

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2015

апрель–июнь

№ 2 (27)



Выходит четыре раза в год

ISSN 1727-2769

Учредители

*Академия наук высшей школы России
Новосибирское отделение Академии наук высшей школы*

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия)
А. Загоскин, PhD (Великобритания)
Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия)
М.Н. Клымаш, д-р техн. наук, проф. (Украина)
К. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук
И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф.
В.Г. Дубровский, д-р физ.-мат. наук, проф.
Б.А. Князев, д-р физ.-мат. наук, проф.
Г.В. Майер, д-р физ.-мат. наук, проф., засл. деятель науки РФ
В.К. Макуха, д-р техн. наук, проф.
В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф.
С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф.
Г.М. Шумский, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций в 2002 г. (свидетельство ПИ № 77-11517 от 04.01.2002 г.)

Адрес редакции: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 4, ком. 415,
телефон: (383) 346-15-37, факс: (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирское отделение АН ВШ, 2015 г.

**PROCEEDINGS
OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL
ACADEMY OF SCIENCES**

2015

April–June

№ 2 (27)



Journal is published quarterly

ISSN 1727-2769

Journal was established by

*Russian Higher Education Academy of Sciences
Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Sciences*

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia)
A. Zagoskin, PhD (United Kingdom)
E.V. Ilyichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany)
M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine)
K. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.)
I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.G. Dubrovsky, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
B.A. Knyazev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
G.V. Mayer, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation
V.K. Makukha, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof.
G.M. Shumsky, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc.(Eng.)

Editor Address: Office 415, 20 bld. 4, Karl Marx av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation.
Tel: +7 (383) 346-15-37. Fax: +7 (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Sciences, 2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Дубровский В.Г., Топовский А.В., Басалаев М.Ю.*
Решения с функциональными параметрами 2+1-мерных интегрируемых нелинейных уравнений. Двумерное интегрируемое обобщение уравнения Савады–Котера7

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Бернс В.А., Лысенко Е.А., Маринин Д.А., Долгополов А.В., Жуков Е.П.*
Идентификация дефектов летательных аппаратов по параметрам вибраций в процессе эксплуатации24
- Васюков В.Н., Зайцева А.Ю., Бондаренко В.В.*
Система раннего обнаружения лесных пожаров – архитектура и алгоритмы43
- Драгунов В.П., Доржиев В.Ю.*
Влияние параметров диодов на работу схемы ЭМГ на основе дубликатора Беннета57
- Иванов Б.И., Новиков И.Л., Щекин П.С., Ильичев И.В.*
Экспериментальное исследование разброса плотности критического тока в туннельных контактах Джозефсона69
- Нос О.В., Кучер Е.С., Бакляк А.В.*
Алгоритмы управления последовательно-параллельными активными силовыми фильтрами77
- Пальчикова И.Г., Латышов И.В., Васильев В.А., Кондаков А.В., Смирнов Е.С.*
Цветовой анализ цифровых изображений при производстве экспертных исследований следов выстрела88
- Петрова Ю.С., Спектор А.А.*
Комплексирование датчиков в многоканальной измерительной системе на основе инверсной и винеровской фильтрации102

Подрезов Р.В. Многовыборочная ранговая сегментация изображений	110
Тимофеева А.Ю., Хайленко Е.А. Устойчивое оценивание параметров структурных зависимостей в задаче анализа успеваемости	117
Филатова С.Г. Оценка длительностей импульсов в сейсмическом сигнале от шагов человека.....	128

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Dubrovsky V.G., Topovsky A.V., Basalaev M.Yu.***
Solutions with functional parameters of 2+1-dimensional
integrable nonlinear equations. Two-dimensional integrable
generalization of the Sawada-Kotera equation.....7
-

TECHNICAL SCIENCES

- Berns V.A., Lysenko E.A., Marinin D.A., Dolgoplov A.V.,
Zhukov E.P.***
Aircraft defect identification by vibration parameters in operation24
- Vasyukov V.N., Zaitseva A.Yu., Bondarenko V.V.***
Early forest fire detection system – configuration and algorithms.....43
- Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu.*** Influence of diodes parameters
on the operation of e-veh circuit based on benet’s doubler.....57
- Ivanov B.I., Novikov I.L., Shchekin P.S., Il’ichev E.V.,
Vostretsov A.G.*** Experimental study of a critical current density
spread in josephson tunnel junctions.....69
- Nos O.V., Kucher E.S., Baklyak A.V.***
Control strategies of the series–shunt active power filters.....77
- Palchikova I.G., Latyshov I.V., Vasil'ev V.A., Kondakov A.V.,
Smirnov E.S.***
Color analysis of digital images in expert judgement of shot's trace88
- Petrova Yu.S. Spector A.A.***
Sensor integration in a multichannel measurement system based
on inverse or Wiener filtering 102
- Podrezov R.V.***
Multisample rank-based image segmentation110

Timofeeva A.Yu., Khailenko E.A.

Robust estimation of structural model parameters in application
to students' progress analysis.....117

Filatova S.G.

Pulse length estimation of seismic signal of human steps.....128

УДК 530.182; 517.957

РЕШЕНИЯ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ 2+1-МЕРНЫХ ИНТЕГРИРУЕМЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ. ДВУМЕРНОЕ ИНТЕГРИРУЕМОЕ ОБОБЩЕНИЕ УРАВНЕНИЯ САВАДЫ–КОТЕРА**В.Г. Дубровский, А.В. Топовский, М.Ю. Басалаев***Новосибирский государственный технический университет*

В 1967 году был открыт метод точного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений – метод обратной задачи рассеяния (МОЗР). Ключевой идеей МОЗР является сопоставление интегрируемому нелинейному уравнению линейных вспомогательных задач, интегрируемое нелинейное уравнение при этом представляется как условие совместности соответствующих линейных вспомогательных задач. Первоначально МОЗР был применен к интегрированию одномерных нелинейных эволюционных уравнений с временной и одной пространственной переменными. Сфера применимости МОЗР стремительно расширилась, помимо одномерных интегрируемых нелинейных дифференциальных уравнений оказались интегрируемыми и некоторые двумерные нелинейные эволюционные дифференциальные уравнения с временной и двумя пространственными переменными, такие как уравнение Кадомцева–Петвиашвили, уравнение Дэви–Стюардсона, уравнения Нижника–Веселова–Новикова и т. д. В настоящее время нелокальная проблема Римана–Гильберта, $\bar{\partial}$ -проблема и более общий метод $\bar{\partial}$ -одевания Захарова–Манакова, использующие современные методы теории функции комплексного переменного, являются основными инструментами для построения точных решений (2+1)-мерных интегрируемых нелинейных эволюционных уравнений. В данной работе метод $\bar{\partial}$ -одевания Захарова–Манакова применен к построению новых классов точных решений двумерного интегрируемого обобщения нелинейного уравнения Савады–Котера (2ДСК). Уравнение 2ДСК является специальной редукцией более общей системы нелинейных уравнений для некоторых полевых переменных. Показано, как эта редукция может быть выполнена с помощью удовлетворения нелинейных ограничений на коэффициенты разложения волновой функции χ линейных вспомогательных задач. Получены новые классы точных решений с функциональными параметрами уравнения 2ДСК, содержащие в виде подклассов солитонные и периодические решения. На примере уравнения 2ДСК продемонстрирована принципиальная возможность построения точных периодических решений двумерных нелинейных уравнений в рамках метода $\bar{\partial}$ -одевания Захарова–Манакова.

Ключевые слова: интегрируемые нелинейные уравнения, метод $\bar{\partial}$ -одевания, двумерное интегрируемое обобщение уравнения Савады–Котера (2ДСК), решения с функциональными параметрами, периодические решения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-7-23

Введение

За последние тридцать пять лет метод обратной задачи рассеяния (МОЗР) был обобщен и успешно применен к различным 2+1-мерным нелинейным эволюционным уравнениям, таким как уравнения Кадомцева–Петвиашвили, Дэви–Стюардсона, Нижника–Веселова–Новикова (НВН), система Захарова–Манакова, уравнение Ишимори, двумерное обобщение уравнения Синус–Гордон и к некоторым другим уравнениям (см. книги [6–9] и обзоры [15–17]). В настоящее время нелокальная проблема Римана–Гильберта [10], $\bar{\partial}$ -проблема [11] и более общий метод

$\bar{\partial}$ -одевания Захарова–Манакова [12–14] являются основными инструментами для построения точных решений 2+1-мерных интегрируемых нелинейных эволюционных уравнений.

В данной статье, представляющей результаты второй части нашей работы, метод $\bar{\partial}$ -одевания применяется к построению новых классов точных решений с функциональными параметрами и их частных подклассов, солитонных и периодических решений двумерного интегрируемого обобщения уравнения Савады–Котера (2DCK) [18],

$$u_t + u_{xxxxx} + 5u_x u_{xx} + 5uu_{xxx} + 5u^2 u_x + 5u_{xxy} - 5\bar{\partial}_x^{-1} u_{yy} + 5uu_y + 5u_x \bar{\partial}_x^{-1} u_y = 0. \quad (1)$$

Уравнение 2DCK было установлено в статье Конопельченко и Дубровского [18]. Это уравнение известно также как член ВКР иерархии [19]. Уравнение 2DCK может быть представлено как условие совместности в форме Лакса $[L_1, L_2] = 0$ линейных операторов вспомогательных задач, ему соответствуют следующие две линейные вспомогательные задачи [18]:

$$L_1 \psi = (\partial_x^3 + u \partial_x + \partial_y) \psi = 0, \quad (2)$$

$$L_2 \psi = [\partial_t - 9\partial_x^5 - 15u \partial_x^3 - 15u_x \partial_x^2 - (10u_{xx} + 5u^2 - 5\bar{\partial}_x^{-1} u_y) \partial_x] \psi = 0.$$

Здесь и ниже $\bar{\partial}_x \equiv \partial / \partial x, \dots$ и $\bar{\partial}_x^{-1}$ – оператор обратный $\bar{\partial}_x$.

Первая вспомогательная задача в (2) является линейным дифференциальным уравнением третьего порядка по $\bar{\partial}_x$, содержащим лишь одну полевою переменную. В общем же положении эта задача содержит несколько переменных коэффициентов (полевых переменных) при различных степенях $\bar{\partial}_x$. Уравнение 2DCK (1) возникает из некоторой системы нелинейных уравнений для полевых переменных при специальных редукциях на эти переменные. Удовлетворение этих редукций является наиболее трудной частью при построении точных решений рассматриваемого уравнения.

Схема построения точных решений с функциональными параметрами для 2+1-мерных интегрируемых уравнений была развита в известных работах Захарова и Шабата [2], [20] (см. также книгу [5]); где авторы применили свой вариант метода одевания для построения решений с функциональными параметрами уравнения КП.

Настоящая работа является естественным продолжением статей [21] и [24], в [21] метод $\bar{\partial}$ -одевания был впервые применен для построения многосолитонных решений, а в [24] были анонсированы первые результаты по решениям с функциональными параметрами уравнений 2DKK (двумерного интегрируемого обобщения уравнения Каупа Купершмидта) и 2DCK (1), здесь же приводятся достаточно подробные вычисления для случая уравнения 2DCK (1). Частные точные решения рассматриваемого уравнения были построены ранее и в рамках других подходов (см., например, [13]). Применение метода $\bar{\partial}$ -одевания в нестандартных ситуациях, когда приходится удовлетворять редукциям на полевые переменные, а в конечном счете определенным нелинейным дифференциальным ограничениям (см. [21] и ниже) на коэффициенты разложения волновой функции по спектральному параметру, по нашему мнению, представляет значительный интерес для развития данного метода.

Статья организована следующим образом. Во втором разделе приводятся для удобства основные формулы метода $\bar{\partial}$ -одевания для уравнения 2DCK (1). В третьем разделе представлены новые классы точных решений с функциональными параметрами, вычисленные в данной работе для уравнения 2DCK (1). В разделе 4 рассмотрены частные случаи построенных решений с функциональными параметрами – периодические решения уравнения 2DCK (1).

1. Основные формулы метода $\bar{\partial}$ -одевания для уравнений 2DCK

В этом разделе приведены некоторые важные для дальнейшего изложения формулы метода $\bar{\partial}$ -одевания для уравнения 2DCK (1) (см. детали в [21]), отметим, что формулы (3)–(10), приведенные ниже, справедливы и для уравнения 2DKK (см. [21]).

Сначала постулируется нелокальная $\bar{\partial}$ -проблема [12–14] для волновой функции χ :

$$\frac{\partial \chi(\lambda, \bar{\lambda})}{\partial \lambda} = (\chi * R)(\lambda, \bar{\lambda}) = \iint_C \chi(\mu, \bar{\mu}) R(\mu, \bar{\mu}; \lambda, \bar{\lambda}) d\mu \wedge d\bar{\mu}, \quad (3)$$

где χ и R , в рассматриваемом случае, скалярные комплексные функции. Используется решение $\bar{\partial}$ -проблемы с канонической нормировкой, $\chi \rightarrow 1$ при $\lambda \rightarrow \infty$, эквивалентное решению следующего сингулярного интегрального уравнения:

$$\chi(\lambda) = 1 + \iint_C \frac{d\lambda' \wedge d\bar{\lambda}'}{2\pi i(\lambda' - \lambda)} \iint_C \chi(\mu, \bar{\mu}) R(\mu, \bar{\mu}; \lambda', \bar{\lambda}') d\mu \wedge d\bar{\mu}. \quad (4)$$

Зависимость ядра R $\bar{\partial}$ -проблемы от пространственных и временных переменных x, y, t для уравнения 2DCK (1) имеет вид [21]:

$$R(\mu, \bar{\mu}; \lambda, \bar{\lambda}; x, y, t) = R_0(\mu, \bar{\mu}; \lambda, \bar{\lambda}) e^{F(\mu) - F(\lambda)}, \quad (5)$$

$$F(\lambda) := i(\lambda x + \lambda^3 y + 9\lambda^5 t).$$

Далее рассматриваемому нелинейному уравнению сопоставляются линейные вспомогательные задачи, которые имеют вид:

$$L_1 \psi = (\partial_y + \partial_x^3 + u \partial_x + u_0) \psi = 0, \quad (6)$$

$$L_2 \psi = (\partial_t - 9\partial_x^5 + w_3 \partial_x^3 + w_2 \partial_x^2 + w_1 \partial_x + w_0) \psi = 0,$$

а волновая функция ψ связана с волновой функцией χ соотношением $\psi := \chi e^{F(\lambda; x, y, t)}$ [21].

Формулы реконструкции выражают полевые переменные вспомогательных задач (6) через коэффициенты разложений волновой функции χ в ряды в окрестностях точек $\lambda = 0$ и $\lambda = \infty$:

$$\lambda = 0: \quad \chi = \chi_0 + \chi_1 \lambda + \chi_2 \lambda^2 + \dots; \quad \lambda = \infty: \quad \chi = \chi_\infty + \frac{\chi_{-1}}{\lambda} + \frac{\chi_{-2}}{\lambda^2} + \dots \quad (7)$$

Так, например, для полевых переменных первой вспомогательной задачи формулы реконструкции имеют вид [21]

$$u_0 = -3i\chi_{-1xx} + 3\chi_{-2x} - 3\chi_{-1}\chi_{-1x}; \quad u = -3i\chi_{-1x}, \quad (8)$$

где коэффициенты χ_{-1} и χ_{-2} разложений (7), даются выражениями

$$\chi_{-1} = -\iint_C \frac{d\lambda \wedge d\bar{\lambda}}{2\pi i} \iint_C \chi(\mu, \bar{\mu}) R(\mu, \bar{\mu}; \lambda, \bar{\lambda}) d\mu \wedge d\bar{\mu}, \quad (9)$$

$$\chi_{-2} = -\iint_C \frac{\lambda d\lambda \wedge d\bar{\lambda}}{2\pi i} \iint_C \chi(\mu, \bar{\mu}) R(\mu, \bar{\mu}; \lambda, \bar{\lambda}) d\mu \wedge d\bar{\mu}. \quad (10)$$

Как было показано в статье [18], уравнению 2DCK (1) соответствует редукция:

$$u_0 = 0. \quad (11)$$

(Отметим, что уравнению 2DKK соответствует редукция $u_0 = \frac{1}{2}u_x$, см. [21].)

