиска на следующем видеокadre. Таким образом, идея постепенного уточнения заключается в уменьшении количества окон-кандидатов и соответственно увеличении скорости стабилизации видеоизображения за счет предсказания позиции и размера области поиска текущего репера на следующем видеокadre на основании найденных соответствий для предыдущих реперов.

Предсказание положения цели на кадрах видеопотока выполняется после стабилизации и позволяет реализовать селективную ковариационную обработку, уменьшить размеры ковариационных дескрипторов и области поиска, повысить быстродействие.

Целью работы является разработка алгоритмов предсказания положения объектов на кадрах видеопотока с борта легкого БЛА.

Стабилизация видеоизображения и поиск объектов в контуре управления БЛА

На рис. 1 представлена структурная схема контура управления БЛА в режиме автоматического сопровождения цели, включающая исполнительную (рули, двигатель) и управляющую системы БЛА, исполнительную (шаговые двигатели) и управляющую системы видеокамеры, измерительно-навигационную систему (компас, высотомер, измеритель скорости, GPS-приемник), системы обработки и визуализации видеоинформации и операторов управления БЛА и целевой нагрузки, которые образуют три контура управления и обеспечивают различные режимы применения БЛА.

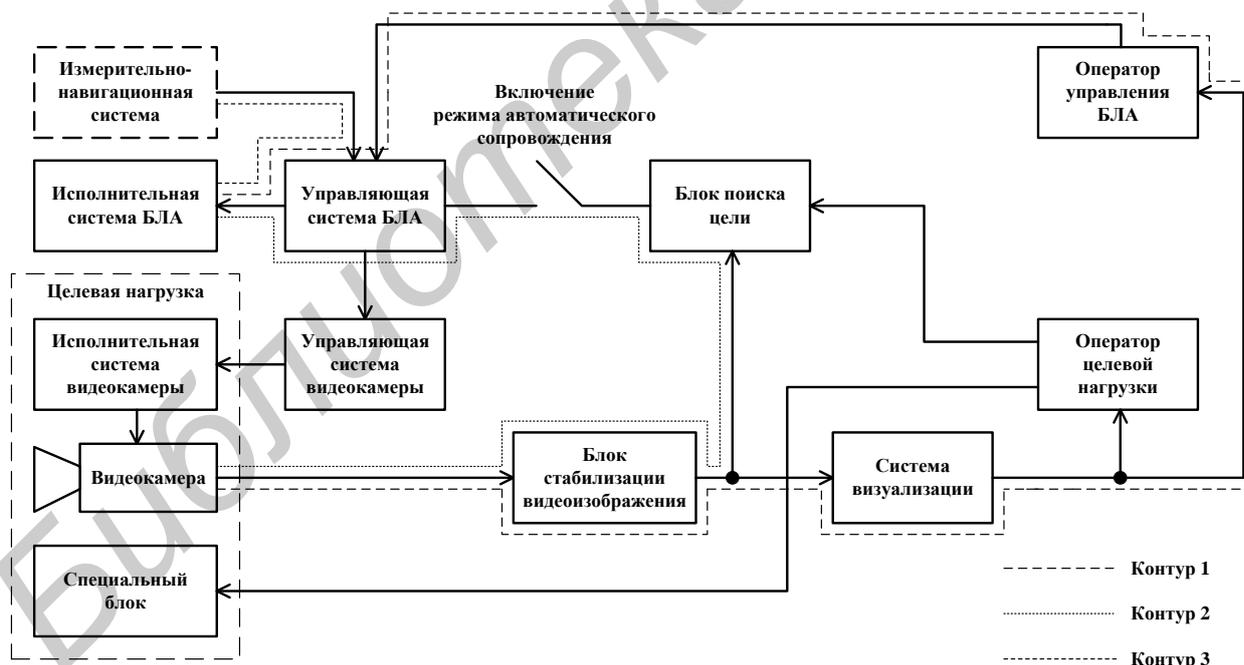


Рис. 1. Структурная схема управления БЛА в режиме автоматического сопровождения

Первый контур обеспечивает возможность ручного управления БЛА посредством передачи команд от оператора к управляющей системе БЛА. Второй контур формирует дополнительные команды на управляющую систему БЛА в режиме автоматического сопровождения цели, выбранной оператором. Третий контур обеспечивает полет БЛА по информации от измерительно-навигационной системы.

Система обработки видеоинформации состоит из блоков стабилизации видеоизображения и поиска цели. Блок стабилизации реализует гомографию изображения с

видеокамеры, обеспечивающую компенсацию ухода оптической оси видеокамеры за счет усреднения относительных пиксельных смещений соседних кадров. В этом случае гомография переводит координаты $(x(t), y(t))$ каждого пиксела одного видеокadra в координаты $(x(t+1), y(t+1))$ соответствующего пиксела соседнего кадра с помощью выражения

$$\begin{bmatrix} x(t+1) \\ y(t+1) \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ где } H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} - \text{ матрица гомографии, коэффициенты которой}$$

в общем случае реализует проективное преобразование. Блок поиска цели обеспечивает предсказание местоположения и обнаружение цели на основе интегрального ковариационного дескриптора.

Стабилизация видеоизображения с итерационным предсказанием на основе интегрального ковариационного вейвлет-дескриптора

В алгоритме ковариационной стабилизации видеоизображения с предсказанием [6] выбор количества реперов R , соответствие между которыми требуется установить на опорном и следующем кадрах, зависит от параметров видеосъемки (размер и частота кадров) и временных и вычислительных ресурсов. С учетом того, что для оценки изменения видеоизображения при стабилизации используются два соседних кадра, следующих с частотой 25–30 Гц, достаточно учитывать только вертикальное и горизонтальное смещения этих кадров, что является частным случаем проективного преобразования и реализуется с помощью матрицы гомографии, в которой коэффициенты принимают следующие значения: $h_{11} = h_{22} = h_{33} = 1, h_{21} = h_{31} = h_{32} = h_{12} = 0, h_{13} = \Delta x, h_{23} = \Delta y$, где Δx и Δy – смещения соответственно по осям X и Y . Известные расстояния между реперными областями на одном кадре позволяют предсказать координаты центрального пикселя области поиска на следующем видеокadre и уменьшить ее размер $S_{r+1}^{(y)} \times S_{r+1}^{(x)}$. Установление каждого последующего реперного соответствия увеличивает точность оценки смещения. Идея постепенного уточнения заключается в уменьшении количества окон-кандидатов и соответственно увеличении скорости стабилизации видеокadres за счет предсказания позиции и размера области поиска текущего репера на следующем видеокadre на основании найденных соответствий для предыдущих реперов (рис. 2).

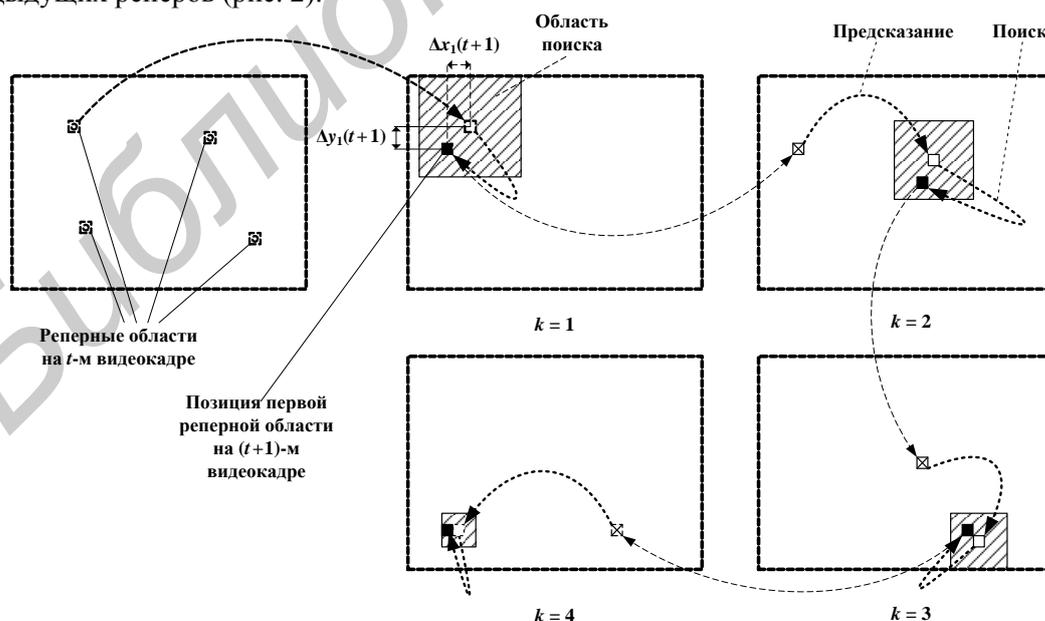


Рис. 2. Итеративное предсказание положения четырех реперных областей на $(t+1)$ -м видеокadre для вычисления межкадровых смещений главной оптической оси видеокамеры