В терминах волновой функции χ редукция (11) с учетом (8) может быть представлена как нелинейное дифференциальное соотношение на коэффициенты χ_{-1} и χ_{-2} [21]:

$$\chi_{-2x} - i\chi_{-1xx} - \chi_{-1}\chi_{-1x} = 0. \quad (12)$$

Формулы реконструкции для полевых переменных второй вспомогательной задачи из (6), с учетом (8) и редукции (11), для уравнения 2DCK (3) имеют вид [21]:

$$\begin{aligned} w_1 &= -10u_{xx} + 5\partial_x^{-1}u_y - 5u^2, \\ w_2 &= -15u_x, \quad w_3 = -15u, \quad w_0 = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

При построении точных решений уравнения 2DCK (1) необходимо удовлетворить условиям редукций (11) или (12) и вещественности $u = \bar{u}$. Условие вещественности решений u рассматриваемого нелинейного уравнения, в силу (9) и (10), в пределе слабых полей приводит к следующим ограничениям на ядро R_0 $\bar{\partial}$ -проблемы (4) [21]:

$$R_0(\mu, \bar{\mu}; \lambda, \bar{\lambda}) = \overline{R_0(-\bar{\mu}, -\mu; -\bar{\lambda}, -\lambda)}; \quad R_0(\mu, \bar{\mu}; \lambda, \bar{\lambda}) = \overline{R_0(\bar{\lambda}, \lambda; \bar{\mu}, \mu)}. \quad (14)$$

Решениям с функциональными параметрами соответствуют вырожденные ядра R_0 $\bar{\partial}$ -проблемы (3), т. е. ядра вида

$$R_0(\mu, \bar{\mu}, \lambda, \bar{\lambda}) = \pi \sum_{n=1}^N f_n(\mu, \bar{\mu}) g_n(\lambda, \bar{\lambda}), \quad (15)$$

представляющие собой сумму произведений двух функций $f_n(\mu, \bar{\mu})$ и $g_n(\lambda, \bar{\lambda})$ спектральных переменных μ и λ . Эти функции называются функциональными параметрами в спектральном представлении.

При выборе вырожденного ядра в виде (15) из (9) и (10) получаются следующие компактные формулы для коэффициентов χ_{-1} , χ_{-2} разложения волновой функции χ :

$$\chi_{-1} = -\frac{1}{2i} \sum_{l,k=1}^N A_{kl}^{-1} \alpha_l \beta_k, \quad \chi_{-2} = -\frac{1}{2} \sum_{l,k=1}^N A_{kl}^{-1} \alpha_l \beta_{kx}, \quad (16)$$

где матрица A дается выражением

$$A_{ln} \doteq \delta_{ln} + \frac{1}{2} \partial_x^{-1} \alpha_l \beta_n. \quad (17)$$

Здесь функции $\alpha_l(x, y, t)$, $\beta_l(x, y, t)$, известные как функциональные параметры в координатном представлении, даются формулами

$$\begin{aligned} \alpha_l(x, y, t) &\doteq \iint_C f_l(\mu, \bar{\mu}) e^{F(\mu)} d\mu \wedge d\bar{\mu}; \\ \beta_l(x, y, t) &\doteq \iint_C g_l(\lambda, \bar{\lambda}) e^{-F(\lambda)} d\lambda \wedge d\bar{\lambda}. \end{aligned} \quad (18)$$

Вследствие (5) и своих определений (18) функциональные параметры α_n и β_n для случая уравнения 2DCK (1) удовлетворяют линейным уравнениям:

$$\alpha_{ny} + \alpha_{nxxx} = 0, \quad \alpha_{nt} + \alpha_{nxxxx} + 5\alpha_{nxy} - 5\partial_x^{-1} \alpha_{ny} = 0, \quad (19)$$

$$\beta_{ny} + \beta_{nxx} = 0, \quad \beta_{nt} + \beta_{nxxxx} + 5\beta_{nxy} - 5\partial_x^{-1} \beta_{ny} = 0. \quad (20)$$

Приведем полезные для дальнейшего детерминантные формулы для невырожденной матрицы A и вырожденной матрицы B с рангом единица:

$$\operatorname{tr} \left(\frac{\partial A}{\partial x} A^{-1} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \ln(\det A), \quad \operatorname{tr}(BA^{-1}) = \frac{\det(A+B)}{\det A} - 1, \quad 1 + \operatorname{tr} B = \det(1+B), \quad (21)$$

очевидно, матрица BA^{-1} в (21), как и B , является вырожденной с рангом единица. С использованием первой формулы из (21) находим из (16) для χ_{-1} выражение:

$$\chi_{-1} = -\frac{1}{2i} \sum_{l,k=1}^N A_{kl}^{-1} \alpha_l \beta_k = i \sum_{n,l=1}^N A_{nl}^{-1} \frac{\partial A_{ln}}{\partial x} = i \cdot \operatorname{tr} \left(A^{-1} \frac{\partial A}{\partial x} \right) = i \partial_x (\ln \det A). \quad (22)$$

Далее из формулы реконструкции для u (8) и из (22) получаем общую детерминантную формулу для построения решений уравнения 2DCK с функциональными параметрами:

$$u(x, y, t) = 3\partial_x^2 \ln \det A. \quad (23)$$

Общая детерминантная формула (23) для точных решений очень проста. Основная проблема в конструировании точных решений уравнения 2DCK заключается в удовлетворении условий редукции (11), (12) и вещественности (14). Эта проблема решается в следующих разделах данной статьи при построении новых классов точных решений рассматриваемого уравнения.

2. Решения с функциональными параметрами уравнения 2DCK

В этом разделе строится новый класс решений с функциональными параметрами уравнения 2DCK (1). В качестве частного случая указанного класса будут рассмотрены солитонные решения уравнения 2DCK, часть из которых была построена ранее в работе [21].

Уравнению 2DCK соответствует условие редукции (12), отличное от условия редукции для уравнения 2DKK. Представим данное условие редукции в детерми-

нантной форме, более удобной для дальнейших вычислений. Подставляя выражения для коэффициентов χ_{-1} и χ_{-2} из (16) в условие редукции (12), получим

$$\sum_{k,l=1}^N (\alpha_{lx}\beta_k) A_{kl}^{-1} - \left(\sum_{k,l=1}^N \frac{\partial A_{lk}}{\partial x} A_{kl}^{-1} \right)^2 = 0. \quad (24)$$

Вводя вырожденную матрицу V с элементами $V_{lk} = \alpha_{lx}\beta_k$, для которой $\text{rank} V = 1$, перепишем соотношение (24) в виде

$$\text{tr}(V A^{-1}) - \left[\text{tr} \left(\frac{\partial A}{\partial x} A^{-1} \right) \right]^2 = 0. \quad (25)$$

Используя тождества из (21), перепишем (25) в детерминантной форме:

$$T(S - T) - T_x^2 = 0, \quad (26)$$

здесь $T = \det A$ и $S = \det(A + V)$.

Условия вещественности (14) и редукции (12), (26) накладывают определенные ограничения на функциональные параметры. Для того, чтобы удовлетворить эти условия, попарно сгруппируем слагаемые в ядре R_0 (15):

$$\begin{aligned} R_0(\mu, \bar{\mu}, \lambda, \bar{\lambda}) &= \pi \sum_{k=1}^{2N} f_k(\mu, \bar{\mu}) g_k(\lambda, \bar{\lambda}) = \\ &= \pi \sum_{k=1}^N [p_k(\mu, \bar{\mu}) q_k(\lambda, \bar{\lambda}) + \tilde{p}_k(\mu, \bar{\mu}) \tilde{q}_k(\lambda, \bar{\lambda})]. \end{aligned} \quad (27)$$

Определим с помощью (27) наборы f и g функций f_k и g_k , $k = 1 \dots 2N$,

$$\begin{aligned} f &:= (f_1, \dots, f_{2N}) = (p_1(\mu, \bar{\mu}), \dots, p_N(\mu, \bar{\mu}); \tilde{p}_1(\mu, \bar{\mu}), \dots, \tilde{p}_N(\mu, \bar{\mu})), \\ g &:= (g_1, \dots, g_{2N}) = (q_1(\lambda, \bar{\lambda}), \dots, q_N(\lambda, \bar{\lambda}); \tilde{q}_1(\lambda, \bar{\lambda}), \dots, \tilde{q}_N(\lambda, \bar{\lambda})). \end{aligned} \quad (28)$$

В случае $N = 1$, т. е. одной пары слагаемых в ядре (27), можно легко показать, что условие редукции (12) или (26) выполняется при выборе функциональных параметров в виде $\alpha_2 = ic_1^{-1} \partial_x^{-1} \beta_1$, $\beta_2 = ic_1 \alpha_{1x}$, здесь c_1 – произвольная комплексная константа. В терминах функциональных параметров в спектральном представлении (18) последнее соотношение переписывается в виде $\tilde{p}_1(\mu, \bar{\mu}) = c_1^{-1} \mu^{-1} q_1(-\mu, -\bar{\mu})$, $\tilde{q}_1(\lambda, \bar{\lambda}) = c_1 \lambda p_1(-\lambda, -\bar{\lambda})$. С использованием компьютерного пакета символьческих вычислений – «Maple» было проверено, что условие редукции удовлетворяется при выполнении подобных соотношений между функциональными параметрами и в случае двух пар слагаемых ядра R_0 (27). Обобщая последнее наблюдение на более общий случай $N > 2$ пар слагаемых в ядре (27), заключаем, что условие редукции (12) или (26) выполняется при следующих соотношениях на функциональные параметры в координатном и спектральном представлениях:

$$\begin{aligned} \alpha_{k+N} &= ic_k^{-1} \partial_x^{-1} \beta_k, \quad \beta_{k+N} = ic_k \alpha_{kx}, \quad k = 1, \dots, N, \\ \tilde{p}_k(\mu, \bar{\mu}) &= c_k^{-1} \mu^{-1} q_k(-\mu, -\bar{\mu}), \quad \tilde{q}_k(\lambda, \bar{\lambda}) = c_k \lambda p_k(-\lambda, -\bar{\lambda}), \end{aligned} \quad (29)$$

где c_k ($k=1, \dots, N$) – некоторые комплексные константы, и индекс k нумерует пары в ядре R_0 .

Таким образом, в силу (29) условия редукции (12) или (26) удовлетворяются при выборе ядра R_0 (27) $\bar{\partial}$ -проблемы (3) в виде

$$\begin{aligned} R_0(\mu, \bar{\mu}, \lambda, \bar{\lambda}) &= \pi \sum_{k=1}^{2N} f_k(\mu, \bar{\mu}) g_k(\lambda, \bar{\lambda}) = \\ &= \pi \sum_{k=1}^N \left[p_k(\mu, \bar{\mu}) q_k(\lambda, \bar{\lambda}) + \frac{\lambda}{\mu} q_k(-\mu, -\bar{\mu}) p_k(-\lambda, -\bar{\lambda}) \right]. \end{aligned} \quad (30)$$

В соответствии с (30) наборы f и g функции f_k , g_k , $k=1, \dots, 2N$ даются выражениями:

$$\begin{aligned} f &= (f_1, \dots, f_{2N}) = \left(p_1(\mu, \bar{\mu}), \dots, p_N(\mu, \bar{\mu}); \frac{1}{\mu} q_1(-\mu, -\bar{\mu}), \dots, \frac{1}{\mu} q_N(-\mu, -\bar{\mu}) \right), \\ g &= (g_1, \dots, g_{2N}) = \left(q_1(\lambda, \bar{\lambda}), \dots, q_N(\lambda, \bar{\lambda}); \lambda p_1(-\lambda, -\bar{\lambda}), \dots, \lambda p_N(-\lambda, -\bar{\lambda}) \right). \end{aligned} \quad (31)$$

Первое условие вещественности из (14) удовлетворяется при наложении на каждую пару суммы (30) следующих соотношений:

$$\begin{aligned} p_k(\mu, \bar{\mu}) q_k(\lambda, \bar{\lambda}) + \frac{\lambda}{\mu} q_k(-\mu, -\bar{\mu}) p_k(-\lambda, -\bar{\lambda}) &= \\ = \overline{p_k(-\bar{\mu}, -\mu)} \overline{q_k(-\bar{\lambda}, -\lambda)} + \frac{\lambda}{\mu} \overline{q_k(\bar{\mu}, \mu)} \overline{p_k(\bar{\lambda}, \lambda)}. \end{aligned} \quad (32)$$

Из равенства (32) следуют два случая удовлетворения условия вещественности:

$$A. p_k(\mu, \bar{\mu}) q_k(\lambda, \bar{\lambda}) = \overline{p_k(-\bar{\mu}, -\mu)} \overline{q_k(-\bar{\lambda}, -\lambda)}, \quad (33)$$

$$B. p_k(\mu, \bar{\mu}) q_k(\lambda, \bar{\lambda}) = \frac{\lambda}{\mu} \overline{q_k(\bar{\mu}, \mu)} \overline{p_k(\bar{\lambda}, \lambda)}. \quad (34)$$

Разделяя переменные в случае A –

$$\frac{p_k(\mu, \bar{\mu})}{p_k(-\bar{\mu}, -\mu)} = \frac{q_k(-\bar{\lambda}, -\lambda)}{q_k(\lambda, \bar{\lambda})} = v_k \quad (35)$$

с некоторыми комплексными константами v_k ($k=1, \dots, N$), получаем следующие ограничения на функции $p_k(\mu, \bar{\mu})$ и $q_k(\lambda, \bar{\lambda})$:

$$p_k(\mu, \bar{\mu}) = v_k \overline{p_k(-\bar{\mu}, -\mu)}, \quad q_k(\lambda, \bar{\lambda}) = v_k^{-1} \overline{q_k(-\bar{\lambda}, -\lambda)}, \quad |v_k|^2 = 1. \quad (36)$$

Разделяя переменные в случае B –

$$\frac{\mu p_k(\mu, \bar{\mu})}{q_k(\bar{\mu}, \mu)} = \frac{\lambda p_k(\bar{\lambda}, \lambda)}{q_k(\lambda, \bar{\lambda})} = v_k \quad (37)$$

с некоторыми комплексными константами v_k ($k = 1, \dots, N$), получаем ограничения на функции $q_k(\lambda, \bar{\lambda})$:

$$q_k(\mu, \bar{\mu}) = \frac{\mu}{v_k} \overline{p_k(\bar{\mu}, \mu)}, \quad v_k = \bar{v}_k = v_{k0}. \quad (38)$$

Второе условие вещественности из (14) может быть удовлетворено путем наложения на каждую пару суммы (30) следующих ограничений:

$$\begin{aligned} p_k(\mu, \bar{\mu})q_k(\lambda, \bar{\lambda}) + \frac{\lambda}{\mu} q_k(-\mu, -\bar{\mu})p_k(-\lambda, -\bar{\lambda}) = \\ = \overline{p_k(\bar{\lambda}, \lambda)} \overline{q_k(\bar{\mu}, \mu)} + \frac{\mu}{\lambda} \overline{q_k(-\bar{\lambda}, -\lambda)} \overline{p_k(-\bar{\mu}, -\mu)}. \end{aligned} \quad (39)$$

Из равенства (39) следуют два возможных случая:

$$\begin{aligned} A'. \quad p_k(\mu, \bar{\mu})q_k(\lambda, \bar{\lambda}) = \overline{p_k(\bar{\lambda}, \lambda)} \overline{q_k(\bar{\mu}, \mu)}, \\ \frac{\lambda}{\mu} q_k(-\mu, -\bar{\mu})p_k(-\lambda, -\bar{\lambda}) = \frac{\mu}{\lambda} \overline{q_k(-\bar{\lambda}, -\lambda)} \overline{p_k(-\bar{\mu}, -\mu)}. \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} B'. \quad p_k(\mu, \bar{\mu})q_k(\lambda, \bar{\lambda}) = \frac{\mu}{\lambda} \overline{q_k(-\bar{\lambda}, -\lambda)} \overline{p_k(-\bar{\mu}, -\mu)}, \\ \frac{\lambda}{\mu} q_k(-\mu, -\bar{\mu})p_k(-\lambda, -\bar{\lambda}) = \overline{p_k(\bar{\lambda}, \lambda)} \overline{q_k(\bar{\mu}, \mu)}. \end{aligned} \quad (41)$$

Для первого случая A' (40), разделяя переменные, получаем следующие соотношения:

$$\frac{p_k(\mu, \bar{\mu})}{q_k(\bar{\mu}, \mu)} = \frac{\overline{p_k(\bar{\lambda}, \lambda)}}{q_k(\lambda, \bar{\lambda})} = v_k, \quad (42)$$

$$\frac{\lambda^2 p_k(-\lambda, -\bar{\lambda})}{q_k(-\bar{\lambda}, -\lambda)} = \frac{\mu^2 \overline{p_k(-\bar{\mu}, -\mu)}}{q_k(-\bar{\mu}, -\mu)} = \tilde{v}_k, \quad (43)$$

где v_k и \tilde{v}_k ($k = 1, \dots, N$) – некоторые комплексные константы. Заметим, что из (43) и (42) следует соотношение $\lambda^2 v_k = \mu^2 \tilde{v}_k$, которому невозможно удовлетворить при произвольном выборе λ , μ . Во втором случае B' из (41), разделяя переменные, получим следующие равенства:

$$\frac{p_k(\mu, \bar{\mu})}{\mu p_k(-\bar{\mu}, -\mu)} = \frac{\overline{q_k(-\bar{\lambda}, -\lambda)}}{\lambda q_k(\lambda, \bar{\lambda})} = v_k, \quad (44)$$

$$\frac{\overline{\mu q_k(\bar{\mu}, \mu)}}{q_k(-\bar{\mu}, -\mu)} = \frac{\lambda p_k(-\lambda, -\bar{\lambda})}{p_k(\lambda, \bar{\lambda})} = \tilde{v}_k, \quad (45)$$

где v_k и \tilde{v}_k ($k = 1, \dots, N$) – некоторые комплексные константы. Из (44) и (45), снова получаем соотношение $\mu^2 v_k = -\tilde{v}_k$ которое не выполняется при произволь-

ных μ . Таким образом, показано, что случаи A' и B' приводят к противоречиям, поэтому ниже рассматриваются только случаи A и B , определенные соотношениями (33) и (34).