Для уменьшения времени поиска и вероятности ложного обнаружения реперной области на текущем $(t+1)$ -м кадре используется предсказание координат $(\hat{y}_{r+1}(t+1), \hat{x}_{r+1}(t+1))$ центра $(r+1)$ -й реперной области, основанное на информации о координатах $(y_{r+1}(t), x_{r+1}(t))$ центра соответствующей реперной области на опорном кадре и координатах $(y_k(t), x_k(t))$ и $(y_k(t+1), x_k(t+1))$ центров k -х сопоставленных реперных областей ($k = \overline{1, r}$) на t -м опорном и $(t+1)$ -м текущем кадрах с помощью выражений, учитывающая среднее смещение соответствующих реперных областей на данных кадрах,

$$\hat{y}_{r+1}(t+1) = y_{r+1}(t) + \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r \Delta y_k(t+1), \quad \hat{x}_{r+1}(t+1) = x_{r+1}(t) + \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r \Delta x_k(t+1), \quad (1)$$

где $\Delta y_k(t+1) = y_k(t+1) - y_k(t)$ и $\Delta x_k(t+1) = x_k(t+1) - x_k(t)$ – пиксельные смещения между центрами k -х реперных областей t -го и $(t+1)$ -го видеокadres по вертикали и горизонтали соответственно.

Для определения размера $S_{r+1}^{(y)} \times S_{r+1}^{(x)}$ области поиска реперной области на текущем $(t+1)$ -м кадре по вертикали и горизонтали используется выражение

$$S_{r+1}^{(y)} = U + (L_y + R - r)(U - P_y), \quad S_{r+1}^{(x)} = V + (L_x + R - r)(V - P_x), \quad (2)$$

где R – число реперных областей; P_y, P_x – линейные размеры области перекрытия окон-кандидатов по вертикали и горизонтали; L_y, L_x – базовое число окон-кандидатов по вертикали и горизонтали.

Число аддитивных C_A и мультипликативных C_M операций предсказания на один кадр определяется с помощью выражений

$$C_A = \sum_{r=1}^R 4r + 8R, \quad C_M = 4R. \quad (3)$$

Зависимость числа аддитивных и мультипликативных операций от количества реперных областей представлена на рис. 3.

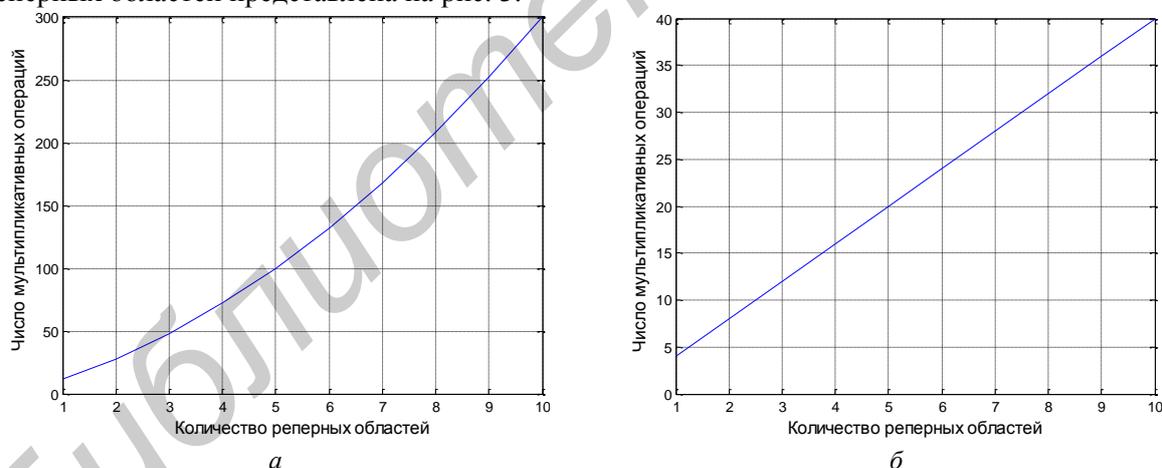


Рис. 3. Зависимость числа аддитивных C_A и мультипликативных C_M операций от количества (R) реперных областей: a – аддитивные операции; b – мультипликативные операции

Из графика следует, что предложенный алгоритм предсказания обладает низкой вычислительной сложностью при небольшом количестве реперных областей ($R = 4$) и может быть использован в реальном масштабе времени.

Селективно-пространственный поиск малоразмерных объектов на основе интегрального ковариационного дескриптора

Сущность предложенного алгоритма [3] состоит в формировании признаков изображений для перекрывающихся окон-кандидатов в пределах предсказанной области поиска

объекта на текущем кадре видеопоследовательности, вычислении ковариационных матриц окон-кандидатов и их сравнении с матрицей эталона объекта.

Для уменьшения времени поиска и вероятности ложного обнаружения объекта используется предсказание координат $(y(t + \Delta_t), x(t + \Delta_t))$ центра области поиска объекта на $(t + \Delta_t)$ -м кадре, основанное на информации о координатах $(y_o(t), x_o(t))$ и векторе $\vec{v}(t) = (v_y(t), v_x(t))$ скорости (пикселей/кадр) объекта на $[t, t + \Delta_t]$ -х кадрах видеопоследовательности с учетом совместного перемещения объекта и БЛА, с помощью выражений

$$y(t + \Delta_t) = y_o(t) + v_y(t)\Delta_t, \quad x(t + \Delta_t) = x_o(t) + v_x(t)\Delta_t, \quad (4)$$

где Δ_t – интервал предсказания; $v_y(t), v_x(t)$ – вертикальная и горизонтальная компоненты вектора скорости объекта на кадрах видеопотока (векторная величина, характеризующая быстроту перемещения и направление движения точки в пространстве относительно выбранной системы отсчета).

После определения координат $(y_o(t + \Delta_t), x_o(t + \Delta_t))$ нового положения объекта на $(t + \Delta_t)$ -м кадре видеопотока осуществляется вычисление новых значений $(v_y(t + \Delta_t), v_x(t + \Delta_t))$ составляющих вектора скорости перемещения объекта на кадрах видеопоследовательности с помощью выражений

$$v_y(t + \Delta_t) = \frac{y_o(t + \Delta_t) - y_o(t)}{\Delta_t}, \quad v_x(t + \Delta_t) = \frac{x_o(t + \Delta_t) - x_o(t)}{\Delta_t}. \quad (5)$$

Размер $U \times V$ области поиска объекта по вертикали и горизонтали определяется с помощью выражения

$$U = \left\lceil \frac{\Delta_t M}{p(t, \Delta_t)} \right\rceil, \quad V = \left\lceil \frac{\Delta_t N}{p(t, \Delta_t)} \right\rceil, \quad (6)$$

где M и N – размер эталонного изображения; $\lceil \cdot \rceil$ – операция округления с избытком; $U \leq Y$, $V \leq X$; $p(t, \Delta_t)$ – вероятность попадания объекта в окно поиска размером $U \times V$.

Вероятность $p(t)$ зависит от плавности траектории перемещения на видеоизображении и определяется с помощью выражения

$$p(t, \Delta_t) = \begin{cases} 1 - \frac{|v_E|}{\min(M, N)} & \text{при } |v_E| < \min(M, N), \\ 0 & \text{при } |v_E| \geq \min(M, N), \end{cases} \quad (7)$$

где $|v_E| = \sqrt{(v_y(t + \Delta_t) - v_y(t))^2 + (v_x(t + \Delta_t) - v_x(t))^2}$ – модуль вектора $\vec{v}_E(t) = \vec{v}(t) - \vec{v}(t + \Delta_t)$ разности векторов скорости объекта на t -м и $(t + \Delta_t)$ -м видеокадрах.

Для предсказания положения центра и размера области поиска цели требуется 8 аддитивных и 9 мультипликативных операций на кадр. С целью уменьшения пространства поиска производится сравнение яркости опорных пикселей в пределах предсказанной области поиска размером $U \times V$ с координатами максимумов гистограммы эталона (рис. 4).