В случае A (33) ядро R_0 , которое приводит к удовлетворению условий вещественности (14) и редукции (12) или (26), имеет вид (30), где для функции $p_k(\mu, \bar{\mu})$ и $q_k(\lambda, \bar{\lambda})$ выполняются соотношения (36). Используя определения (18), получаем из (29), (36) соотношения между различными функциональными параметрами в координатном представлении:

$$\begin{aligned}\alpha_k &:= v_k \int \int_C \overline{p_k(-\bar{\mu}, -\mu)} e^{F(\mu)} d\mu \wedge d\bar{\mu} = -v_k \bar{\alpha}_k, \\ \beta_k &:= \bar{v}_k \int \int_C \overline{q_k(-\bar{\lambda}, -\lambda)} e^{-F(\lambda)} d\lambda \wedge d\bar{\lambda} = -\bar{v}_k \bar{\beta}_k,\end{aligned}\tag{46}$$

$$\begin{aligned}\alpha_{k+N} &:= c_k^{-1} \int \int_C \frac{1}{\mu} q_k(-\mu, -\bar{\mu}) e^{F(\mu)} d\mu \wedge d\bar{\mu} = i c_k^{-1} \partial_x^{-1} \beta_k, \\ \beta_{k+N} &:= c_k \int \int_C \lambda p_k(-\lambda, -\bar{\lambda}) e^{-F(\lambda)} d\lambda \wedge d\bar{\lambda} = i c_k \alpha_{kx},\end{aligned}\tag{47}$$

где $|v_k|^2 = 1$ и $(k = 1, \dots, N)$. Наборы функциональных параметров α_k и β_k , в силу (46) и (47), имеют следующую структуру:

$$(\alpha_1, \dots, \alpha_{2N}) := (\alpha_1, \dots, \alpha_N; i c_1^{-1} \partial_x^{-1} \beta_1, \dots, i c_N^{-1} \partial_x^{-1} \beta_N),\tag{48}$$

$$(\beta_1, \dots, \beta_{2N}) := (\beta_1, \dots, \beta_N; i c_1 \alpha_{1x}, \dots, i c_N \alpha_{Nx}),\tag{49}$$

таким образом, оба набора выражаются через $2N$ независимых комплексных параметров $(\alpha_1, \dots, \alpha_N)$ и $(\beta_1, \dots, \beta_N)$, для которых выполняются соотношения (46).

Класс точных решений с функциональными параметрами, соответствующий ядру R_0 вида (30), дается общей формулой (23) с функциональными параметрами, определенными в (48) и (49). Построенные решения, таким образом, зависят только от $2N$ функциональных параметров $(\alpha_1, \dots, \alpha_N)$ и $(\beta_1, \dots, \beta_N)$.

В простейшем случае $N = 1$ вследствие (46), (48) и (49) определитель матрицы A (17) дается следующим выражением:

$$\det A = \left(1 - \frac{1}{4} \alpha_1 \partial_x^{-1} \beta_1 + \frac{1}{2} \partial_x^{-1} \alpha_1 \beta_1 \right)^2 = \Delta^2.\tag{50}$$

Соответствующее решение u вычисляется с помощью формулы реконструкции (23) и имеет вид

$$u = \frac{3}{2\Delta^2} \left[\Delta \left(\alpha_1 \beta_{1x} - \alpha_{1xx} \partial_x^{-1} \beta_1 \right) - \frac{1}{4} \left(\alpha_1 \beta_1 - \alpha_{1x} \partial_x^{-1} \beta_1 \right)^2 \right].\tag{51}$$

Из выражения (50) для $\det A$ следует, что построенное решение (51) является несингулярным при выборе функциональных параметров α_1, β_1 , удовлетворяющих неравенству $-\frac{1}{4} \alpha_1 \partial_x^{-1} \beta_1 + \frac{1}{2} \partial_x^{-1} \alpha_1 \beta_1 > 0$.

Выбор дельта-функциональных функциональных параметров в спектральном представлении в виде $p_k(\mu, \bar{\mu}) = A_k \delta(\mu - i\mu_{k0})$, $q_k(\lambda, \bar{\lambda}) = B_k \delta(\lambda - i\lambda_{k0})$, $k = 1, \dots, N$, удовлетворяющих условиям (29) и (36), где в соответствии с (36) $A_k = v_k \bar{A}_k$, $B_k = v_k \bar{B}_k$ и λ_{k0} , μ_{k0} – некоторые вещественные параметры, приводит к многосолитонным решениям уравнения 2ДСК. Соответствующие функциональные параметры в координатном представлении (18) имеют вид

$$\alpha_k = -2iA_k e^{F(i\mu_{k0})}, \quad \beta_k = -2iB_k e^{-F(i\lambda_{k0})}. \quad (52)$$

В простейшем случае $N = 1$ из (50), (51) и с учетом (52) получаем, при условии $A_1 B_1 \frac{\mu_{10} + \lambda_{10}}{\lambda_{10}(\mu_{10} - \lambda_{10})} = e^{\varphi_0} > 0$, точное несингулярное линейное односолитонное решение уравнения 2ДСК вида

$$u(x, y, t) = \frac{3(\mu_{10} - \lambda_{10})^2}{2 \cosh^2\left(\frac{\varphi + \varphi_0}{2}\right)}, \quad (53)$$

где $\varphi = F(i\mu_{10}) - F(i\lambda_{10})$. Это решение было ранее вычислено в работе [21]. В случае $N = 2$ получаем точное двухсолитонное решение уравнения 2ДСК.

В случае B (34) условия вещественности (14) и редукции (12) или (26), в силу (29), (30) и (38) будут удовлетворены при выборе ядра R_0 вида

$$R_0(\mu, \bar{\mu}, \lambda, \bar{\lambda}) = \pi \sum_{k=1}^N [v_k^{-1} \lambda p_k(\mu, \bar{\mu}) \overline{p_k(\bar{\lambda}, \lambda)} - v_k^{-1} \lambda p_k(-\bar{\mu}, -\mu) \overline{p_k(-\lambda, -\bar{\lambda})}], \quad (54)$$

где $v_k = v_{k0}$ – произвольные вещественные константы. Используя (54), определяем наборы f и g функций f_k , g_k , $k = 1, \dots, 2N$,

$$\begin{aligned} f &:= (f_1, \dots, f_{2N}) = \\ &= (p_1(\mu, \bar{\mu}), \dots, p_N(\mu, \bar{\mu}); -v_1^{-1} \overline{p_1(-\bar{\mu}, -\mu)}, \dots, -v_N^{-1} \overline{p_N(-\bar{\mu}, -\mu)}), \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} g &:= (g_1, \dots, g_{2N}) = \\ &= (v_1^{-1} \lambda \overline{p_1(\bar{\lambda}, \lambda)}, \dots, v_N^{-1} \lambda \overline{p_N(\bar{\lambda}, \lambda)}; \lambda p_1(-\lambda, -\bar{\lambda}), \dots, \lambda p_N(-\lambda, -\bar{\lambda})). \end{aligned} \quad (56)$$

С помощью определений (18) получаем из (55) и (56) соотношения между функциональными параметрами в координатном представлении:

$$\beta_k := v_k^{-1} \iint_C \overline{\lambda p_k(\bar{\lambda}, \lambda)} e^{-F(\lambda)} d\lambda \wedge d\bar{\lambda} = -iv_k^{-1} \bar{\alpha}_{kx}, \quad k = 1, \dots, N, \quad (57)$$

$$\alpha_{k+N} := -v_k^{-1} \iint_C p_k(-\bar{\mu}, -\mu) e^{F(\mu)} d\mu \wedge d\bar{\mu} = v_k^{-1} \bar{\alpha}_k, \quad (58)$$

$$\beta_{k+N} := \iint_C \lambda p_k(-\lambda, -\bar{\lambda}) e^{-F(\lambda)} d\lambda \wedge d\bar{\lambda} = i\alpha_{kx},$$

где $v_k = v_{k0}$ – произвольные вещественные константы. Из (57), (58) получаем наборы функциональных параметров в координатном представлении:

$$(\alpha_1, \dots, \alpha_{2N}) := (\alpha_1, \dots, \alpha_N; v_1^{-1} \bar{\alpha}_1, \dots, v_N^{-1} \bar{\alpha}_N), \quad (59)$$

$$(\beta_1, \dots, \beta_{2N}) := (-iv_1^{-1} \bar{\alpha}_{1x}, \dots, -iv_N^{-1} \bar{\alpha}_{Nx}; i\alpha_{1x}, \dots, i\alpha_{Nx}), \quad (60)$$

таким образом, оба набора выражаются через N независимых комплексных функциональных параметров $(\alpha_1, \dots, \alpha_N)$.

Общая детерминантная формула (23), в рассматриваемом случае ядра R_0 (56), с функциональными параметрами, определенными в (59) и (60), приводит к классу точных решений с функциональными параметрами уравнения 2DCK (1). Построенные решения зависят только от N комплексных функциональных параметров $(\alpha_1, \dots, \alpha_N)$.

В простейшем случае $N = 1$, в силу (59) и (60) определитель матрицы A (17) дается выражением

$$\det A = \left(1 + \frac{i}{4v_1} \partial_x^{-1} (\alpha_{1x} \bar{\alpha}_1 - \alpha_1 \bar{\alpha}_{1x}) \right)^2 = \Delta^2. \quad (61)$$

Соответствующее решение u вычисляется с помощью формулы реконструкции (23) и с учетом (61) имеет вид

$$u = \frac{3}{2v_1 \Delta^2} \left[i\Delta (\alpha_{1xx} \bar{\alpha}_1 - \alpha_1 \bar{\alpha}_{1xx}) + \frac{1}{4v_1} (\alpha_{1x} \bar{\alpha}_1 - \alpha_1 \bar{\alpha}_{1x})^2 \right]. \quad (62)$$

Из выражения (61) следует, что построенное решение (62) несингулярно при выборе функционального параметра α_1 , удовлетворяющего неравенству

$$\frac{i}{4v_1} \partial_x^{-1} (\alpha_{1x} \bar{\alpha}_1 - \alpha_1 \bar{\alpha}_{1x}) > 0.$$

При выборе дельта-функциональных функциональных параметров вида $p_k(\mu, \bar{\mu}) = A_k \delta(\mu + \mu_k)$, $k = 1, \dots, N$, функциональные параметры α_k (18) в координатном представлении имеют вид

$$\alpha_k = -2iA_k e^{F(\mu_k)}. \quad (63)$$

Указанный выбор функциональных параметров приводит к многосолитонным решениям.

В простейшем случае $N = 1$ из (61), (62) с учетом (63) при выполнении условия $\frac{|A_1|^2}{v_1} \mu_{1R} = e^{\varphi_0} > 0$ получаем точное несингулярное односолитонное решение уравнения 2DCK:

$$u(x, y, t) = \frac{6\mu_{1I}^2}{\cosh^2\left(\frac{\varphi + \varphi_0}{2}\right)}, \quad (64)$$

где $\varphi = F(\mu_1) - F(\bar{\mu}_1)$. Полученное решение было вычислено ранее в работе [21]. Аналогичные, достаточно простые выражения приводят к двухсолитонному решению уравнения 2DCK.

3. Простые периодические решения уравнения 2DCK

В настоящем разделе строится подкласс решений с функциональными параметрами для уравнения 2DCK (2) – простые периодические решения. Такие решения строятся следующим образом. Сначала с помощью общей детерминантной формулы (23) строится комплексное решение, удовлетворяющее лишь условию редукции (12) или (26).

Простые периодические решения уравнения 2DCK вычисляются аналогично случаю уравнения 2DKK. Сначала ищется решение u , удовлетворяющее только условию редукции (12) или (26), в случае $N = 1$ в (30) это решение имеет вид (23), где определитель матрицы A , в силу (17) и (29), дается выражением

$$\det A = \left(1 - \frac{1}{4} \alpha_1 \partial_x^{-1} \beta_1 + \frac{1}{2} \partial_x^{-1} \alpha_1 \beta_1 \right)^2 = \Delta^2. \quad (65)$$

Выбирая дельта-функциональные функциональные параметры $f_1 := A_1 \delta(\mu - \mu_1)$ и $g_1 := B_1 \delta(\lambda - \lambda_1)$ в спектральном представлении, получаем с помощью (18) функциональные параметры $\alpha_1 = -2iA_1 e^{F(\mu_1)}$ и $\beta_1 = -2iB_1 e^{-F(\lambda_1)}$ в координатном представлении.

Далее с помощью общей детерминантной формулы (23) строится решение, удовлетворяющее только условию редукции. В рассматриваемом случае получаем

$$u(x, y, t) = \frac{-6a(\mu_1^2 - \lambda_1^2)}{\lambda_1 \det A} e^{\varphi(x, y, t)}, \quad (66)$$

где $a := iA_1 B_1$, $\varphi = F(\mu_1) - F(\lambda_1)$ и

$$\det A = \left[1 + a \frac{\mu_1 + \lambda_1}{\lambda_1(\mu_1 - \lambda_1)} e^{\varphi(x, y, t)} \right]^2. \quad (67)$$

Условие вещественности ($u = \bar{u}$), налагаемое на решение (66) и требование мнимости фазы $\varphi = -\bar{\varphi} = i\phi$ приводят к следующим ограничениям на параметры:

$$\mu_1 = \bar{\mu}_1 = \mu_{10}, \quad \lambda_1 = \bar{\lambda}_1 = \lambda_{10}, \quad a = |a| e^{i\phi_a} = \left| \frac{\lambda_{10}(\mu_{10} - \lambda_{10})}{\mu_{10} + \lambda_{10}} \right| e^{i\phi_a}. \quad (68)$$

Подставляя формулы (68) в (66), получаем простое сингулярное периодическое решение уравнения 2DCK:

$$u(x, y, t) = \frac{-3(\mu_{10} - \lambda_{10})^2}{2 \cos^2 \left(\frac{\phi + \phi_a}{2} \right)}, \quad \text{при } \frac{\lambda_{10}(\mu_{10} - \lambda_{10})}{\mu_{10} + \lambda_{10}} > 0 \quad (69)$$

и

$$u(x, y, t) = \frac{-3(\mu_{10} - \lambda_{10})^2}{2 \sin^2 \left(\frac{\phi + \phi_a}{2} \right)}, \quad \text{при } \frac{\lambda_{10}(\mu_{10} - \lambda_{10})}{\mu_{10} + \lambda_{10}} < 0, \quad (70)$$

здесь $\phi = (\mu_{10} - \lambda_{10})x + (\mu_{10}^3 - \lambda_{10}^3)y + 9(\mu_{10}^5 - \lambda_{10}^5)t$ и ϕ_a – произвольная вещественная константа.

К другой возможности удовлетворения условия вещественности $u = \bar{u}$ решения (66) и требования мнимости фазы $\varphi = -\bar{\varphi} = i\phi$ приводят следующие ограничения на параметры:

$$\lambda_1 = -\bar{\mu}_1, \quad a = |a| e^{i\phi_a} = \left| \frac{\mu_{1R}}{\mu_{1I}} \right| |\mu_1| e^{i\phi_a}. \quad (71)$$

Налагая на решение u (66) эти ограничения, получаем еще одно простое сингулярное периодическое решение уравнения 2ДСК (1):

$$u(x, y, t) = \frac{-6\mu_{1R}^2}{\cos^2\left(\frac{\phi + \phi_a}{2}\right)}, \quad \text{при } \frac{\mu_{1R}}{\mu_{1I}} > 0, \quad (72)$$

$$u(x, y, t) = \frac{-6\mu_{1R}^2}{\sin^2\left(\frac{\phi + \phi_a}{2}\right)}, \quad \text{при } \frac{\mu_{1R}}{\mu_{1I}} < 0,$$

здесь $\phi = (\mu_1 + \bar{\mu}_1)x + (\mu_1^3 + \bar{\mu}_1^3)y + (\mu_1^5 + \bar{\mu}_1^5)t$ и ϕ_a – произвольная вещественная константа.