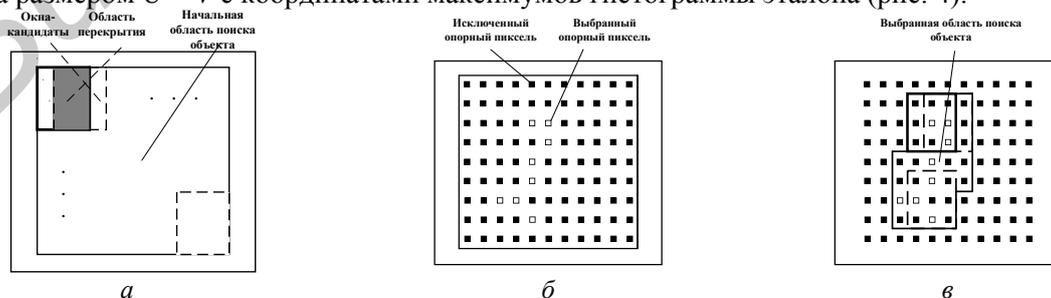


Рис. 4. Изображения областей поиска объекта при селективной гистограммной обработке окон-кандидатов: *a* – начальная область поиска объекта; *б* – обработанная сетка опорных пикселей; *в* – область поиска объекта на основе выбранных опорных пикселей

Окно-кандидат, представляющее собой прямоугольную область размером $M \times N$, исключается из предсказанной области поиска объекта на основе гистограммного анализа значений опорных пикселей.

Оценка эффективности алгоритмов стабилизации видеозображения и поиска целей с предсказанием

Для оценки эффективности метода стабилизации с предсказанием использованы тестовые кадры видеопоследовательностей двух классов с разным количеством яркостных перепадов (высококонтрастные и низкоконтрастные). Время локализации и параметризации реперов на одном кадре видеопоследовательности для дескриптора SURF и дескриптора на основе ковариационных вейвлет-признаков представлено в таблице.

Оценка времени локализации и параметризации реперов на кадре видеопоследовательности

Тип видеопоследовательности	Тип дескриптора		
	SURF, мс	Ковариационные вейвлет-признаки	
		HLWT, мс	UHLWT, мс
Высококонтрастная	162,2	31,1	131,3
Низкоконтрастная	149,6	52,7	218,0

Из таблицы видно, что использование дескриптора на основе прореженного дискретного лифтинг вейвлет-преобразования позволяет снизить время вычислений в 5,2 раза для высококонтрастного класса и в 2,8 раза для низкоконтрастного класса. В то же время использование дескриптора на основе непрореженного дискретного лифтинг вейвлет-преобразования приводит к снижению времени вычислений в 1,2 раза и увеличению в 1,5 раза соответственно.

Время обработки видеокadra оценивалось в среде программирования MATLAB R2013a на компьютере с процессором Intel Core i5 (2,6 ГГц) и ОЗУ 4 Гб. Обработаны 5000 кадров видеопоследовательности размером 720 на 480 пикселей и частотой 30 кадров в секунду, полученные с бортового оптико-электронного модуля БЛА.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма поиска целей с итерационным предсказанием использовалась вероятность правильного обнаружения и время обработки кадра (обнаружения цели) в условиях изменения частоты видеокadров, что 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 окна-кандидата находится в окрестности $M \times N$ пикселей от центра цели. При понижении частоты кадров предложенный алгоритм позволяет повысить вероятность правильного обнаружения цели до 10 % при изменении коэффициента частоты кадров до 15 раз (рис. 5).

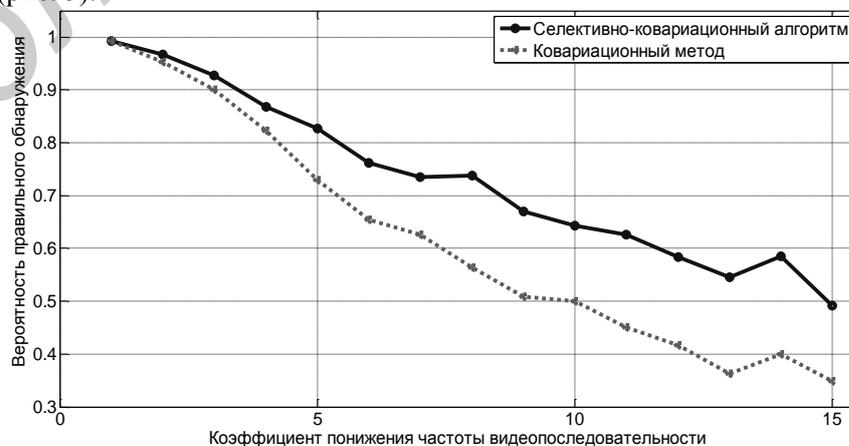


Рис. 5. Зависимость вероятности правильного обнаружения цели от величины коэффициента понижения частоты видеокadров

Среднее время обработки одного кадра видеопоследовательности при использовании стандартного метода составило 347,1 мс, при использовании модифицированного метода – 55,7 мс. Таким образом, использование предсказания позволяет повысить скорость обработки кадров примерно до 6,2 раз по сравнению со стандартным ковариационным методом.

Заключение

Предложены алгоритмы стабилизации видеоизображения с борта легкого БЛА и поиска малоразмерных целей на кадрах видеопоследовательности с предсказанием. Алгоритм стабилизации основан на сопоставлении ковариационных вейвлет-признаков и постепенном уточнении местоположения реперных областей с использованием предсказания. Установлено, что по сравнению с методом SURF предложенный метод обеспечивает сокращение до 5,2 раз времени параметризации и локализации реперов. Это позволяет использовать предложенный метод для решения задачи стабилизации видеоданных с борта легкого БЛА в условиях нестационарности видеокамеры и ограниченных вычислительных ресурсов. Алгоритм поиска малоразмерных целей основан на предсказании местоположения, размера и определении формы области поиска цели, с последующим ковариационным анализом этой области на соответствие эталонному образу цели. Показано, что в условиях непрерывного сопровождения предложенный алгоритм обеспечивает повышение скорости обработки кадров примерно до 6,2 раза по сравнению с ковариационным методом. Для видеопоследовательности пониженной кадровой частоты селективно-ковариационный метод позволяет увеличить вероятность правильного обнаружения цели до 10 %, обладая сопоставимой с ковариационным методом устойчивостью к изменению уровня шума и масштабированию интенсивности пикселей видеокадров.

PREDICT OF THE SMALL SIZE OBJECT POSITION ON THE VIDEO STREAM FRAMES FROM THE BOARD OF UNMANNED AERIAL VEHICLE

I.A. BARYSKIEVIC

Abstract

Algorithms of video stabilization from unmanned aerial vehicle board and search of small size targets on the video sequence frames with the prediction are proposed. Proposed stabilization method provides a parametrization and localization time reduction to 5.2 times compared with the SURF method. Proposed search algorithm speeds up frame processing time approximately in 6.2 times in comparison with the standard covariance method.

Keywords: video, small size targets, search, stabilization, descriptor, predict.

Список литературы

1. *Lowe D.G.* // Intern. Journ. of Computer Vision. 2004. Vol. 60, № 2. P. 91–110.
2. *Bay H.* // Computer Vision and Image Understanding. 2008. Vol. 110, № 3. P. 346–359.
3. *Борискевич, И.А., Цветков В.Ю.* // Докл. БГУИР. 2014. № 3. С. 33–39.
4. *Porikli F., Tuzel O.* // Proceedings of IEEE Int'l. Conference on Multimedia and Expo. 2005. P. 1234–1237.
5. *Tuzel O., Porikli F.* // Proc. 9th European Conf. on Computer Vision. 2006. Vol. 2. P. 589–600.
6. *Борискевич И.А., Цветков В.Ю.* // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. 2015. № 1. С. 106–111.

УДК 535.37

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОДЛОЖЕК АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ КАК ОСНОВЫ ПОРОГОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

И.В. ГАСЕНКОВА, Н.И. МУХУРОВ, *ЯСИН МОХСИН ВАХИОХ

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Независимости, 68, Минск, 220072, Беларусь

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

Поступила в редакцию 11 марта 2016

Описываются результаты исследования оптических и фотолюминесцентных свойств анодного оксида алюминия, сформированного в кислотных электролитах и подвергнутого высокотемпературной термообработке. Установлено, что фотолюминесцентные свойства анодного оксида алюминия определяются вакансиями кислорода с отличающимися значениями зарядовых состояний и примесями в виде остатков кислот. В качестве основы пороговых детекторов с точки зрения механической прочности предпочтительны подложки, сформированные в щавелевокислом электролите и модифицированные термообработкой при 800 °С.

Ключевые слова: анодный оксид алюминия, кислотный электролит, термообработка, оптические и фотолюминесцентные свойства.

Введение

Анодный оксид алюминия (АОА), получаемый электрохимическим окислением алюминия в кислотных электролитах, обладает большими потенциальными возможностями для создания нано- микроэлектронных систем и сенсоров, фотонных, оптоэлектронных структур и т. д. [1]. АОА имеет пористую структуру, геометрическими параметрами (диаметр, длина и расстояние между соседними порами) которой можно управлять в процессе формирования [2]. Это позволяет использовать пористый оксид алюминия в качестве мембран, шаблонов для синтеза наноматериалов и наноструктур [3] с контролируемыми размерами и высокой геометрической анизотропией. Характеристики фотонных и оптоэлектронных структур на основе АОА определяются оптическими свойствами оксида алюминия [4]. Экспериментальные исследования сформированных слоев АОА продемонстрировали наличие интенсивного люминесцентного фона [5], что может усложнять интерпретацию информации о наличии излучений при создании пороговых детекторов [6]. Для выяснения возможности использования подложек АОА как основы детекторов рентгеновского и ультрафиолетового излучений, были выполнены исследования оптических характеристик АОА в зависимости от условий их формирования.

Подготовка образцов и методика эксперимента

Известно, что морфология АОА пористого типа определяется условиями его формирования и имеет достаточно высокую воспроизводимость. При этом абсолютные значения диаметров пор и расстояний между ними могут изменяться примерно на порядок, но находятся в пределах субмикронных размеров [7]. Пористые подложки оксида алюминия толщиной ~50 мкм были приготовлены путем анодирования алюминиевых пластин марки А99

в трех видах электролита: водных растворах щавелевой (4 % $C_2H_2O_4$) кислоты без отжига и с отжигом на воздухе при температуре ($T = 800-900\text{ }^\circ\text{C}$); серной (20 % H_2SO_4) и фосфорной (6 % H_3PO_4) кислот. Часть образцов была модифицирована путем добавления в щавелевокислый электролит малых количеств (0,4 %) серной кислоты и термообработкой при высоких температурах на воздухе. Не проанодированный алюминий удалялся по стандартной методике растворения в соляной кислоте.

Спектры пропускания измерялись с использованием двухканального спектрометра фирмы Cary-17d (США) в неполяризованном свете с рабочим спектральным диапазоном 0,18–2,50 мкм с погрешностью измерения $\pm 0,1\%$. Для регистрации спектров ИК поглощения алюмооксидных подложек использовался ИК-Фурье спектрометр NEXUS 470 (Nicolet Analytical Instruments, USA) со спектральной шириной щели 2 см^{-1} при постоянной продувке сухим воздухом. Измерения спектров люминесценции проводились на автоматизированном спектрофлуориметре СДЛ-2, включающем светосильный монохроматор возбуждения МДР-12 и монохроматор регистрации МДР-23, с длиной волны возбуждения 325 нм.

Обсуждение результатов

Свойства АОА определяются особенностями строения, состава, структурой и модификацией и могут быть целенаправленно изменены в зависимости от функционального назначения устройств. Для электронных устройств с высококачественным диэлектриком из Al_2O_3 преобладающими являются электрофизические свойства. Однако построение устройств, в том числе и оптических сенсоров, предполагает, прежде всего, наличие соответствующих механических характеристик слоев АОА с толщинами более 40 мкм. По этому параметру предпочтительны подложки свободного, отделенного от алюминия, пористого оксида с высокими электрофизическими характеристиками и устойчивостью к механическим нагрузкам при нагреве до $1200\text{ }^\circ\text{C}$, сформированные в 4%-ном водном растворе щавелевой кислоты [8]. В исходном аморфном виде АОА имеет визуально «желтый» цвет, связанный с адсорбированными остатками щавелевой кислоты. Удаление этих остатков возможно путем введения в анодирующий электролит небольших (0,2–0,4 %) добавок серной кислоты, что приводит к формированию подложек АОА с визуально «серым» цветом. При этом все основные характеристики диэлектрического материала сохраняются [9].

Характерные кривые коэффициента пропускания τ подложек АОА толщиной 50 мкм в исходном аморфном состоянии и модифицированных термической обработкой, приводящей к образованию поликристаллических фаз, приведены на рис. 1, кривые 1–3. Здесь же для сравнения приведены спектры подложек лейкосапфира и ситалла. Видно, что большую прозрачность в видимом диапазоне длин волн имеют подложки $\gamma-Al_2O_3$.

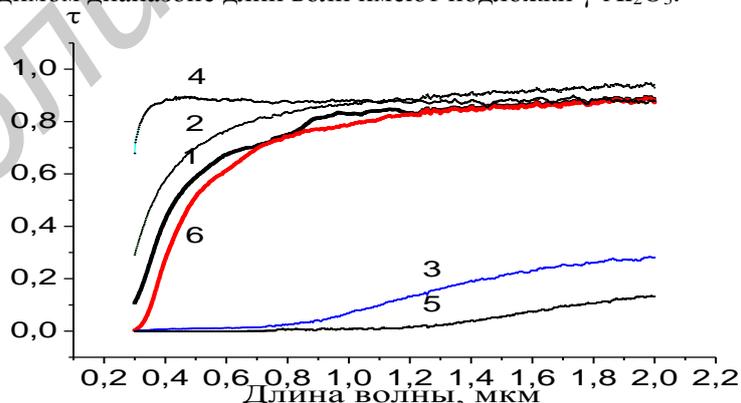


Рис. 1. Спектры пропускания АОА после различных условий термообработки и соответствующих им фаз, в сравнении с лейкосапфиром и ситаллом: 1 – аморфный АОА, 2 – $\gamma-Al_2O_3$, 3 – $\alpha-Al_2O_3$, 4 – лейкосапфир, 5 – ситалл, 6 – АОА с утолщенным монокристаллическим слоем

На интенсивность люминесценции пороговых детекторов ионизирующего и ультрафиолетового излучения оказывает влияние оптическое поглощение в диапазоне длин волн 200–600 нм и собственно фотолюминесценция АОА. Фотолюминесценция АОА

обусловлена совместным действием как примесей в виде остатков электролита, так и вакансиями кислорода (F -центрами) [10]. На рис. 2 приведены спектры фотолюминесценции исследованных образцов алюмооксидных подложек. Спектры фотолюминесценции для образцов, сформированных в различных электролитах, по форме и положению в координатах интенсивность-длина волны практически совпадают. При этом максимальная интенсивность люминесценции наблюдается для пленок, сформированных в щавелевокислом электролите.

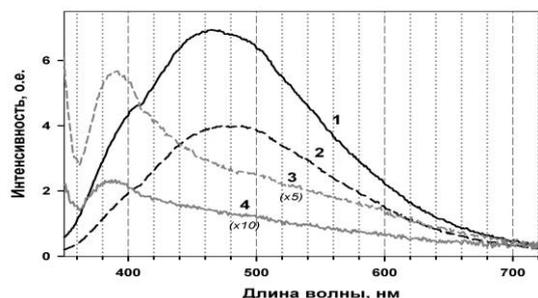


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции алюмооксидных подложек, сформированных при анодировании алюминия в электролитах: $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ (1), $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ + термообработка (2), H_2SO_4 (3) и H_3PO_4 (4)

Как следует из результатов работы [11], основными центрами свечения в анионодефектном оксиде алюминия являются F -центры. При этом F -центры могут представлять собой вакансии кислорода, захватившие два электрона, F^+ -центры с одним электроном, F_2 -центры (две вакансии кислорода с четырьмя электронами), F_2^+ -центры (две вакансии кислорода с тремя электронами) и F_2^{2+} -центры (две вакансии кислорода с двумя электронами).