Заключение

Уравнение 2ДСК возникает как специальная редукция (11) ($u_0 = 0$) более общей системы нелинейных уравнений для некоторых полевых переменных, напомним, что уравнению 2ДКК соответствует редукция $u_0 = \frac{1}{2}u_x$, см. [21]. Такие редукции приводят к определенным нелинейным ограничениям на коэффициенты разложения волновой функции χ линейных вспомогательных задач.

В данной статье показано, как можно удовлетворить этим нелинейным ограничениям, с помощью метода $\bar{\partial}$ -одевания. В результате для уравнения 2ДСК (1) были построены новые классы точных решений с функциональными параметрами и рассмотрены частные случаи таких решений – периодические решения.

Отметим, что в статье [23] была дана калибровочная формулировка интегрируемой 2ДКК-2ДСК системы нелинейных уравнений. Там было показано, что уравнения 2ДКК и 2ДСК (1) допускают калибровочно-инвариантную формулировку, но эти уравнения не являются калибровочно инвариантными друг другу.

Именно поэтому удовлетворение редукций ($u_0 = 0$ и $u_0 = \frac{1}{2}u_x$ для указанных уравнений выполняется заметно различным образом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дрюма В.С. Об аналитическом решении двумерного уравнения Кортевега-Де Вриза (КДВ) // Письма в ЖЭТФ. – 1974. – Т. 19, вып. 12. – С. 753–755.
2. Захаров В.Е., Шабат А.Б. Схема интегрирования нелинейных уравнений математической физики методом обратной задачи рассеяния // Функциональный анализ и его приложения. – 1974. – Т. 8, вып. 3. – С. 45–53.
3. Davey A., Stewartson K. On three-dimensional packet of surface waves [Electronic resource] // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1974. – Vol. 338, iss. 1613. – P. 101–110. – URL: <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1974.0076> (accessed: 09.11.2014).

4. **Нижник Л.П.** Интегрирование многомерных нелинейных уравнений методом обратной задачи // Доклады Академии наук СССР. – 1980. – Т. 254, № 2. – С. 332–335.
5. **Веселов А.П., Новиков С.П.** Конечнозонные двумерные потенциальные операторы Шрёдингера. Явные формулы и эволюционные уравнения // Доклады Академии наук СССР. – 1984. – Т. 279, № 1. – С. 20–24.
6. Теория солитонов: метод обратной задачи / С.П. Новиков, В.Е. Захаров, С.В. Манакон, Л.В. Питаевский. – М.: Наука, 1980. – 319 с.
7. **Ablowitz M.J., Clarkson P.A.** Solitons, nonlinear evolution equations and inverse scattering. – Cambridge: Cambridge University Press, 1991. – 516 p.
8. **Konopelchenko B.G.** Introduction to multidimensional integrable equations: the inverse spectral transform in 2+1 dimensions. – New York: Plenum Press, 1992. – 292 p.
9. **Konopelchenko B.G.** Solitons in multidimensions: inverse spectral transform method. – Singapore: World Scientific, 1993. – 304 p.
10. **Manakov S.V.** The inverse scattering transform for the time-dependent Schrodinger equation and Kadomtsev-Petviashvili equation // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 1981. – Vol. 3, iss. 1–2. – P. 420–427. – doi: 10.1016/0167-2789(81)90145-7.
11. **Beals R., Coifman R.R.** The $\bar{\partial}$ -approach to inverse scattering and nonlinear evolutions // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 1986. – Vol. 18, iss. 1–3. – P. 242–249. – doi: 10.1016/0167-2789(86)90184-3.
12. **Захаров В.Е., Манакон С.В.** Построение многомерных нелинейных интегрируемых систем и их решений // Функциональный анализ и его приложения. – 1985. – Т. 19, вып. 2. – С. 11–25.
13. **Zakharov V. E.** Commutating operators and nonlocal $\bar{\partial}$ -problem // Plasma theory and Nonlinear and turbulent processes in Physics / ed. by N.S. Erokhin, V.E. Zakharov, A.G. Sitenko, V.M. Chernousenko, V.G. Bar'yakhtar. – Kiev: Naukova Dumka, 1988. – Vol. 1. – P. 152–158.
14. **Bogdanov L.V., Manakov S.V.** The non-local $\bar{\partial}$ -problem and (2+1)-dimensional soliton equations // Journal of Physics A: Mathematical and General. – 1988. – Vol. 21, N 10. – P. L537–L544. – doi: 10.1088/0305-4470/21/10/001.
15. **Fokas A.S., Ablowitz M.J.** The inverse scattering transform for multidimensional (2+1) problems // Lecture Notes in Physics. – 1983. – Vol. 189. – P. 137–183.
16. **Beals R., Coifman R.R.** Linear spectral problems, non-linear equations and the $\bar{\partial}$ -method // Inverse Problems. – 1989. – Vol. 5, N 2. – P. 87–130. – doi: 10.1088/0266-5611/5/2/002.
17. **Zakharov V.E.** On the dressing method // Inverse Methods in Action / ed. by P.C. Sabatier. – Berlin: Springer, 1990. – P. 602–623.
18. **Konopelchenko B.G., Dubrovsky V.G.** Some new integrable nonlinear evolution equations in 2+1 dimensions // Physics Letters A. – 1984. – Vol. 102, iss. 1–2. – P. 15–17. – doi: 10.1016/0375-9601(84)90442-0.
19. Operator approach to the Kadomtsev-Petviashvili equation: transformation groups for soliton equation III / E. Date, M. Jimbo, M. Kashiwara, T. Miwa // Journal of the Physical Society of Japan. – 1981. – Vol. 50, N 11. – P. 3806–3812. – doi: 10.1143/JPSJ.50.3806.
20. **Захаров В.Е., Шабат А.Б.** Интегрирование нелинейных уравнений математической физики методом обратной задачи рассеяния. II // Функциональный анализ и его приложения. – 1979. – Т. 13, вып. 3. – С. 13–22.
21. **Dubrovsky V.G., Lisitsyn Ya.V.** The construction of exact solutions of two-dimensional generalizations of Kaup-Kupershmidt and Sawada-Kotera equations // Physics Letters A. – 2002. – Vol. 295, iss. 4. – P. 198–207. – doi: 10.1016/S0375-9601(02)00154-8.
22. **Hu X.-B., Wang D.-L., Qian X.-M.** Soliton solutions and symmetries of the 2+1 dimensional Kaup-Kupershmidt equation // Physics Letters A. – 1999. – Vol. 262, iss. 6. – P. 409–415. – doi: 10.1016/S0375-9601(99)00683-0.
23. **Дубровский В.Г., Грамолин А.В.** Калибровочно-инвариантное описание некоторых (2+1)-мерных интегрируемых нелинейных эволюционных уравнений // Теоретическая и математическая физика. – 2009. – Т. 160, № 1. – С. 35–48. – doi: 10.4213/tmf6376.
24. **Дубровский В.Г., Топовский А.В., Басалаев М.Ю.** Новые точные решения двумерных интегрируемых уравнений НВН, 2DKK и 2DCK, полученные с помощью метода $\bar{\partial}$ -одевания // Теоретическая и математическая физика. – 2011. – Т. 167, № 3. – С. 377–393. – doi: 10.4213/tmf6648.

SOLUTIONS WITH FUNCTIONAL PARAMETERS OF 2+1 DIMENSIONAL INTEGRABLE NONLINEAR EQUATIONS. TWO-DIMENSIONAL INTEGRABLE GENERALIZATION OF THE SAWADA-KOTERA EQUATION

Dubrovsky V.G., Topovsky A.V., Basalaev M.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

In 1967 new method of exact integration of nonlinear differential equations, the Inverse Scattering Transform (IST) method was discovered. The main idea of IST method is the use the linear auxiliary problems; integrable nonlinear equation is represented as compatibility condition of these problems. At first the IST method was been developed for (1+1)-dimensional nonlinear evolution differential equations with one time and space variables. The sphere of applications of new IST method has been expanded quickly. It was discovered that the IST method is also applicable for exact integration of (2+1)-dimensional nonlinear equations such as Kadomtsev-Petviashvili, Davey-Stewardson, Nizhnik-Veselov-Novikov equations. At present nonlinear Riemann-Hilbert problem, $\bar{\partial}$ -problem and more general $\bar{\partial}$ - dressing method of Zakharov-Manakov, as modern methods of the theory of complex variables, are basic and powerful methods for constructions of exact solutions of (2+1)- dimensional nonlinear integrable evolution equations. In present paper $\bar{\partial}$ - dressing method of Zakharov and Manakov is applied for construction of new classes of exact solutions of two dimensional integrable generalization of the Sawada-Kotera nonlinear equation (2DSK). The 2DSK equation is special reduction of more general system of equations for some field variables. It is shown how this reduction can be perform by satisfactions of nonlinear constraints on coefficients of expansions of wave function χ of linear auxiliary problems. New classes of exact solutions with functional parameters of 2DSK equation are obtained. The solitonic solutions and periodic solutions are subclasses of these classes. The principal possibility of construction of periodical solutions of two-dimensional integrable nonlinear equation via $\bar{\partial}$ - dressing method is demonstrated for 2DSK equation. Developed method is applicable also for construction of periodical solutions for other integrable equations.

Keywords: integrable nonlinear equation, method of $\bar{\partial}$ -dressing, two-dimensional integrable generalization of Sawada-Kotera equation (2DSK), solutions with functional parameters, periodic solutions.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-7-23

REFERENCES

1. Dryuma V.S. Ob analiticheskom reshenii dvumernogo uravneniya Kortevaga-De Vriaza (KDV) [Analytic solution of the two-dimensional Korteweg-de Vries (KdV) equation]. *Pis'ma v Zhurnal teoreticheskoi i eksperimental'noi fiziki – Soviet Physics JETP*, 1974, vol. 19, iss. 12, pp. 753–755. (In Russian)
2. Zakharov V.E., Shabat A.B. Skhema integrirvaniya nelineinykh uravnenii matematicheskoi fiziki metodom obratnoi zadachi rasseyaniya [A scheme for integrating the nonlinear equations of mathematical physics by the method of the inverse scattering problem]. *Funktsional'nyi analiz i ego prilozheniya – Functional Analysis and Its Applications*, 1974, vol. 8, iss. 3, pp. 226–235. doi: 10.1007/BF01075696. Translated from *Funktsional'nyi analiz i ego prilozheniya*, 1974, vol. 8, iss. 3, pp. 45–53.
3. Davey A., Stewartson K. On three-dimensional packet of surface waves. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1974, vol. 338, iss. 1613, pp. 101–110. Available at: <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1974.0076> (accessed 09.11.2014)
4. Nizhnik L.P. Integrirvanie mnogomernykh nelineinykh uravnenii metodom obratnoi zadachi [Integration of multidimensional nonlinear equations by the method of the inverse problem]. *Doklady Akademii nauk SSSR – Soviet Physics Doklady*, 1980, vol. 25, pp. 706–708. Translated from *Doklady Akademii nauk SSSR*, vol. 254, no. 2, pp. 332–335.
5. Veselov A.P., Novikov S.P. Konechnozonnye dvumernye potentsial'nye operatory Shredingera. Yavnye formuly i evolyutsionnye uravneniya [Finite-zone, two-dimensional, potential Schrödinger operators. Explicit formula and evolutions equations]. *Doklady Akademii nauk SSSR – Soviet Mathematics. Doklady*, 1980, vol. 30, pp. 588–591. Translated from *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1984, vol. 279, no. 1, pp. 20–24.

6. Novikov S.P., Manakov S.V., Pitaevskii L.P., Zakharov V.E. *Theory of solitons: the inverse scattering method*. New York, London, Springer Science & Business Media, 1984. 276 p.
7. Ablowitz M.J., Clarkson P.A. *Solitons, nonlinear evolution equations and inverse scattering*. Cambridge, Cambridge University Press, 1991. 516 p.
8. Konopelchenko B.G. *Introduction to multidimensional integrable equations: the inverse spectral transform in 2+1 dimensions*. New York, Plenum Press, 1992. 292 p.
9. Konopelchenko B.G. *Solitons in multidimensions: inverse spectral transform method*. Singapore, World Scientific, 1993. 304 p.
10. Manakov S.V. The inverse scattering transform for the time-dependent Schrodinger equation and Kadomtsev-Petviashvili equation. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1981, vol. 3, iss. 1–2, pp. 420–427. doi: 10.1016/0167-2789(81)90145-7
11. Beals R., Coifman R.R. The D-bar approach to inverse scattering and nonlinear evolutions. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1986, vol. 18, iss. 1–3, pp. 242–249. doi: 10.1016/0167-2789(86)90184-3
12. Zakharov V.E., Manakov S.V. Postroenie mnogomernykh nelineynykh integriruemyykh sistem i ikh reshenii [Construction of higher-dimensional nonlinear integrable systems and of their solutions]. *Funktsional'nyi analiz i ego prilozheniya – Functional Analysis and Its Applications*, 1985, vol. 19, iss. 2, pp. 89–101. doi: 10.1007/BF01078388 Translated from *Funktsional'nyi analiz i ego prilozheniya*, 1985, vol. 19, iss. 2, pp. 11–25.
13. Zakharov V.E. Commutating operators and nonlocal $\bar{\partial}$ -problem. *Plasma theory and Nonlinear and turbulent processes in Physics*. Vol. 1. Ed. by Erokhin N.S., Sitenko A.G., Chernousenko V.M., Bar'yakhtar V.G., Zakharov V.E. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1988. P. 152–158.
14. Bogdanov L.V., Manakov S.V. The non-local $\bar{\partial}$ -problem and (2+1)-dimensional soliton equations. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 1988, vol. 21, no. 10, pp. L537–L544. doi: 10.1088/0305-4470/21/10/001
15. Fokas A.S., Ablowitz M.J. The inverse scattering transform for multidimensional (2+1) problems. *Lecture Notes in Physics*, 1983, vol. 189, pp. 137–183. doi: 10.1007/3-540-12730-5_6
16. Beals R., Coifman R.R. Linear spectral problems, non-linear equations and the $\bar{\partial}$ -method. *Inverse Problems*, 1989, vol. 5, N 2, pp. 87–130. doi: 10.1088/0266-5611/5/2/002
17. Zakharov V.E. On the dressing method. *Inverse methods in action*. Ed. Sabatier P.C. Berlin, Springer, 1990, pp. 602–623.
18. Konopelchenko B.G., Dubrovsky V.G. Some new integrable nonlinear evolution equations in 2+ 1 dimensions. *Physics Letters A*, 1984, vol. 102, iss. 1–2, pp. 15–17. doi: 10.1016/0375-9601(84)90442-0
19. Date E., Jimbo M., Kashiwara M., Miva T. Operator approach to the Kadomtsev-Petviashvili equation: Transformation groups for soliton equation. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1981, vol. 50, no. 11, pp. 3806–3812. doi: 10.1143/JPSJ.50.3806
20. Zakharov V.E., Shabat A.B. Integrirovaniye nelineynykh uravnenii matematicheskoi fiziki metodom obratnoi zadachi rasseyaniya. II [Integration of nonlinear equations of mathematical physics by the method of inverse scattering. II]. *Funktsional'nyi analiz i ego prilozheniya – Functional Analysis and Its Applications*, 1979, vol. 13, iss. 3, pp. 166–174. doi: 10.1007/BF01077483. Translated from *Funktsional'nyi analiz i ego prilozheniya*, 1979, vol. 13, iss. 3, pp.13–22.
21. Dubrovsky V.G., Lisitsyn Ya.V. The construction of exact solutions of two-dimensional generalizations of Kaup-Kupershmidt and Sawada-Kotera equations. *Physics Letters A*, 2002, vol. 295, iss. 4, pp. 198–207. doi: 10.1016/S0375-9601(02)00154-8
22. Hu X.-B., Wang D.-L., Qian X.-M. Soliton solutions and symmetries of the 2+1 dimensional Kaup–Kupershmidt equation. *Physics Letters A*, 1999, vol. 262, iss. 6, pp. 409–415. doi: 10.1016/S0375-9601(99)00683-0
23. Dubrovsky V.G., Gramolin A.V. Kalibrovochno-invariantnoe opisanie nekotorykh (2+1)-mernykh integriruemyykh nelineynykh evolyutsionnykh uravnenii [Gauge-invariant description of several (2+1)-dimensional integrable nonlinear evolution equations]. *Teoreticheskaya i matematicheskaya fizika – Theoretical and Mathematical Physics*, 2009, vol. 160, no. 1, pp. 905–916. doi: 10.1007/s11232-009-0080-9. Translated from *Teoreticheskaya i matematicheskaya fizika*, 2009, vol. 160, no. 1, pp. 35–48.
24. Dubrovsky V.G., Topovsky A.V., Basalaev M.Yu. Novye tochnye resheniya dvumernykh integriruemyykh uravnenii NVN, 2DKK i 2DSK poluchennye s pomoshch'yu metoda

$\bar{\delta}$ -odevaniya [New exact solutions of two-dimensional integrable equations using the $\bar{\delta}$ - dressing method]. *Teoreticheskaya i matematicheskaya fizika – Theoretical and Mathematical Physics*, 2009, vol. 167, no. 3, pp. 725–739. doi: 10.1007/s11232-011-0057-3. Translated from *Teoreticheskaya i matematicheskaya fizika*, 2009, vol. 167, no. 3, pp. 377–393.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Дубровский Владислав Георгиевич – родился в 1948 году, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной и теоретической физики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нелинейные интегрируемые уравнения, теория солитонов. Опубликовано 48 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: dubrovsky@ngs.ru).