Схематическое изображение электронной структуры F -центра в оксиде алюминия подобно аналогичному изображению квазиатома гелия [12]. Основное состояние характеризуется уровнем 1S (рис. 3). Возбужденные состояния представлены двумя уровнями: синглетным 1P и триплетным 3P . Возбуждение F -центра соответствует переходу $^1S \rightarrow ^1P$ (полоса поглощения с максимальными значениями энергии 6,1 эВ и интенсивности фотолюминесценции на 205 нм). Возбуждение оптическим излучением в видимом диапазоне длин волн вызывает люминесценцию (переход $^3P \rightarrow ^1S$) с максимумами спектра свечения энергией 3,0 эВ, интенсивностью фотолюминесценции на 420 нм и с постоянной времени затухания 36–40 мс. Возбужденное состояние F -центра с максимальными энергетическими характеристиками находится вблизи дна зоны проводимости. При возбуждении с энергией 6,1 эВ может наблюдаться оптическая или термическая ионизация F -центров, в результате чего образуется F^+ -центр ($F - e \rightarrow F^+$), который при захвате электрона может снова возвращаться в возбужденный F -центр ($F^+ + e \rightarrow F$).



Рис. 3. Схематическое изображение процессов поглощения и испускания F - и F^+ -центров в оксиде алюминия

Можно предположить, что наличие полосы в спектре люминесценции с максимумом около 390 нм, обусловлено F^+ -центрами. При этом F^+ -центры, вероятно, присутствуют и в пленках, сформированных в щавелевокислом электролите. Наличие таких центров подтверждается присутствием коротковолнового плеча рядом с интенсивной полосой около 470–480 нм в спектрах 1 и 2 на рис. 2. Вместе с тем снижение интенсивности фотолюминесценции для отожженного образца (кривая 2) больше, чем для образца без термообработки (кривая 1) позволяет предполагать уменьшение в нем количества анионов электролита COOH и $(\text{C}_2\text{O}_4)^{2-}$ в структуре АОА. В силу специфики формирования анодных окисных пленок алюминия их оптические свойства существенно зависят от вида и количества

содержащихся в них примесей. Основными адсорбируемыми на поверхности оксида примесями являются молекулы H_2O и OH -групп.

На рис. 4 приведены ИК-спектры рассматриваемых выше образцов АОА. Широкая интенсивная полоса поглощения $2800\text{--}3700\text{ см}^{-1}$ в спектре пленки, сформированной в электролите серной кислоты, связана с валентными колебаниями OH -групп. Как видно, для остальных образцов АОА количество адсорбированных на поверхности примесей H_2O/OH незначительно. Интенсивный пик поглощения около 2350 см^{-1} , как правило, относят к колебаниям CO_2 в решетке оксида алюминия и, следовательно, он проявляется только при использовании электролитов с органическими кислотами. Как правило, область $1300\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ характерна для проявления колебаний различных карбонатно-карбоксилатных структур, в том числе анионов $(C_2O_4)^{2-}$, симметричным и асимметричным колебаниям которых соответствуют полосы поглощения с частотами 1480 и 1600 см^{-1} . Встраивание анионов электролита $COOH^-$ и $(C_2O_4)^{2-}$ в структуру оксида происходит в процессе формирования пористых слоев АОА. После их высокотемпературной обработки основной формой примеси в АОА является CO_2 . В ИК-спектре отожженного образца 2 поглощение в целом несколько меньше, чем в спектре образца без термообработки.

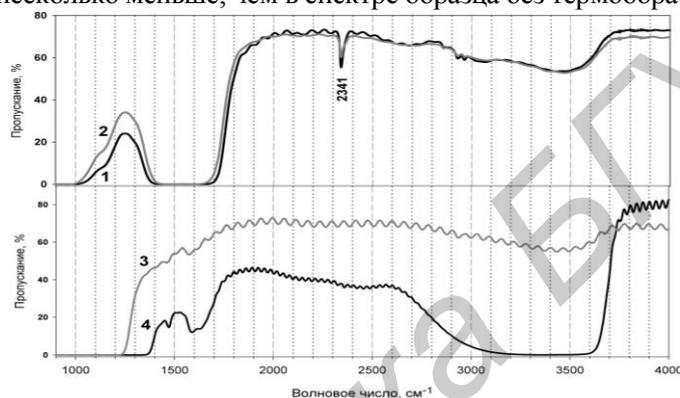


Рис. 4. ИК-спектры подложек, сформированных в электролитах с $H_2C_2O_4$ (1), $H_2C_2O_4$ + отжиг (2), H_3PO_4 (3) и H_2SO_4 (4)

Для выяснения влияния остатков щавелевого электролита на фотолюминесценцию АОА исследованы алюмооксидные структуры, полученные в смеси двух электролитов до и после термообработки при $900\text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 5 показаны спектры образцов, полученных в щавелевокислом электролите с добавлением малых количеств серной кислоты. Как видно из сравнения спектра 1 на данном рисунке со спектром 1 на рис. 2, добавление в щавелевокислый электролит серной кислоты приводит к смещению основного максимума люминесценции к 435 нм . Это приводит к формированию АОА как с анионами $COOH^-$ и $(C_2O_4)^{2-}$, так и с $(SO_4)^{2-}$. В результате концентрация анионов щавелевой кислоты уменьшается при сохранении концентрации F^+ -центров, что обуславливает изменение спектра люминесценции и уменьшение ее интенсивности.

После высокотемпературной обработки спектры люминесценции АОА (кривая 2) становятся похожи на спектры образцов, полученных с неорганическими кислотами с одним максимумом люминесценции на длине волны 390 нм . Таким образом, добавление в щавелевый электролит серной кислоты и последующая термообработка приводят к исчезновению основной полосы люминесценции (максимум на 435 нм), что может быть объяснено результатом термического разложения карбонатно-карбоксилатных групп в γ -АОА.

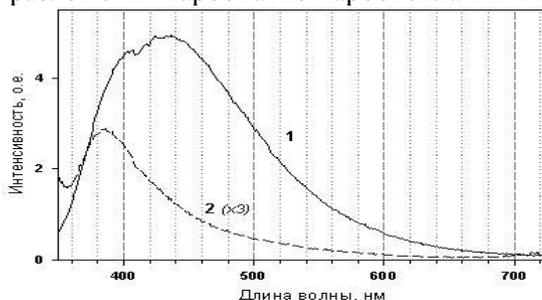


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции образцов, полученных в щавелевокислом электролите с добавкой серной кислоты ($4\% H_2C_2O_4 + 0,4\% H_2SO_4$) (1) и с последующим отжигом (2)

Заключение

Фотолюминесценция анодного оксида алюминия, сформированного в щавелевокислом электролите, определяется действием двух факторов. Первый связан со встроенными в оксид алюминия в процессе анодирования карбоксильными группами, которые ответственны за излучение с пиком полосы около 470 нм. Вторая полоса фотолюминесценции с максимумом на 390 нм определяется вакансиями кислорода (F^+ -центрами).

Результаты исследования оптических характеристик предопределяют выбор оптимальных условий формирования подложек АОА для их использования в качестве основы пороговых сенсоров рентгеновского и УФ-излучений. Поскольку люминесцентный фон от АОА может вносить значительный вклад в спектры излучения в видимом диапазоне длин волн, для формирования АОА матриц необходимо проводить их отжиг при температурах ≤ 800 °С для существенного снижения интенсивности фотолюминесценции.

THE OPTICAL PROPERTIES OF ANODIC ALUMINA SUBSTRATES AS THE BASIS OF THRESHOLD DETECTORS

I.V. GASENKOVA, N.I. MUKHUROV, Ya. M. VANIION

Abstract

The results of optical and photoluminescence properties of anodic alumina formed in the acidic electrolyte and subjected to high-temperature heat treatment are described in article. It was found that the photoluminescence properties of anodic alumina determined by the oxygen vacancies with different values of the charge states and impurities in the form of acid residues. As a basis of threshold detectors in terms of the mechanical strength the substrates formed in the oxalic electrolyte and modified by heat treatment at 800 °C are preferred.

Keywords: anodic alumina, acidic electrolyte, high-temperature heat treatment, optical and photoluminescence properties.