Dubrovsky Vladislav Georgievich (b. 1948) – Doctor of Sciences (Phys. & Math.), Professor, Head of Applied and Theoretical Physics Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nonlinear integrable equations. He is author of 48 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: dubrovsky@ngs.ru).



Топовский Антон Валерьевич – родился в 1985 году, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной и теоретической физики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нелинейные интегрируемые уравнения, теория солитонов. Опубликовано 7 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: topovskiy@pitf.fif.nstu.ru).

Topovsky Anton Valerevich (b. 1985) – Candidate of Sciences (Phys. & Math.), Associate Professor of the Applied and Theoretical Physics Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nonlinear integrable equations. He is author of 7 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: topovskiy@pitf.fif.nstu.ru).



Басалаев Максим Юрьевич – родился в 1986 году, ассистент кафедры прикладной и теоретической физики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нелинейные интегрируемые уравнения, лазерная спектроскопия, распространение оптических импульсов. Опубликовано 8 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: mbasalaev@gmail.com).

Basalaev Maksim Yurevich (b. 1986) – assistant of the Applied and Theoretical Physics Department in the Novosibirsk State Technical University His research interests are currently focused on nonlinear integrable equations; laser spectroscopy, propagation of optical pulses. He is author of 8 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: mbasalaev@gmail.com).

Статья поступила 10 ноября 2014 г.

Received November 10, 2014

To Reference:

Dubrovskii V.G., Topovskii A.V., Basalaev M.Yu. Resheniya s funktsional'nymi parametrami 2+1 mernykh integriruemykh nelineinykh uravnenii. Dvumernoe integriruемое obobshchenie uravneniya Savady-Kotera [Solutions with functional parameters of 2+1 dimensional integrable nonlinear equations. Two-dimensional integrable generalization of the Sawada-Kotera equation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 7–23. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-7-23

УДК: 629.7.018.4:620.178.3

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
ПО ПАРАМЕТРАМ ВИБРАЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ****В.А. Бернс¹, Е.А. Лысенко², Д.А. Маринин², А.В. Долгополов³, Е.П. Жуков⁴**¹*Новосибирский государственный технический университет*²*ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева*³*Центральный аэрогидродинамический институт**им. профессора Н.Е. Жуковского*⁴*Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина*

В статье рассмотрена задача идентификации эксплуатационных дефектов планера и систем летательного аппарата, которые выявляются по параметрам вибраций. К таким дефектам относятся, например, нарушение целостности конструкции, ослабление креплений и зазоры в местах стыковки агрегатов, люфты в механических системах передачи усилий или перемещений, повышенное сухое трение в опорах отклоняемых поверхностей, резонансные режимы колебаний элементов планера и систем. Известные методы вибрационной дефектоскопии конструкций основаны в основном на том, что следствием возникновения повреждений являются изменения частот, форм и демпфирования собственных колебаний механических систем. Для реализации методов строится линейная расчетная модель исходной системы, а местоположения и величины возникающих повреждений определяются по изменениям динамических характеристик неповрежденной конструкции. Контроль этих изменений производится, как правило, по результатам вибрационных испытаний объектов контроля в наземных условиях. Проведенные в настоящей работе исследования влияния дефектов на динамические характеристики летательного аппарата позволили определить идентификационные признаки типовых дефектов для контроля их в процессе эксплуатации. Так идентификационными признаками трещин и разрушений в конструкциях, ослабления креплений и наличия зазоров в местах стыковки агрегатов, возникновения резонансных режимов колебаний элементов конструкций являются амплитудно-частотные характеристики и спектральные плотности мощности случайной вибрации, зафиксированные датчиками ускорений. Для идентификации люфтов в проводках управления и сухого трения в опорах отклоняемых поверхностей предложено использовать искажения портретов вынужденных колебаний. Установлены режимы полета, в которых возможна идентификация дефектов в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: летательный аппарат, нарушение целостности конструкции, люфты, зазоры, сухое трение, идентификационные признаки, мониторинг дефектов.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-24-42

Введение

Идентификация дефектов планера и систем летательных аппаратов (ЛА) может осуществляться по изменениям параметров вибрационного отклика конструкций на внешнее воздействие. Контроль производится либо на уровне качественной, либо на уровне количественной оценки одного или нескольких дефектов. Важно отметить принципиальное отличие контроля дефектов конструкций по результатам вибрационных испытаний от этого контроля по параметрам вибраций в процессе эксплуатации (мониторинг технического состояния). В наземных испытаниях виды и уровни внешнего воздействия на объект контроля известны и задаются исследователем, тогда как эксплуатационные вибрационные нагрузки оцениваются, как правило, по вибрационному отклику объекта. Это зачастую позволяет производить качественный контроль дефектов, а для количественных

оценок необходимо привлекать дополнительную информацию, получаемую в результате лабораторных экспериментальных исследований.

Методы оценки технического состояния конструкций по параметрам вибраций нашли широкое распространение в машиностроении. На их основе созданы различные контрольные приборы и стенды для диагностирования, в основном машин и механизмов, имеющих вращающиеся части, различного типа подшипников, соединительных муфт и механических передач.

В вибродефектоскопии конструкций для контроля появляющихся в процессе эксплуатации повреждений применяются в основном методы модальной идентификации динамических систем [4]. Выявление трещин и разрушений основано на том, что такие повреждения вносят изменения в характеристики жесткости (а значит, и в частоты и формы собственных колебаний) и демпфирования механических систем. Для реализации методов строится линейная расчетная математическая модель исходной системы, а местоположения и величины возникающих повреждений определяются по изменениям динамических характеристик неповрежденной конструкции. Так, например, в работах [3], [6], [8], [9–11], [13], [15–19] о появлении трещин и разрушений в конструкции судят по изменению ее собственных частот, форм и декрементов колебаний. В статье [14] изложен метод обнаружения местных повреждений композитных конструкций по изменению собственных частот и параметров затухания, соответствующих различным формам колебаний. Авторами работы [12] на примере лопаток турбин исследовано влияние повреждений на собственные частоты, формы колебаний лопаток и распределение в них вибрационных напряжений.

Большинство дефектов конструкторского или технологического происхождения является причиной нелинейного поведения динамических систем. Поэтому для их обнаружения применяются нелинейные математические модели конструкций. В работе [1] такой подход использован для контроля люфтов в подвижных соединениях механических систем передачи усилий или перемещений, а в [2] – для оценки величин сухого трения в опорах отклоняемых поверхностей.

Подобной контролю люфтов является задача обнаружения зазоров в местах стыковки агрегатов конструкции ЛА. Такой дефект проявляется в изменении амплитудно-частотной характеристики объекта в процессе эксплуатации [7].

К конструкторским, технологическим или конструкторско-технологическим дефектам относятся различные резонансные режимы колебаний элементов планера ЛА и его систем, которые устраняются конструктивными доработками ЛА [5].

Таким образом, по параметрам вибраций возможно выявление следующих типовых дефектов конструкции ЛА:

- нарушение целостности (трещины, расслоения и т.д.);
- ослабление креплений агрегатов;
- люфты в механических системах передачи усилий или перемещений;
- зазоры в местах стыковки агрегатов;
- повышенное сухое трение в опорах отклоняемых поверхностей;
- резонансные режимы колебаний элементов планера ЛА и его систем.

Важно отметить, что известные методы вибродефектоскопии предполагают, как правило, проведение вибрационных испытаний объектов контроля в наземных условиях.

1. Идентификационные признаки типовых дефектов

В настоящем разделе работы описаны результаты исследований динамических характеристик ЛА, в конструкции которого возможны перечисленные выше дефекты. Целью исследований является установление связи между изменениями

динамических свойств объекта контроля и параметрами дефектов для обоснования методики их идентификации.

Нарушение целостности конструкции и креплений агрегатов

Будем полагать, что в конструкции ЛА в местах, подлежащих контролю, установлены датчики ускорений. Такими местами могут быть, например, особо ответственные элементы и агрегаты, а также отдельные, наиболее нагруженные зоны планера. Контролю подлежат целостность конструкции и качество крепления агрегатов. Известные методы вибродефектоскопии для идентификации дефектов используют, как правило, изменения характеристик собственных тонов колебаний ЛА. Причем связь между параметрами дефектов и величинами изменений собственных частот, форм и декрементов колебаний устанавливается принятой математической моделью исследуемой конструкции, а характеристики собственных тонов определяются экспериментально. Такой подход требует прецизионных модальных испытаний, и по ряду причин его использование для мониторинга дефектов сопряжено с большими трудностями.

В настоящей работе предлагается способ качественного контроля целостности конструкции и крепления агрегатов по таким параметрам вибраций, как амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) гармонической и спектральная плотность мощности (СПМ) случайной вибрации ЛА. При этом для количественной оценки величин дефектов для каждого объекта контроля необходимы дополнительные лабораторные исследования. Примеры АЧХ и СПМ представлены на рис. 1, 2. Здесь n – перегрузка, зафиксированная некоторым акселерометром в некотором диапазоне частот колебаний f (Гц); S ($g^2/Гц$) – СПМ случайной вибрации; g – ускорение свободного падения.

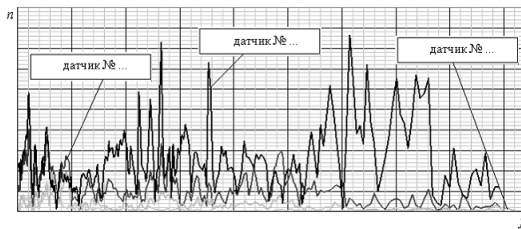


Рис. 1 – Амплитудно-частотная характеристика

Fig. 1 – Frequency response function

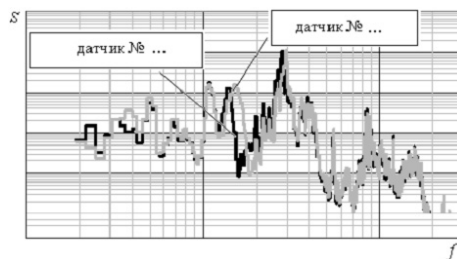


Рис. 2 – Спектральная плотность мощности – широкополосной случайной вибрации

Fig. 2 – The power spectral density of broad – band random vibration

Выбор АЧХ и СПМ случайной вибрации в качестве идентификационных признаков дефектов основан на том, что эксплуатационные вибрации в различных зонах ЛА могут быть как гармоническими (полигармоническими), так и случайными. Это зависит как от режима полета, так и от расположения зон в конструкции ЛА. Отметим, что использование в качестве идентификационных признаков модального анализа не всегда целесообразно. Во-первых, погрешности определения собственных частот колебаний могут значительно превышать их изменения из-за появления эксплуатационных дефектов. Это объясняется тем, что идентификация дефектов зачастую производится в области частот высоких собственных тонов колебаний, где точность модального анализа может оказаться невысокой. Во-вторых, погрешности в собственных формах колебаний, используемых для выявления местоположений дефектов, обычно на порядок выше погрешностей в собственных частотах. Кроме того, для определения собственных форм (особенно высоких тонов) требуется значительное количество датчиков вибраций.

Далее проиллюстрируем на конкретных примерах возможность использования АЧХ и СПМ случайной вибрации в качестве идентификационных признаков целостности конструкции и качества крепления агрегатов ЛА.

Для определения места в конструкции ЛА, в котором возник дефект, воспользуемся результатами измерений АЧХ и СПМ всеми датчиками вибраций в процессе эксплуатации объекта контроля. Появление отклонений в этих характеристиках, фиксируемых конкретными датчиками с известными координатами положения, укажет на места повреждения конструкции (рис. 3, 4).



Рис. 3 – Определение места возникновения дефекта по АЧХ

Fig. 3 – Detection of the defect emergence location by AFC



Рис. 4 – Определение места возникновения дефекта по СПМ

Fig. 4 – Detection of the defect emergence location by PSD

По характеру изменений АЧХ и СПМ можно сделать предварительное заключение о виде дефекта, возникшего в процессе эксплуатации ЛА (окончательное заключение – после визуального осмотра). Так, снижение частоты амплитудного резонанса и резкое падение амплитуды вибраций свидетельствуют о нарушении целостности конструкции – появление, например, трещины уменьшает жесткость и значительно повышает демпфирование колебаний. На рис. 5 показано проявление

ние такого дефекта, как разрушение сотовой панели, являющейся основанием для крепления агрегата. Обозначения на рис. 5–8: а) вид дефекта; б) идентификационный признак дефекта.

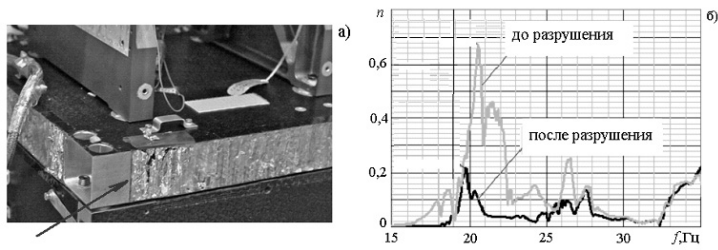


Рис. 5. Разрушение сотовой панели

Fig. 5. Honeycomb panel destruction

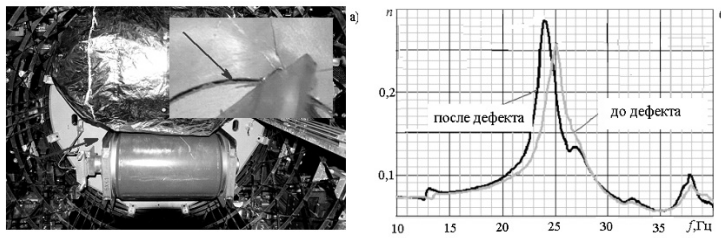


Рис. 6 – Ослабление крепления агрегата (АЧХ)

Fig. 6 – Loosening of the unit attachment (AFC)

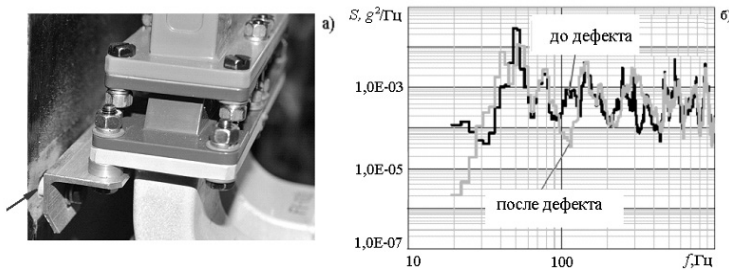


Рис. 7 – Ослабление крепления агрегата (СПМ)

Fig. 7 – Loosening of the unit attachment (PSD)

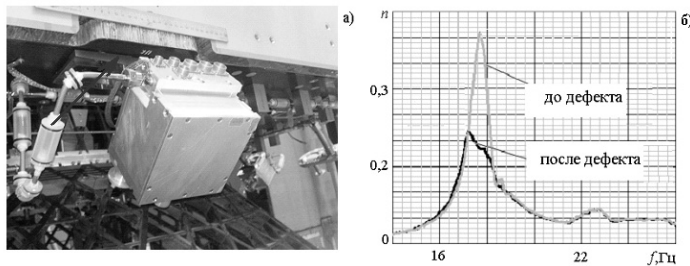


Рис. 8. Зазор в стыковке агрегатов

Fig. 8. A backlash in the unit interfacing point

Другой характер имеют изменения АЧХ и СПМ при ослаблении креплений агрегатов: снижение частоты амплитудного резонанса происходит почти без изменения резонансной амплитуды колебаний (рис. 6, 7). Рис. 8 иллюстрирует изменение АЧХ при появлении зазора в стыковке агрегата с планером ЛА. Эта АЧХ зафиксирована акселерометром, установленным на агрегате. Из представленного примера видно, что для такого дефекта при небольшом снижении частоты амплитудного резонанса происходит двукратное снижение амплитуды резонансных колебаний агрегата.

Люфты в механических системах передачи усилий или перемещений

В работе [1] на примере механической проводки органа управления самолетом, представляющей собой систему последовательно соединенных между собой тяг и качалок, показано, что контроль люфтов в подвижных соединениях возможен по результатам резонансных испытаний. В этих испытаниях при возбуждении колебаний рулей предложено фиксировать перегрузки всех элементов проводки в местах их соединений с построением фигур Лиссажу. Для построения фигуры Лиссажу вертикальная развертка производится пропорционально сигналу датчика ускорений n , а горизонтальная – пропорционально гармонике возбуждающей силы U (сигнал управляющего генератора). Такая фигура на резонансе линейной системы является эллипсом. По нелинейным искажениям фигур Лиссажу определяются дефектные соединения. На рис. 9 показан пример фигуры Лиссажу для соединения без зазора и соединения с зазором.

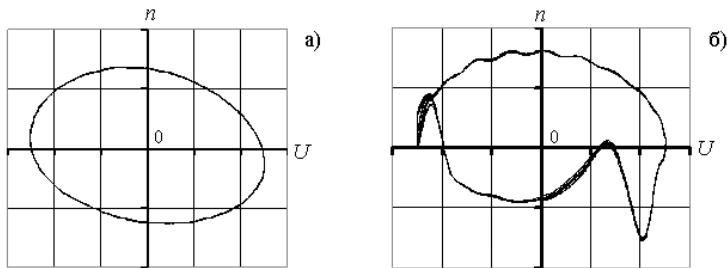


Рис. 9 – Фигура Лиссажу до (а) и после появления зазора (б)

Fig. 9 – The Lissajous figure before (a) and after (b) backlash emergence

Для численной оценки искажений используется преобразование Фурье применительно к развертке фигуры Лиссажу. Затем выделяется первая гармоника и вычитается из полного сигнала, а в остатке определяется абсолютный максимум искажений за период. Этот максимум относился к амплитуде первой гармоники, и величина отношения обозначается как ξ . Определение дефектного соединения основано на том, что значение ξ в соединении с дефектом значительно превышает значения этого параметра в других соединениях.

В качестве примера рассмотрим выявление соединения с люфтом в проводке управления самолетом, схема которой и нумерация сочленений (узлов) представлены на рис. 10.

В таблице показана локализация люфта, расположенного в узле № 6.

В работе [1] также предложена формула для определения величины люфта по результатам резонансных испытаний отклоняемой поверхности.

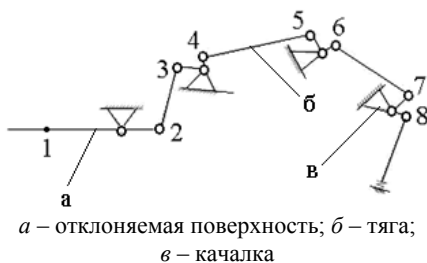


Рис. 10 – Схема проводки управления

Fig. 10 – Diagram of the control system guide

Локализация люфта / Backlash localization

№ узла	1	2	3	4	5	6	7	8
ξ	10,42	8,82	5,99	26,28	9,83	101,62	59,67	43,64

Использование этого метода для контроля люфтов в процессе эксплуатации ЛА не представляется возможным по нескольким причинам:

– внешнее динамическое воздействие на отклоняемую поверхность неуправляемо и неизвестно, поэтому нельзя построить классические фигуры Лиссажу для определения положения дефектного узла;

– для оценки величины люфта необходимо знание максимального и минимального значений собственной частоты вращения отклоняемой поверхности в зависимости от амплитуды колебаний. А их определение невозможно без использования управляемого возбуждения колебаний.

Для определения идентификационных признаков люфтов при их контроле в процессе эксплуатации были проведены экспериментальные исследования фигур трех видов. Во всех случаях вертикальная развертка производилась пропорционально ускорению n в узлах проводки управления (точки 2–8 на рис. 10), а горизонтальная развертка пропорционально:

1) первой гармонике ускорения n_1^1 в контрольной точке отклоняемой поверхности (точка 1);

2) первой гармонике скорости v_1^1 в контрольной точке 1;

3) первой гармонике ускорения n_1 в узлах проводки управления.

Имитация внешнего вибрационного воздействия на отклоняемую поверхность производилась электродинамическим вибростендом.

В качестве примера на рис. 11 показаны описанные выше фигуры в узлах 2–4, соответствующие повышенному люфту в узле № 3. Условно эти фигуры названы портретами колебаний (по аналогии с фазовым портретом), и в дальнейшем изложении им присвоены номера 1, 2, 3. Кроме того, под номером 4 представлены соответствующие фигуры Лиссажу.

Отметим, что фигуры № 1, 2, 4 на резонансе линейной системы являются эллипсами, а фигура № 3 – окружностью.

Для определения идентификационных признаков люфтов при мониторинге технического состояния подвижных соединений систем передачи усилий и перемещений портреты колебаний № 1–3, показанные на рис. 11, будем сравнивать с соответствующими фигурами Лиссажу. Кроме того, при проведении анализа портретов колебаний будем учитывать особенность конструкций механических систем передачи усилий и перемещений. В таких системах имеется не более двух

элементов, расположенных по концам цепочки соединений «тяга–качалка», обобщенные массы которых значительно превышают инерционные характеристики деталей проводки управления. Элементами с преобладающей обобщенной массой являются, например, отклоняемые поверхности органов управления, и для ЛА с безбустерным (обратимым) управлением – штурвал или ручка управления. Это означает, что при гармоническом внешнем воздействии вынужденные колебания инерционных элементов будут близкими к гармоническим, тогда как вибрации деталей проводки управления могут быть существенно нелинейными.

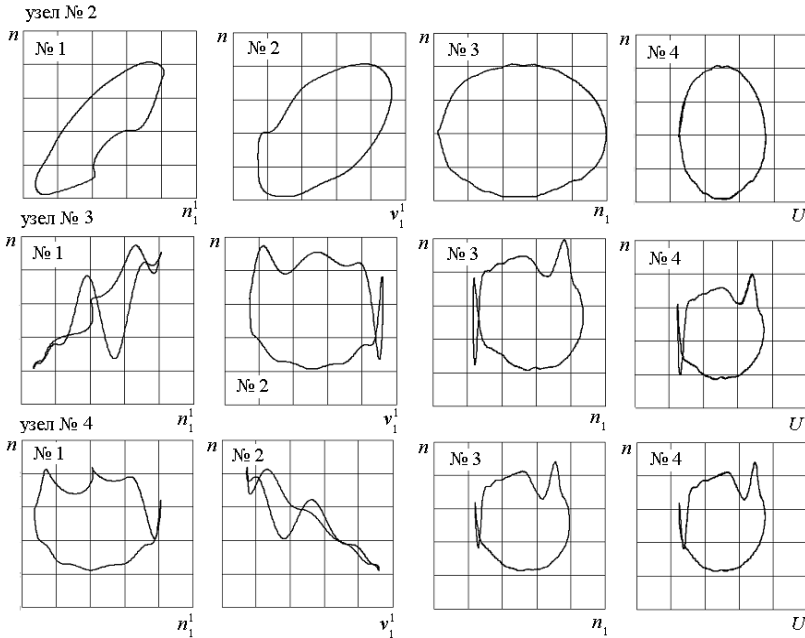


Рис. 11 – Портреты колебаний

Fig. 11 – Vibration portraits

Из представленных на рис. 11 результатов следует, что нелинейные искажения колебаний, вносимые люфтами, качественно наиболее близко к фигурам Лиссажу отслеживает портрет колебаний № 3.

Для того чтобы окончательно решить вопрос об идентификационном признаке люфтов, были сделаны численные оценки отличий портретов колебаний от эллиптической формы вследствие появления дефектов. Величины этих отличий определялись так же, как и в анализе искажений фигур Лиссажу, и обозначались как ξ_i . Индекс i соответствует номеру портрета колебаний.

Результаты проведенных исследований для случая люфта в узле № 3 показаны на рис. 12 (здесь N – номер узла проводки управления), из которых следует, что портрет колебаний № 2 не может являться идентификационным признаком люфтов. Максимальные искажения этого портрета не соответствуют положению дефекта. При этом распределения величин параметра ξ для портретов колебаний № 1 и № 3 позволяют выявить дефектный узел. Учитывая, что портрет колебаний № 3 не только количественно, но и качественно идентифицирует люфты, его следует принять в качестве идентификационного признака для локализации такого дефекта.

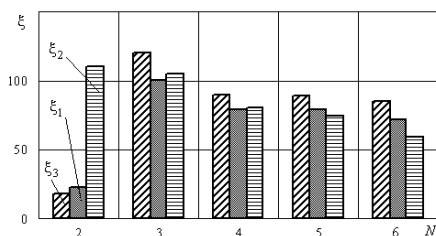


Рис. 12 – Искажения портретов колебаний

Fig. 12 – Vibration portrait distortions

Для оценки размера люфта необходимо привлекать дополнительную экспериментальную информацию, полученную в наземных условиях. Такой информацией является зависимость искажений портрета колебаний, возникающих при появлении люфта, от величины люфта для каждого узла проводки управления.

На рис. 13 показан пример зависимости искажений портретов колебаний № 1 и № 3 от величины люфта в узле № 2. Несмотря на то что портрет колебаний № 1 не может быть использован для локализации люфта, изменение величины дефекта в конкретном узле он отражает адекватно.

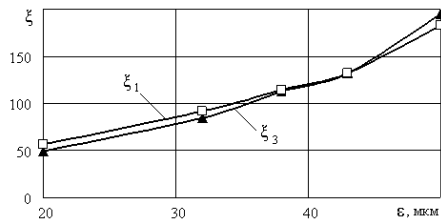


Рис. 13 – Зависимости искажений портретов колебаний от величины люфта

Fig. 13 – Dependences of vibration portrait distortions on the backlash value

Рис. 14 иллюстрирует искажения портрета колебаний № 3 при различных величинах люфта в узле № 3.

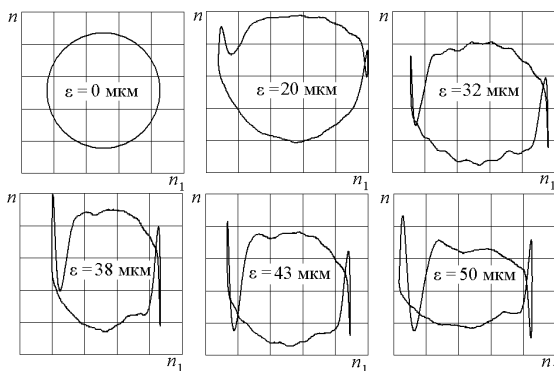


Рис. 14 – Искажения портрета колебаний № 3

Fig. 14 – Distortions of vibration portraits No 3

Из представленных результатов следует, что по искажениям портрета колебаний № 3 можно выявить дефектное подвижное соединение в системе передачи усилий или перемещений и оценить величину люфта.

Сухое трение в опорах отклоняемых поверхностей

Экспериментальные исследования, направленные на выявление идентификационного признака для сухого трения в подвижных соединениях отклоняемых поверхностей, проводились на специальном стенде, в котором объектом испытаний являлся стабилизатор самолета с рулем высоты [2]. Схема руля показана на рис. 15. Внешнее вибрационное воздействие имитировалось электродинамическим вибростендом. Возбуждающая сила прикладывалась к задней кромке руля в точке с номером 0. Измерения колебаний руля производились в точках 0–4.

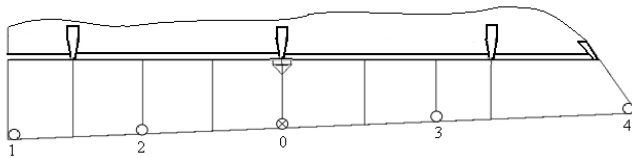


Рис. 15 – Схема руля высоты

Fig. 15 – Diagram of the elevation rudder

Для создания сухого трения в опорах руля осуществлялось смещение концевой опоры отклоняемой поверхности от штатного положения. Для этого часть нервюры стабилизатора с концевым узлом навески руля была вырезана и зажата между двумя швеллерами, закрепленными на стабилизаторе. Между верхней поверхностью вырезанного узла и нижней поверхностью верхнего швеллера был установлен пакет из пластин разной толщины. Убирая пластины из пакета, можно получить различные по величине смещения концевой опоры руля.

Отметим, что концевая опора руля смещалась по вертикали в диапазоне 0–4 мм. Усилие, необходимое для смещения опоры на 1 мм, составляло 107,8 Н.

Для определения идентификационных признаков сухого трения были проведены экспериментальные исследования тех же трех видов фигур, что и при диагностировании люфтов: вертикальная развертка производилась пропорционально ускорению n в контрольных точках на отклоняемой поверхности (точки № 1–4 на рис. 15), а горизонтальная развертка пропорционально:

- 1) первой гармонике ускорения n_0^1 в контрольной точке отклоняемой поверхности (точка 0);
- 2) первой гармонике скорости v_0^1 в контрольной точке 0;
- 3) первой гармонике ускорения n_1 в точках 1 – 4.

Отклонения этих фигур от фигур линейной системы так же, как и ранее, характеризовались параметром ξ .

С ростом силы трения (увеличением смещения концевой опоры e) портреты колебаний меняются. Численно эти изменения для точки № 4 иллюстрирует рис. 16, а их распределения между точками измерений при $e = 4$ мм – рис. 17. На рис. 18 показаны портреты колебаний в точке 4 при $e = 4$ мм.

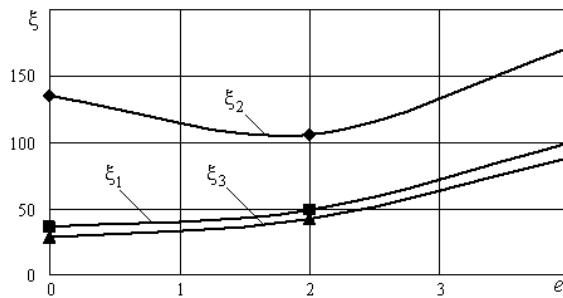


Рис. 16 – Искажения портретов колебаний в точке № 4

Fig. 16 – Distortions of vibration portraits at point 4

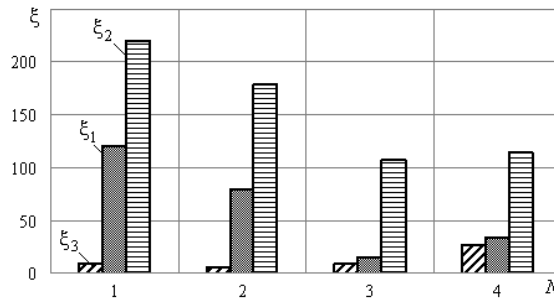


Рис. 17 – Искажения портретов колебаний при $e = 4$ мм

Fig. 17 – Distortions of vibration portraits with $e = 4$ mm

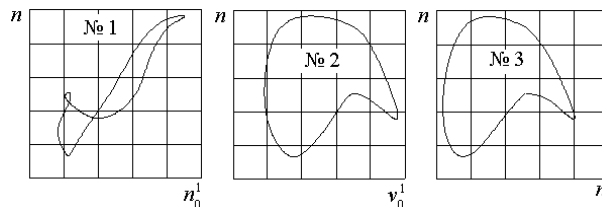


Рис. 18 – Портреты колебаний для точки 4 при $e = 4$ мм

Fig. 18 – Vibration portraits of point 4 with $e = 4$ mm

Из рисунков 16–18 следует:

- портреты колебаний № 2 и № 3 качественно одинаково отражают наличие сухого трения в объекте контроля, что может быть использовано для контроля достоверности результатов анализа экспериментальных данных;
- искажения портрета колебаний № 2 не соответствуют изменению величины сухого трения;
- искажения портретов колебаний № 1 и № 2 не позволяют различать опоры, в которых разное сухое трение.

На основании представленных результатов исследований можно сделать вывод о том, что портрет колебаний № 3 может быть принят в качестве идентификационного признака сухого трения в опорах отклоняемых поверхностей. Это заключение базируется на том, что нелинейные искажения этого портрета отслеживают изменения величины сухого трения и позволяют локализовать дефект.

Существенно более сложной задачей является определение величины сухого трения в опорах отклоняемых поверхностей. При помощи найденного идентификационного признака можно установить наличие сухого трения в опорах и даже различить опоры, в которых разное сухое трение, но пока не удастся установить количественную связь между степенью искажений портрета колебаний и величиной сухого трения в опоре.