Список литературы

1. *Mukhurov N.I. Gasenkova I.V., Belyi V.N.* // Proc. Sixth European Workshop on Structural Health Monitoring. Dresden, July 3–6, 2012. P. 400–407.
2. *Лыньков Л.М., Мухуров Н.И.* Микроструктуры на основе анодной алюмооксидной технологии. Минск, 2002.
3. *Sulka G.D.* // Nanostructured Materials in Electrochemistry / Edited by Ali Eftekhari. Weinheim, 2008. P. 1–116.
4. *Мухуров Н.И. Гасенкова И.В., Остапенко Е.В.* // Материалы Междунар. НПК «Оптика неоднородных структур» Могилев, 16–17 февраля 2011 г. С. 109–112.
5. *Photoluminescence: Applications, types and efficacy* / Ed. Merle A. Case, Bradford C. Stout. New York, 2012.
6. *Гасенкова И.В. Лыньков Л.М., Мухуров Н.И. и др.* // Докл. БГУИР. 2013. № 8 (78). С. 108–111.
7. *Томашиов Н.Д., Тюкина М.Н., Заливалов Ф.П.* Толстослойное анодирование алюминия и его сплавов. М., 1968.
8. *Мухуров Н.И.* Алюмооксидные микро- наноструктуры для микроэлектромеханических систем. Минск, 2004.
9. *Мухуров Н.И., Сидоренко Г.А., Мардилович П.П., Лысенко Г.Н.* Способ получения диэлектрических деталей для высокотемпературных ВИС / Авторское свидетельство СССР № 1762334.
10. *Chen J.H., Huang C.P., Chao C.G. et. al.* // Appl. Phys A. 2006. № 84. P. 297.
11. *Nee T.-E., Fang C.-H., Chen Y.-R. et. al.* // Thin Solid Films. 2009. Vol. 518, № 5. P. 1439–1442.
12. *Кортов В.С.* // ФТТ. 2003. Т. 45, вып. 7. С. 1202–1208.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.371: 550.837.6

ВЛИЯНИЕ МНОГОСЛОЙНОСТИ СРЕДЫ НА ПРОЦЕСС ОБНАРУЖЕНИЯ
УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

Е.Ю. ЗАЯЦ, В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 18 февраля 2016*

Приведены результаты и анализ влияния многослойности исследуемой среды на процесс обнаружения углеводородных залежей.

Ключевые слова: анизотропная среда плазмopodobного типа, многослойность среды, углеводороды, импульсный сигнал.

Введение

Задача поиска и оконтуривания углеводородных залежей усложняется условиями формирования и большой глубиной залегания. Представим среду над углеводородной залежью в виде анизотропной среды плазмopodobного типа (АСПТ) [1], физические свойства которой зависят от направления (среда, которая для разных направлений электрического поля имеет разную диэлектрическую проницаемость) и характеризуются электродинамическими параметрами наполнителя и компонентами потока частиц. Плазмopodobность исследуемой среды обусловлена наличием свободных носителей электрического заряда, создающих при своем движении в среде электрические и магнитные поля, которые искажают внешние поля и влияют на характер движения самих носителей заряда. Одной из особенностей формирования АСПТ в естественных условиях является чередование почвенных слоев над залежью, что влияет на выбор электрических характеристик применяемой аппаратуры и эффективность разрабатываемых методов поиска и оконтуривания протяженных анизотропных образований. При рассмотрении вопроса о распространении электромагнитных волн в многослойной анизотропной среде плазмopodobного типа следует учитывать не только многослойность, но и анизотропию свойств среды над залежью.

Методика эксперимента

При рассмотрении АСПТ в виде многослойной среды было проведено моделирование процесса взаимодействия ИС с данной средой. Пусть АСПТ состоит из двух слоев (слой 1 и слой 2, рис. 1) с толщиной $h_2 = 120$ и $h_3 = 50$ м соответственно. Диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость для первого слоя принята $\epsilon_1 = 15$, $\sigma_1 = 0,05$, что соответствует глинистой влажной почве; для второго слоя $\epsilon_1 = 3$, $\sigma_1 = 0,00025$, что соответствует глинистой почве сухой [2].

Входной импеданс на верхней границе слоя в общей форме записывается [2]

$$Z_{\Sigma} = \frac{(Z_{n+1} + Z_n) + (Z_{n+1} - Z_n)e^{-2\gamma_n h_n}}{(Z_{n+1} + Z_n) - (Z_{n+1} - Z_n)e^{-2\gamma_n h_n}} \cdot Z_n, \quad (1)$$

где n – количество слоев; $\dot{\gamma}$ – постоянная распространения волны; h_n – толщина n -го слоя; Z_n – входной импеданс.

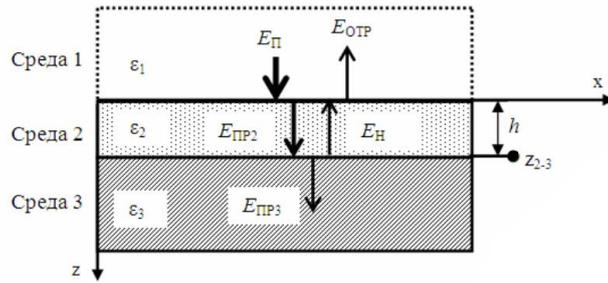


Рис. 1. Фрагмент слоистой среды и отражения электромагнитной волны

Коэффициент отражения горизонтально поляризованной волны АСПТ с данными параметрами имеет вид [2]

$$R_{\Sigma} = \frac{R_{1-2} + w \cdot e^{-2\gamma_2 h_2}}{1 + R_{1-2} \cdot w \cdot e^{-2\gamma_2 h_2}} \quad (2)$$

Так как

$$-j\gamma_2 h = \left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \sqrt{\epsilon'} = \frac{2\pi h}{\lambda} \sqrt{\tilde{n}} \quad (3)$$

где n – комплексный показатель преломления, то коэффициент отражения преобразуется к виду

$$R_{\Sigma} = \frac{R_{1-2} + w \cdot e^{\frac{-j4\pi h_2}{\lambda_1 \sqrt{n_2}}}}{1 + R_{1-2} \cdot w \cdot e^{\frac{-j4\pi h_2}{\lambda_1 \sqrt{n_2}}}} \quad (4)$$

Здесь

$$w = \frac{R_{2-3} + R_{3-4} \cdot e^{\frac{-j4\pi h_3}{\lambda_2 \sqrt{n_3}}}}{1 - R_{2-3} \cdot R_{3-4} \cdot e^{\frac{-j4\pi h_3}{\lambda_2 \sqrt{n_3}}}} \quad (5)$$

где R_{1-2} – коэффициент отражения от первого слоя; R_{2-3} – коэффициент отражения от второго слоя; R_{3-4} – коэффициент отражения от третьего слоя; λ_1, λ_2 – длина волны в первом и втором слоях; h_2, h_3 – толщина первого и второго слоев соответственно; n_2, n_3 – комплексный показатель преломления.

На рис. 2–4 представлены результаты моделирования процесса воздействия импульсного сигнала на анизотропную многослойную среду плазмopodobного типа.

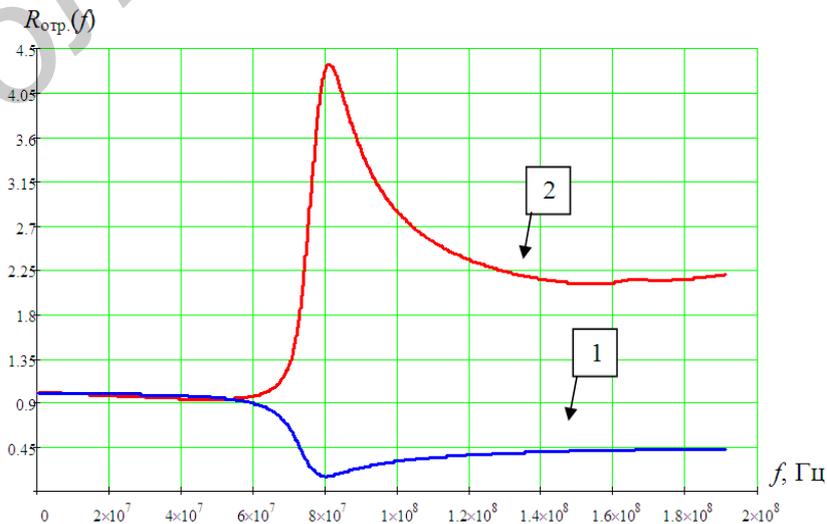


Рис. 2. Коэффициент отражения $R_{отр}(f)$ от АСПТ: 1 – однослойной, 2 – многослойной

Коэффициент отражения для однослойной среды экспоненциально убывает с ростом частоты. Характеристика коэффициента отражения многослойной среды является резонансной.

При сравнении коэффициентов отражения (рис. 1) для однослойной и многослойной сред установлено, что на частотах ниже $6 \cdot 10^7$ Гц значения коэффициентов отражения совпадают. С увеличением частоты трансформации коэффициента отражения увеличивается и достигает максимума различия на частоте $8 \cdot 10^7$ Гц.