Для случая, когда имеется расчетная динамическая модель отклоняемой поверхности, можно сделать оценку суммарной величины трения по изменению частоты амплитудного или фазового резонанса вращения отклоняемой поверхности. Пример зависимости этих изменений от смещения концевой опоры рассмотренного выше руля высоты самолета представлен на рис. 19. Но для того, чтобы воспользоваться этими результатами, необходимо достоверно определить резонансные частоты для малых амплитуд колебаний органа управления.

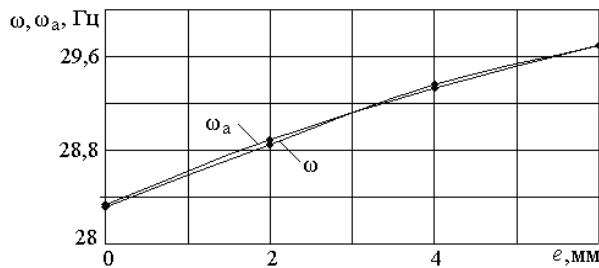


Рис. 19 – Зависимости частот амплитудного ω_a и фазового ω резонансов от смещения опоры

Fig. 19 – Dependencies of amplitude ω_a and phase ω resonances on the support displacement

Если удастся зафиксировать затухающие колебания отклоняемой поверхности, что возможно после посадочного удара, то суммарную величину сухого трения в опорах и проводке управления отклоняемой поверхности можно определить из условия минимума различия площадей петли гистерезиса в расчетной модели и в реальной конструкции.

Резонансные режимы колебаний элементов планера ЛА и его систем

В эксплуатации серийных ЛА резонансные колебания элементов конструкций являются достаточно редким дефектом, устраняемым, как правило, на этапе отработки опытного изделия. Исключения могут составлять, например, элементы бортовых трубопроводных систем: топливной, гидравлической, тепловой противообледенительной, пневматической и кондиционирования воздуха. При проектировании таких систем для предотвращения резонансных режимов колебаний трубопроводов необходимо выполнить следующие, зачастую взаимоисключающие или трудновыполнимые одновременно требования:

- в зависимости от диаметра и толщины стенки трубопровода расстояние между его опорами не должно превышать определенной величины;
- опоры трубопроводов должны устанавливаться строго на силовых элементах планера.

Такие требования призваны обеспечить трубопроводам более высокие собственные частоты, чем частоты вращения двигателей. Учитывая, что на современном ЛА установлено большое количество агрегатов, имеющих вращающиеся

части и являющихся источниками вибраций наряду с внешним вибрационным воздействием, не всегда удается избежать повышенных эксплуатационных вибраций таких систем. Если же речь идет о бортовых трубопроводных системах, рабочим телом в которых являются жидкости, то дополнительным источником вибраций могут являться турбулентные течения и пульсации этих жидкостей.

Идентифицировать резонансные режимы колебаний элементов планера и систем ЛА достаточно несложно. Для этого необходимо установить акселерометры на эти элементы и произвести запись АЧХ (рис. 1) или СПМ (рис. 2) случайной вибрации на всех режимах полета, включая гонки двигателей на земле. Но если речь идет о контроле вибраций трубопроводных систем, в которых возможны турбулентные течения и пульсации внутреннего давления, то повышенная динамическая нагруженность трубопроводов может определяться напряжениями в окружном направлении. В этих случаях такие системы необходимо оборудовать датчиками напряжений. В качестве примера на рис. 20 показан резонансный режим колебаний трубопровода тепловой противообледенительной системы. Здесь σ – окружные напряжения в стенке трубопровода.

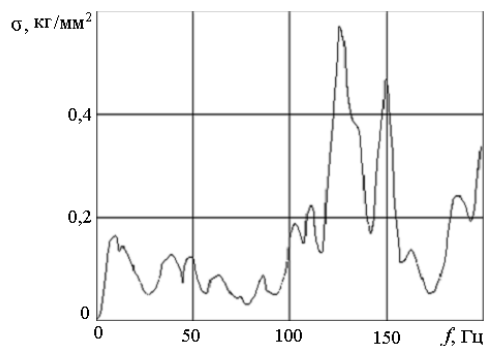


Рис. 20 – Вибрации трубопровода противообледенительной системы

Fig. 20 – Vibrations of the deicing system pipeline

Анализ результатов, представленных на рис. 20, показал, что резонансная частота трубопровода, равная 125 Гц, соответствует частоте вращения двигателей на крейсерском режиме полета.

2. Выбор режимов полета для идентификации дефектов

После описания идентификационных признаков типовых дефектов конструкции ЛА, возникающих в процессе эксплуатации, необходимо составить перечень режимов полета, в которых проявляются эти признаки.

Для контроля целостности конструкции и креплений агрегатов по АЧХ и СПМ случайной вибрации необходимо использовать взлетный режим, характеризующийся работой двигателей с полной мощностью и отклоненной (выдвинутой) на максимальный угол механизацией. Здесь фиксируется СПМ случайной вибрации элементов планера и систем в результате воздействия реактивной струи двигателя; контролируется амплитуда перегрузок элементов и агрегатов систем в зависимости от оборотов двигателей, измеряются вибрации, возникающие в результате турбулентного обтекания ЛА. Для идентификации дефектов крепления агрегатов полезна также информация о вибрациях на рулении, разбеге, пробеге по аэродрому, когда в результате переезда самолета через неровности возникают интенсивные низкочастотные гармонические колебания агрегатов и элементов планера.

Кроме того, подобные вибрационные нагружения конструкции ЛА возникают при полете в беспокойном воздухе и при посадочном ударе. Взлетный режим, полет в беспокойном воздухе и посадка в условиях турбулентной атмосферы характеризуются высокими динамическими нагрузками на отклоняемые поверхности ЛА. Поэтому по результатам измерений вибраций на этих режимах полета возможна идентификация люфтов в механических системах передачи усилий или перемещений, а также сухого трения в опорах органов управления.

Выводы

В статье рассмотрена задача идентификации эксплуатационных дефектов планера и систем ЛА, которые выявляются по параметрам вибраций. К таким дефектам относятся, например, нарушение целостности конструкции, ослабление креплений и зазоры в местах стыковки агрегатов, люфты в механических системах передачи усилий или перемещений, повышенное сухое трение в опорах отклоняемых поверхностей, резонансные режимы колебаний элементов конструкций. В результате исследований влияния дефектов на динамические характеристики ЛА определены идентификационные признаки типовых дефектов. Так, идентификационными признаками трещин и разрушений в конструкциях, ослабления креплений и наличия зазоров в местах стыковки агрегатов, возникновения резонансных режимов колебаний элементов конструкций являются амплитудно-частотные характеристики и спектральные плотности мощности случайной вибрации, зафиксированные датчиками ускорений. Для идентификации люфтов в проводках управления и сухого трения в опорах отклоняемых поверхностей предложено использовать искажения портретов вынужденных колебаний. Установлены режимы полета, в которых возможна идентификация дефектов в процессе эксплуатации ЛА.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бернс В.А., Белоусов А.И., Самуйлов В.Ф.** Контроль люфтов в проводках управления летательных аппаратов по результатам резонансных испытаний отклоняемых поверхностей // *Техника воздушного флота*. – 2010. – Т. 84, № 1 (698). – С. 15–19.
2. **Бернс В.А., Присекин В.Л.** Динамические характеристики отклоняемой поверхности со смещенной опорой // *Вестник Московского авиационного института*. – 2011. – Т. 18, № 2. – С. 5–8.
3. **Большаков В.П., Законников Е.А.** Вибродиагностика конструкций по формам их собственных колебаний // *Вибродиагностика и виброзащита машин и приборов: межвузовский сборник научных трудов*. – Иваново: Изд-во Иванов. ун-та, 1989. – С. 71–76.
4. *Вибродиагностика авиационных конструкций* / науч. ред. А.Б. Милов, М.З. Фридман. – М.: ГосНИИ ГА, 1986. – 95 с. – (Труды ГосНИИ ГА; вып. 256).
5. Исследование причин разрушения трубопроводов противообледенительной системы самолёта Су-24М / А.П. Бобрышев, В.А. Бернс, В.И. Капустин, В.В. Красовский, С.А. Лазненко, В.Л. Присекин, В.Ф. Самуйлов, В.Н. Чаплыгин // *Аэродинамика и прочность конструкций летательных аппаратов: труды Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 60-летию отделений аэродинамики летательных аппаратов и прочности авиационных конструкций*, Новосибирск, СибНИА, 15–17 июня 2004 г. – Новосибирск: СибНИА, 2005. – С. 297–298.
6. **Крылов Н.И., Ноздрин М.А., Шапин В.И.** Динамические методы контроля трещинообразования прецизионных элементов конструкций // *Вибротехника: межвузовский сборник научных трудов / Каунасский политехнический институт*. – Вильнюс: Мокслас, 1989. – № 63 (2). – С. 49–54.
7. Выявление дефектов космических аппаратов в процессах испытаний на вибрационные и акустические воздействия в испытательной лаборатории / В.И. Халиманович, А.К. Шатров, Е.А. Лысенко, М.Д. Евтифьев // *Вестник СибГАУ*. – 2005. – № 6. – С. 174–178.

8. **Мотылев Н.И.** Выявление механических дефектов в элементах реакторов и конструкций АЭС при тестовых виброударных воздействиях // Технологии и системы обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: сборник научных трудов / Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова. – СПб.: Менделеев, 2004. – Вып. 2. – С. 126–131.
9. **Постнов В.А.** Определение повреждений упругих систем путем математической обработки частотных спектров, полученных из эксперимента // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2000. – № 6. – С. 155–160.
10. **Постнов В.А., Шлоттманн Г.** Использование экспериментальных данных об изменении динамических свойств упругих систем в задачах определения структурных повреждений // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Механика. – 2004. – № 1 (6). – С. 32–42.
11. **Турчинский Л.А., Фридман М.З.** Использование динамических моделей для дефектации сложных конструкций // Динамика и прочность поврежденных конструкций авиационной техники: материалы 4 Всесоюзного научно-технического совещания (26–28 апреля 1983 г.). – М., 1984. – С. 54–60.
12. **Шевелев Н.А., Домбровский И.В.** Численное исследование динамических характеристик элементов конструкций с дефектами формы // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. – 2009. – № 1. – С. 160–163.
13. **Chen J.C., Garba J.A.** Structural damage assessment using a system identification technique // Structural Safety Evaluation Based on System Identification Approaches: Proceedings of the Workshop at Lambrecht/Pfalz, June 29th–July 1st, 1987. – Braunschweig: Springer Fachmedien Wiesbaden, 1988. – P. 474–492. – doi: 10.1007/978-3-663-05657-7_24.
14. **Balis Crema L., Casteilani A., Peroni I.** Modal tests on composite material structures: application in damage detection // Proceedings of the 3rd International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida, January 28–31, 1985. – Schenectady, New York: Union College, 1985. – Vol. 2. – P. 708–713.
15. **Daněk O.** A contribution to fault vibration diagnosis of structures and machines // Stroj času. – 1992. – Vol. 43, N 1. – P. 13–19.
16. **Pandey A.K., Biswas M., Samman M.M.** Damage detection from changes in curvature mode shapes // Journal of Sound and Vibration. – 1991. – Vol. 145, iss. 2. – P. 321–332. – doi: 10.1016/0022-460X(91)90595-B.
17. **Park Y.S., Park H.S., Lee S.S.** Weighted-error-matrix application to detect stiffness damage by dynamic-characteristic measurement // Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis. – 1988. – Vol. 3, N 3. – P. 101–107.
18. **Perera R., Fang S.E., Huerta C.** Structural crack detection without updated baseline model by single and multiobjective optimization // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2009. – Vol. 23, iss. 3. – P. 752–768. – doi: 10.1016/j.ymsp.2008.06.010.
19. **Rucker W.** Zustandsprüfung von Bauwerken und Bauteilen mit Hilfe schwingungstechnischer Methoden – Konzept, Anwendungsbeispiele und Ausblick // Amts- und Mitteilungsblatt. – 1988. – Bd. 18, ausg. 2. – P. 134–141.

AIRCRAFT DEFECT IDENTIFICATION BY VIBRATION PARAMETERS IN OPERATION

Berns V.A.¹, Lysenko E.A.², Marinin D.A.², Dolgoplov A.V.³, Zhukov E.P.⁴

¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

²*JSC Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems,
Zheleznogorsk, Russian Federation*

³*Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N.E. Zhukovsky,
Zhukovsky, Russian Federation*

⁴*Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Chaplygin,
Novosibirsk, Russian Federation*

The article considers the problem of identification of operational defects in the airframe and aircraft systems which can be detected by vibration parameters. These defects include, for exam-

ple, a loss of structural integrity, looseness of unit attachment and gaps in joining points, backlashes in mechanical systems of force or movement transfer, increased coulomb friction in the deflecting surface supports, the resonant vibration modes of airframe components and systems. The existing methods of structure vibration inspection are based mainly on the fact that due to damages there appear changes in frequencies, forms and damping of mechanical system self-vibrations. To implement these methods, a linear design model of the initial system is constructed, and locations and values of arising damages are determined by changes in dynamic characteristics of the undamaged structure. Monitoring of these changes is usually based on the results of vibration tests of the objects of verification under ground-based conditions. Studies of the influence of defects on the aircraft dynamic response carried out in the present work helped to determine identification characteristics of typical defects to control them during operation. Thus, amplitude-frequency characteristics and power spectrum densities of random vibrations recorded by an acceleration sensor are identification signs of cracks and damages in structures, looseness of unit attachment and presence of gaps in joining points as well as the occurrence of vibration resonant modes of structural elements. It is proposed to use distortions of forced vibration portraits to identify control linkage backlashes and coulomb friction in the deflecting surfaces supports. Flight conditions in which operational defects can be identified are also revealed.

Keywords: aircraft, loss of structural integrity, backlashes, gaps, coulomb friction, identification signs, monitoring of defects.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-24-42

REFERENCES

1. Berns V.A., Belousov A.I., Samuilov V.F. Kontrol' lyuftov v provodkakh upravleniya letatel'nykh apparatov po rezul'tatam rezonansnykh ispytaniy otklonyaemykh poverkhnostei [Monitoring of aircraft control linkage backlashes by the results of deflecting surfaces resonance tests]. *Tekhnika vozdushnogo flota – Aviation Science and Technology*, 2010, vol. 84, no. 1 (698), pp. 15–19.
2. Berns V.A., Prisekin V.L. Dinamicheskie kharakteristiki otklonyaemoi poverkhnosti so smeshchennoi oporoi [Dynamic characteristics of the deflectable surface with shifted support]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta – Bulletin of the Moscow Aviation Institute*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 5–8.
3. Bol'shakov V.P., Zakonnikov E.A. Vibrodiagnostika konstruksii po formam ikh sobstvennykh kolebaniy [Structures vibrodiagnostics by their eigentones modes]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov "Vibrodiagnostika i vibrozashchita mashin i priborov"* [Interuniversity proceedings "Vibration analysis and vibration protection of machines and devices"], 1989, pp. 71–76.
4. Milov A.B., Fridman M.Z., sci. eds. *Trudy GosNII GA "Vibrodiagnostika aviatsionnykh konstruksii"* [Proceedings of the Research Institute of Civil Aviation "Vibrodiagnostics aircraft structures". Iss. 256]. Moscow, 1986. 95 p.
5. Bobryshev A.P., Berns V.A., Kapustin V. I., Krasovskii V.V., Laznenko S.A., Prisekin V.L., Samuilov V.F., Chaplygin V.N. [Study of the aircraft Su-24M anti-icing duct destruction causes]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii, posvyashchenoi 60-letiyu otdelenii aerodinamiki letatel'nykh apparatov i prochnosti aviatsionnykh konstruksii* [Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference «Aerodynamics and strength of aircraft structures», devoted to the 60th Anniversary of departments of Aerodynamics of Aircrafts and Strength of Aviation Structures, Novosibirsk, 15–17 June, 2004]. Novosibirsk, SibNIA Publ., 2005, pp. 297–298.
6. Krylov N.I., Nozdrin M.A., Shapin V.I. [Dynamic methods of precision structural elements crack control]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov "Vibrotekhnika"* [Interuniversity proceedings "Vibrotechnika"], 1989, no. 63 (2), pp. 49–54.
7. Khalimanovich V.I., Shatrov A.K., Lysenko E.A., Evtif'ev M.D. Vyavlenie defektov kosmicheskikh apparatov v protsessakh ispytaniy na vibratsionnye i akusticheskie vozdeistviya v ispytatel'noi laboratorii [Detection of defects in spacecrafts during vibration/acoustic tests under laboratory environment]. *Vestnik SibGAU – SibSAU Bulletin*, 2005, no. 6, pp. 174–178.