Амплитудный спектр отраженного от АСПТ сигнала от однослойной и многослойной АСПТ (рис. 3) характеризуется отличием уровня амплитуды и боковых лепестков. Наблюдается аномальный скачок уровня боковых лепестков на частоте от $5 \cdot 10^7$ Гц до $1 \cdot 10^8$ Гц.

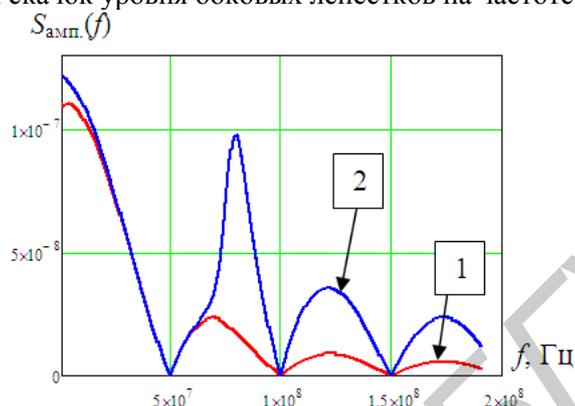


Рис. 3. Амплитудный спектр $S_{\text{амп.}}(f)$ отраженного сигнала от однослойной (1) и многослойной (2) АСПТ

Отраженный от АСПТ импульсный сигнал для многослойной среды отличается от однослойной среды амплитудой и размытостью (рис. 4).

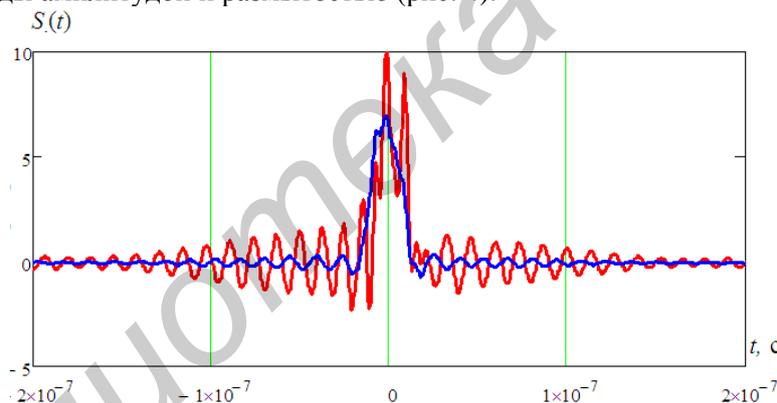


Рис. 4. Отраженный сигнала $S(t)$ от АСПТ: 1 – однослойной, 2 – многослойной

Анализ сравнения процесса воздействия импульсного сигнала на однослойную и многослойную АСПТ выявил значительные отличия коэффициентов отражения и амплитудных спектров отраженных сигналов, что требует учета параметров слоистости среды при ведении разведки методами, основанными на учете данных параметров.

Заключение

Впервые проведено моделирование воздействия импульсного сигнала с многослойной средой над УВЗ. Коэффициенты отражения для однослойной и многослойной АСПТ различны, соответственно амплитудный спектр отраженных сигналов также будет отличаться.

При разработке и применении на практике методов, основанных на различии амплитудных спектров отраженных от АСПТ сигналов, следует учитывать многослойность исследуемой среды.

INFLUENCE OF MULTILAYERED ENVIRONMENT ON THE HYDROCARBON DEPOSITS DETECTION PROCESS

E.Y. ZAYATS, V.F. YANUSHKEVICH

Abstract

The results and analysis of the impact of multilayered study environment on the process of discovery hydrocarbon deposits.

Keywords: anisotropic environment from plasma-like type, environment multilayered hydrocarbon, pulse signal.

Список литературы

1. *Москвичев В.Н.* / Радиотехника и электроника. 1989. Вып. 18. С. 91–96.
2. *Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золоторёв В.П.* Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М., 1986.

УДК 621.391

МЕТОДИКА УГЛОВОГО ОПТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

В.А. БОГУШ

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

Поступила в редакцию 26 февраля 2016

Предложена методика углового оптического сканирования плоских поверхностей с субпиксельной обработкой изображений, полученных с фотоприемной КМОП-матрицы сканера.

Ключевые слова: оптическое сканирование, субпиксельная обработка.

Введение

Для развития технологий технического зрения актуальна проблема повышения разрешения изображений, формируемых в результате оптического сканирования. Известные методы и алгоритмы решения данной проблемы не учитывают особенности построения систем оптического сканирования (считывание изображений с плоских поверхностей, возможность согласования моментов считывания фотоприемной КМОП-матрицы с ее ориентацией относительно направления и скоростью перемещения оптоэлектронной системы). В качестве исходных данных в этих методах рассматривается одно изображение, либо несколько изображений, относительный пиксельный сдвиг между которыми точно неизвестен (не нормирован) [1–5]. В этой связи актуальна задача разработки методики оптического сканирования плоских поверхностей и субпиксельной обработки формируемых изображений, учитывающих данные особенности.

Угловое сканирование плоских поверхностей с последующей субпиксельной обработкой

В основе методики оптического сканирования плоских поверхностей предлагается использовать управление угловой ориентацией фотоприемной КМОП-матрицы для обеспечения возможности считывания изображения одного и того же участка плоской поверхности с различных частей фотоприемной КМОП-матрицы с некоторым полупиксельным смещением по вертикали и горизонтали. Моменты времени считывания изображений с фотоприемной матрицы могут быть выбраны таким образом, что энергия, сосредоточенная в каждом пикселе изображения, считанного с фотоприемной матрицы в один момент времени, равномерно распределится по четырем пикселям изображения, считанного в другой момент времени. Это дает возможность получения изображения высокого разрешения в результате субпиксельной обработки двух изображений низкого разрешения, полученных в различные моменты времени в результате углового сканирования, на основе алгоритма доменной интерполяции.

Если второе изображение сдвинуто относительно первого изображения влево и вверх на полпикселя, алгоритм субпиксельной обработки двух изображений низкого разрешения на основе доменной интерполяции состоит из следующих шагов.

1. Обработка первого исходного изображения низкого разрешения.

1.1. Выбор пикселя $i_1(y, x)$ первого исходного изображения $I_1 = \|i_1(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$

низкого разрешения при $y = \overline{1, Y-2}$, $x = \overline{1, X-2}$.

1.2. Для пикселя $i_1(y, x)$ исходного изображения I_1 вычисляется суммарная яркость $S_1(y, x)$ соответствующего домена $\{i_2(y-1, x-1), i_2(y-1, x), i_2(y, x-1), i_2(y, x)\}$ второго исходного изображения $I_2 = \|i_2(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ с помощью выражения:

$$s_1(y, x) = \sum_{m=-1}^0 \sum_{n=-1}^0 i_2(y-m, x-n) \text{ при } y = \overline{1, Y-2}, x = \overline{1, X-2}.$$

1.3. Вычисляются значения пикселей домена $\{\tilde{i}_1(2y, 2x), \tilde{i}_1(2y+1, 2x), \tilde{i}_1(2y, 2x+1), \tilde{i}_1(2y+1, 2x+1)\}$ первого промежуточного изображения $\tilde{I}_1 = \|\tilde{i}_1(y, x)\|_{(y=0, \overline{2Y-1}, x=0, \overline{2X-1})}$ с помощью выражения $\tilde{i}_1(2y+m, 2x+n) = 4i_1(y, x) \frac{i_2(y-1+m, x-1+n)}{s_1(y, x)}$ при $m = \overline{0, 1}, n = \overline{0, 1}, y = \overline{1, Y-2}, x = \overline{1, X-2}$.

2. Обработка второго исходного изображения $I_2 = \|i_2(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ низкого разрешения канала (повторяются все шаги обработки первого исходного изображения I_1 для второго изображения I_2).

3. Попиксельное усреднение промежуточных изображений первого \tilde{I}_1 и второго \tilde{I}_2 с помощью выражения $\hat{i}(y, x) = \frac{\tilde{i}_1(y, x) + \tilde{i}_2(y, x)}{2}$ при $y = \overline{1, 2Y-1}, x = \overline{1, 2X-1}$.

В результате формируется изображение $\hat{I} = \|\hat{i}(y, x)\|_{(y=0, \overline{2Y-1}, x=0, \overline{2X-1})}$ повышенного разрешения (в пределе разрешение повышается до 2 раз). Вычислительная сложность данного алгоритма оценивается примерно в 27 операций на пиксель результирующего изображения.

Оценка эффективности углового сканирования плоских поверхностей с последующей субпиксельной обработкой

В таблице приведены значения среднеквадратической ошибки MSE, пикового отношения сигнал-шум PSNR и ненормированной ошибки E для исходного изображения высокого разрешения и результирующих изображений высокого разрешения, полученных с помощью алгоритмов доменной, линейной и бикубической интерполяции. Значения данных параметров определяются с помощью выражений $MSE = \frac{1}{YX} \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (i(y, x) - \hat{i}(y, x))^2$,

$PSNR = 10 \lg \left(\frac{255^2}{MSE} \right)$, $E = \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} |i(y, x) - \hat{i}(y, x)|$, где $i(y, x)$ – пиксели эталонного изображения, использованного для получения изображений низкого разрешения; $|\cdot|$ – операция по модулю.

Из таблицы следует, что доменная интерполяция обеспечивает уменьшение среднеквадратической ошибки примерно в 4 и 2 раза (увеличение отношения сигнал-шум примерно на 6 дБ и 2,5 дБ) по сравнению с линейной и бикубической интерполяцией соответственно.

Характеристики методов субпиксельной обработки

Метод интерполяции	MSE	PSNR	E
Доменная	48,33	31,29	779588,00
Линейная	204,78	25,02	1166396,00
Бикубическая	93,40	28,43	968598,00

Для оценки локализации ошибок на изображениях высокого разрешения, восстановленных из изображений низкого разрешения с помощью субпиксельной обработки, использованы гистограммы модулей разностей соседних пикселей по столбцам для исходного изображения и изображений, восстановленных с помощью доменной, линейной и

бикубической интерполяции (рис. 1). Гистограммы, приведенные на рис. 1, получены для 8-битных тестовых изображений с помощью схемы, показанной на рис. 2.

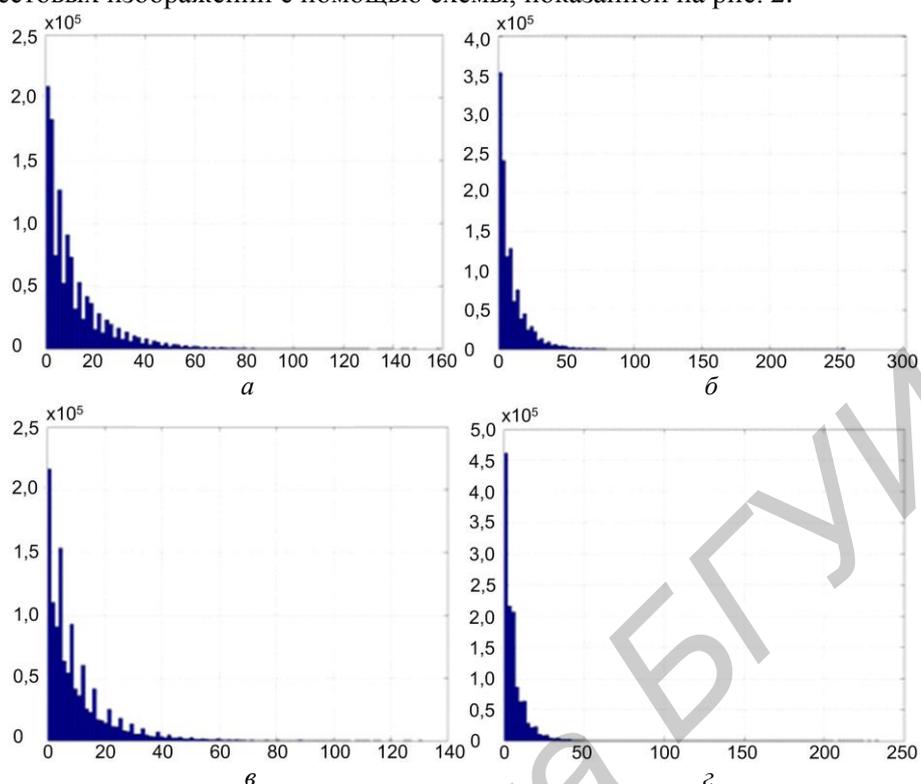


Рис. 1. Гистограммы модулей разностей соседних пикселей по столбцам для исходного изображения (а) и изображений, восстановленных с помощью доменной (б), линейной (в) и бикубической интерполяции (г) (по горизонтали – яркость пикселей, по вертикали – частота повторений)

Из рис. 1 следует, что доменная интерполяция приводит к наименьшему сглаживанию (увеличению мощности нулевых и близких к нулю компонент гистограмм разностей значений пикселей в столбцах и строках – увеличение числа нулевых компонент до 5 и 3 раз меньше по сравнению с усреднением и бикубической интерполяцией). Аналогичные результаты получаются для гистограмм модулей разностей соседних пикселей по строкам для изображений, восстановленных с помощью доменной, линейной и бикубической интерполяции.

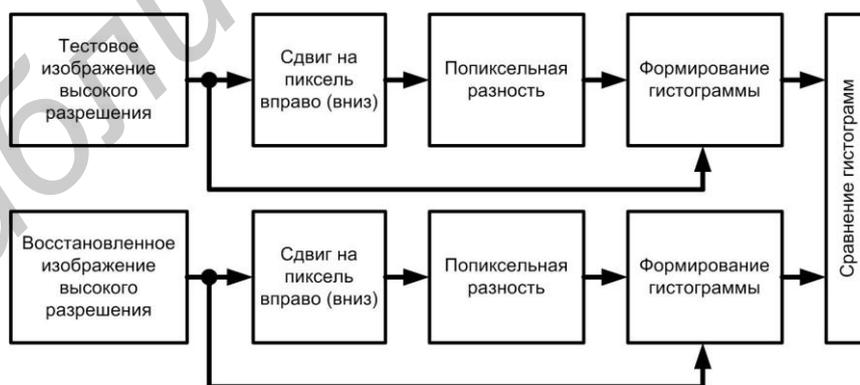


Рис. 2. Схема формирования гистограмм разностей

Заключение

Предложена методика углового оптического сканирования плоских поверхностей с управлением угловой ориентацией фотоприемной КМОП-матрицы для считывания изображения одного и того же участка плоской поверхности с различных частей фотоприемной

КМОП-матрицы с некоторым полупиксельным смещением по вертикали и горизонтали, обеспечивающим получение изображений высокого разрешения в результате субпиксельной обработки. Показано, что при использовании алгоритма субпиксельной обработки на основе доменной интерполяции обеспечивается уменьшение среднеквадратической ошибки примерно в 4 и 2 раза (увеличение отношения сигнал-шум примерно на 6 дБ и 2,5 дБ) по сравнению с линейной и бикубической интерполяцией соответственно.

METHOD OF THE ANGLE OPTICAL SCANNING OF THE FLAT SURFACES FOR THE TECHNICAL VISION SYSTEMS

V.A. BOGUSH

Abstract

The technique of the angle optical scan of the flat surfaces with sub-pixel processing of images obtained with the photodetector CMOS matrix scanner is proposed.

Keywords: optical scan, sub-pixel processing.

Список литературы

1. *Shinde S., Dewangan M.* // International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSSES). 2012. Vol. 3, № 2. P. 47–56.
2. *Chen W.A., Guo L., Xia W.* // Journal of computers. 2013. 2013. Vol. 8, № 8. P. 1893–1897.
3. *Irani M., Peleg S.* // Journal of Computer Vision, Graphics, and Image Processing. 1991. Vol. 53 (3). P. 231–239.
4. *Jiang Z., Wong T.T., Bao H.* // Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2003. Vol. 2. P. 549–554.
5. *Freeman W.T., Jones T.R., Pasztor E.C.* // IEEE Computer Graphics and Applications. 2002. Vol. 22 (2). P. 56–65.

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**. Ответственность за оригинальность и достоверность материалов, поданных в печать, несут авторы. 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 и английском языках; аннотацию на русском и английском языках (рекомендуемый объем – 500 печатных знаков). 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 *экспертное заключение о возможности опубликования материалов в печати* и сведения об авторах статьи, содержащие их фамилии, имена, отчества и контактные данные.

Количество страниц и иллюстраций: для оригинальной статьи – не более 7 страниц; для краткого сообщения – не более 4 страниц.

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 выполнять 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.