8. Motylev N.I. [Detection of mechanical defects in the elements of NPP reactors and structures under test vibroimpact]. *Sbornik nauchnykh trudov Nauchno-issledovatel'skogo tekhnologicheskogo instituta im. A.P. Aleksandrova "Tekhnologii i sistemy obespecheniya zhiznennogo tsikla yadernykh energeticheskikh ustanovok"* [Collection of proceedings of the Scientific and Research Technological Institute named after A.P. Alexandrov "Technology and systems of nuclear power plants life cycle support"], 2004, iss. 2, pp. 126–131.
9. Postnov V.A. Opredelenie povrezhdenii uprugikh sistem putem matematicheskoi obrabotki chastotnykh spektrov, poluchennykh iz eksperimenta [Damage identification in elastic systems by mathematical treatment of experimentally obtained frequency spectra]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela – Mechanics of Solids*, 2000, no. 6, pp. 155–160.
10. Postnov V.A., Shlottmann G. Ispol'zovanie eksperimental'nykh dannykh ob izmenenii dinamicheskikh svoystv uprugikh sistem v zadachakh opredeleniya strukturnykh povrezhdenii [Application of experimental data on the elastic systems dynamic properties changing in problems of structural damages assessment]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Seriya Mekhanika – Bulletin of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Mechanics*, 2004, no. 1 (6), pp. 32–42.
11. Turchinskii L.A., Fridman M.Z. Ispol'zovanie dinamicheskikh modelei dlia defektatsii slozhnykh konstruksii [Application of dynamic models for fault detection of complex structures]. *Materialy 4 Vsesoyuznogo nauchno-tekhnicheskogo soveshchaniya "Dinamika i prochnost' povrezhdennykh konstruksii aviatsionnoi tekhniki"* [Proceedings of 4 All-Soviet Union scientific-technical conference "Dynamics and strength of damaged aircraft structures", 26–28 April, 1983]. Moscow, 1984, pp. 54–60.
12. Shevelev N.A., Dombrovskii I.V. Chislennoe issledovanie dinamicheskikh kharakteristik elementov konstruksii s defektami formy [Numerical study on the dynamic characteristics of structural elements with shape defects]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika – Perm State Technical University Mechanics Bulletin*, 2009, no. 1, pp. 160–163.
13. Chen J.C., Garba J.A. Structural damage assessment using a system identification technique. *Structural Safety Evaluation Based on System Identification Approaches: Proceedings of the Workshop at Lambrecht/Pfalz, June 29th–July 1st, 1987*. Braunschweig, Springer Fachmedien Wiesbaden, 1988, pp. 474–492. doi: 10.1007/978-3-663-05657-7_24
14. Balis Crema L., Casteilani A., Peroni I. Modal tests on composite material structures application in damage detection. *Proceedings of the 3rd International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida, January 28–31, 1985, Schenectady, New York, Union College, 1985, vol. 2, pp. 708–713.
15. Daněk O. A contribution to fault vibration diagnosis of structures and machines. *Stroj času*, 1992, vol. 43, no. 1, pp. 13–19.
16. Pandey A.K., Biswas M., Samman M.M. Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, vol. 145, iss. 2, pp. 321–332. doi: 10.1016/0022-460X(91)90595-B
17. Park Y.S., Park H.S., Lee S.S. Weighted-error-matrix application to detect stiffness damage by dynamic-characteristic measurement. *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 1988, vol. 3, no. 3, pp. 101–107.
18. Perera R., Fang S.E., Huerta C. Structural crack detection without updated baseline model by single and multiobjective optimization. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, vol. 23, iss. 3, pp. 752–768. doi:10.1016/j.ymsp.2008.06.010
19. Rucker W. Zustandsprüfung von Bauwerken und Bauteilen mit Hilfe schwingungstechnischer Methoden-Konzept, Anwendungsbeispiele und Ausblick. *Amts- und Mitteilungsblatt*, 1988, bd. 18, ausg. 2, pp. 134–141.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Бернс Владимир Андреевич – родился в 1952 году, д-р техн. наук, профессор кафедры прочности летательных аппаратов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: динамика и прочность летательных аппаратов. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: v.berns@yandex.ru).

Berns Vladimir Andreevich (b. 1952) – Doctor of Science (Eng.), Assistant Professor, Professor of the Aircraft Strength Department of the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on dynamics and strength of aircraft. He is author of more than 80 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: v.berns@yandex.ru).



Лысенко Евгений Александрович – родился в 1952 году, канд. техн. наук, заместитель начальника отдела ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева». Область научных интересов: виброакустические испытания авиационно-космической техники. Опубликовано 19 научных работ. (Адрес: 662972, Россия, Железногорск, ул. Ленина, 52. Email: mla340@iss-reshetnev.ru).

Lysenko Evgeniy Aleksandrovich (b. 1952) – PhD (Eng.). Deputy Head of the Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems department, JSC. His research interests are currently focused on vibroacoustic tests of aerospace vehicles. He is author of 19 scientific papers. (Address: 52, Lenin St., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation. Email: mla340@iss-reshetnev.ru).



Маринин Дмитрий Александрович – родился в 1954 году, начальник отдела ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева». Область научных интересов: динамические испытания авиационно-космической техники. Опубликовано 9 научных работ. (Адрес: 662972, Россия, Железногорск, ул. Ленина, 52. Email: marinin@iss-reshetnev.ru).

Marinin Dmitry Aleksandrovich (b. 1954) – Head of the Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems department, JSC. His research interests are currently focused on dynamic tests of aerospace vehicles. He is author of 9 scientific papers. (Address: 52, Lenin St., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation. Email: marinin@iss-reshetnev.ru).



Долгополов Антон Валерьевич – родился в 1985 году, младший научный сотрудник ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского». Область научных интересов: динамика и прочность летательных аппаратов. Опубликовано 6 научных работ. (Адрес: 140180, Россия, Жуковский, ул. Жуковского, 1. Email: dolganton@yandex.ru).

Dolgoplov Anton Valerievich (b. 1985) – junior research worker, Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky. His research interests are currently focused on dynamics and strength of aircraft. He is author of 6 scientific papers. (Address: 1, Zhukovsky St., Zhukovsky, 140180, Russian Federation. Email: dolganton@yandex.ru).



Жуков Егор Павлович – родился в 1990 году, инженер ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Часплыгина». Область научных интересов: динамика и прочность летательных аппаратов. (Адрес: 630051, Россия, Новосибирск, ул. Ползунова, 21/1. Email: zh-ep@yandex.ru).

Zhukov Egor Pavlovich (b. 1990) – engineer in the Siberian Aeronautical Research Institute named after S. A. Chaplygin. His research interests are currently focused on dynamics and strength of aircraft. (Address: 21/1, Polzunov St., Novosibirsk, 630051, Russian Federation. Email: zh-ep@yandex.ru).

*Статья поступила 17 февраля 2015 г.
Received February 17, 2015*

To Reference:

Berns V.A., Lysenko E.A., Marinin D.A., Dolgoplov A.V., Zhukov E.P. Identifikatsiya defektov letatel'nykh apparatov po parametram vibratsii v protsesse ekspluatatsii [Aircraft defect identification by vibration parameters in operation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 24–42. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-24-42

УДК 621.39:519.2

**СИСТЕМА РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ –
АРХИТЕКТУРА И АЛГОРИТМЫ****В.Н. Васюков¹, А.Ю. Зайцева¹, В.В. Бондаренко²**¹*Новосибирский государственный технический университет*²*ОАО «Технопарк Новосибирского Академгородка»*

Предлагаются принципы построения видеосистемы раннего обнаружения лесных пожаров, включая архитектуру, алгоритмы предварительной обработки изображений и анализа видеопоследовательности с целью обнаружения и распознавания дымового облака, являющегося первым признаком начинающегося пожара. Система включает совокупность видеокамер, установленных на возвышениях и объединенных в единую сеть с сервером, входящим в состав диспетчерского пункта. Камеры совершают круговой обзор с получением изображений лесного массива, смещенных относительно друг друга на фиксированный угол по азимуту (например, при смещении на 45° панорама содержит 8 изображений). Информативными признаками при обнаружении дымовых облаков являются яркостный контраст и движение облаков относительно фона. Фон, образованный изображениями деревьев, является неоднородным вследствие перспективных искажений при наблюдении под различными углами, а также ввиду различий яркости для переднего и заднего плана. Предварительная обработка изображений направлена на выравнивание фона по яркости и компенсацию перспективных искажений с целью обеспечения благоприятных условий для работы алгоритма контрастного обнаружения и алгоритма обнаружения движения. Алгоритм контрастного обнаружения основан на анализе динамики связанных компонент пороговых множеств и обладает слабой чувствительностью к априорно неизвестным параметрам изображений, однако предполагает однородность фона, на котором наблюдается более яркое пятно неизвестной формы и размера (возможно, два или три таких пятна). Движение дымового облака обнаруживается на основе анализа разности двух изображений, полученных в соседних циклах обзора местности. Для исследования эффективности алгоритмов предложена методика на основе моделирования изображений дымовых облаков на динамическом фоне, включающем реальное изображение лесного массива с имитацией его движения. Приведены результаты сравнения эффективности разработанных и известных алгоритмов.

Ключевые слова: лесные пожары, раннее обнаружение, видеонаблюдение, облачная архитектура, имитационное моделирование.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-43-56

Введение

Проблема своевременного обнаружения лесных пожаров актуальна для многих стран, обладающих значительными лесными ресурсами. К традиционным методам противопожарного мониторинга лесных массивов относятся наземный, воздушный и спутниковый [1]. Первый сводится к визуальному контролю лесных массивов, осуществляемому наблюдателем с пожарной наблюдательной вышки. Недостатком данного метода является необходимость постоянного присутствия наблюдателя на посту. Кроме наземного метода широко применяется воздушный

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госзадание, проект № 1176).

© 2015 В.Н. Васюков, А.Ю. Зайцева, В.В. Бондаренко

метод контроля лесных массивов: работниками служб противопожарной безопасности совершается облет лесных территорий на вертолетах или самолетах. В последние годы приобрели популярность беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [2]. Наземный пункт управления БПЛА служит центром сбора информации, в том числе потока видеоданных, регистрируемых с борта БПЛА. Для обнаружения лесных пожаров и распознавания очагов возгорания также используются спутниковые системы [3]. Воздушный и спутниковый методы контроля являются сравнительно дорогостоящими, поэтому широкое применение получили системы наземного наблюдения, основанные на применении совокупности датчиков, размещенных на охраняемой территории.

В качестве датчиков в наземных системах противопожарного мониторинга могут использоваться видеокамеры диапазона видимого излучения, обеспечивающие наблюдение дыма в дневное время и пламени огня пожара – в ночное; тепловизоры, улавливающие излучаемый пламенем тепловой поток; ИК-спектрометры, позволяющие измерять характеристики теплового излучения; лазерные локаторы ИК-диапазона [4]. Лазерные и ИК-системы имеют высокую чувствительность и обеспечивают большую достоверность, однако по сравнению с системами, использующими ПЗС-камеры видимого диапазона, – значительно более высокую стоимость. Поэтому наиболее приемлемым решением задачи раннего обнаружения лесных пожаров считается создание систем, основанных на применении ПЗС-камер видимого и ближнего ИК спектрального диапазона.

Во многих странах мира, где остро стоит проблема борьбы с лесными пожарами, используются подобные друг другу системы противопожарного мониторинга, основанные на использовании видеокамер [1], [4–8]. Работа оператора такой системы заключается в непрерывном визуальном анализе состояния лесных массивов, что приводит к быстрому утомлению и снижению эффективности обнаружения. Поэтому общая тенденция в развитии таких систем заключается в повышении степени автоматизации и передаче большей части функций оператора компьютерной программе. Получаемые камерами изображения передаются по каналам связи в диспетчерский пункт, где подвергаются компьютерной обработке и анализу. При обнаружении компьютерной программой признаков пожара подается сигнал тревоги, который побуждает оператора к анализу подозрительной области, отображаемой на экране, с использованием ручного управления камерой (изменение направления оптической оси камеры, поворот, изменение масштаба), после чего оператор принимает окончательное решение о наличии либо отсутствии возгорания. Увеличение площади, покрываемой совокупностью камер, требует увеличения их количества, что приводит к снижению эффективности системы, так как оператору приходится контролировать большее число камер, в результате чего резко возрастает его утомляемость. Отсюда возникает необходимость создания автоматизированных процедур обработки изображений с целью обнаружения на них признаков пожара, распознавания очага возгорания и определения его географических координат для вызова пожарной бригады. Автоматизация увеличивает общую эффективность системы, обеспечивает точность и своевременность обнаружения, ограниченные влиянием человеческого фактора.

Подобная система с рабочим названием FireStation, созданная сотрудниками Новосибирского государственного технического университета [9, 10], в течение ряда лет используется муниципальным предприятием «Горзеленхоз» для мониторинга лесных массивов в городской черте Новосибирска. Опыт эксплуатации привел к необходимости совершенствования как программного обеспечения, так и архитектуры системы.

Данная статья посвящена краткому описанию архитектурных решений и разработанных алгоритмов, воплощенных в новом варианте системы, а также предлагаемой методики сравнительной оценки эффективности видеосистем раннего обнаружения лесных пожаров.

1. Состав и принцип действия системы

Принцип функционирования действующей системы противопожарного мониторинга FireStation основан на работе комплекта купольных веб-камер, установленных на возвышениях (вышках, башнях, зданиях) и осуществляющих панорамный обзор потенциально опасных с точки зрения возникновения пожара участков лесных массивов [10]. Панорамный обзор осуществляется дискретно, с фиксированным шагом по азимуту, поэтому камеры автоматически устанавливаются с высокой точностью в одинаковые положения после завершения полного цикла обзора. Информация в виде изображений поступает от веб-камер по радиоканалам в диспетчерский пункт, программное обеспечение которого выполняет предварительную обработку и анализ с целью обнаружения дыма в дневное время и плameni – в ночное.

Недостатком действующей системы является жесткая архитектура, ориентированная на использование камер определенного типа и доступ к ним только с центрального компьютера по радиоканалу. Новое программное обеспечение системы должно обладать адаптивностью к различным аппаратным решениям, обеспечивать требуемые быстродействие и точность. Должна быть обеспечена высокая достоверность принимаемых решений и точность определения координат очагов возгорания, достаточная для своевременного принятия противопожарных мер. Программное обеспечение системы не должно требовать специального обучения оператора, предполагается наличие достаточно общих навыков работы с компьютером на уровне неквалифицированного пользователя. Необходимо обеспечить возможность выбора типа и модели видеокамер для применения в системе противопожарного мониторинга исходя из интересов пользователя. Программное обеспечение должно содержать средства отображения событий на on-line-картах, фиксации событий в журналах, ведение фото- и видеоархивов, должна быть обеспечена возможность удаленного доступа и другие сервисные функции, расширяющие возможности системы, повышающие ее гибкость и надежность.

С учетом перечисленных требований в основу модернизированной системы FireStation положена клиент-серверная архитектура, в которой вся обработка поступающей информации сосредоточена на сервере сети [11]. Отличительной особенностью вновь разработанного программного обеспечения является возможность работы с системой без установки специализированного программного обеспечения на компьютер пользователя (оператора). В качестве клиентского приложения выступает web-браузер. Таким образом, теперь при изменении логики функционирования системы изменяется лишь программное обеспечение сервера, и нет необходимости изменять клиентские приложения и обновлять их у всех пользователей. Кроме того, максимально снижаются требования к аппаратуре пользователей. Так как все данные – параметры настройки камер, полученные изображения, результаты их обработки, отчеты – хранятся в базе данных сервера, FireStation представляет собой универсальную систему с множественным доступом и независимым интерфейсом. Для связи удаленных пользователей с системой через сеть Интернет применяется web-сервер, работающий совместно с основным сервером системы и единой базой данных. Это позволяет получать доступ к информации и формировать отчеты из любой точки сети Интернет. Кроме того, возможен обмен информацией между группой серверов с установленным программ-

ным обеспечением «FireStation» в автоматическом режиме и формирование единых отчетов.

Новая архитектура строится на web-сервере, осуществляющем все аспекты деятельности, за исключением отображения информации для конечного пользователя. Модульная архитектура отделяет интерфейс отдельной модели камеры от логики работы программы и позволяет внедрять новые типы камер, вновь разрабатываемые алгоритмы и т. д. Это дает возможность применять гибко настраиваемые алгоритмы и критерии принятия решений, повышает надежность и гибкость системы в целом. Использование системы управления базами данных (СУБД) позволяет увеличить скорость работы при условии непрерывно растущих объемов хранимых и обрабатываемых данных.

Основные элементы архитектуры показаны на рис. 1.

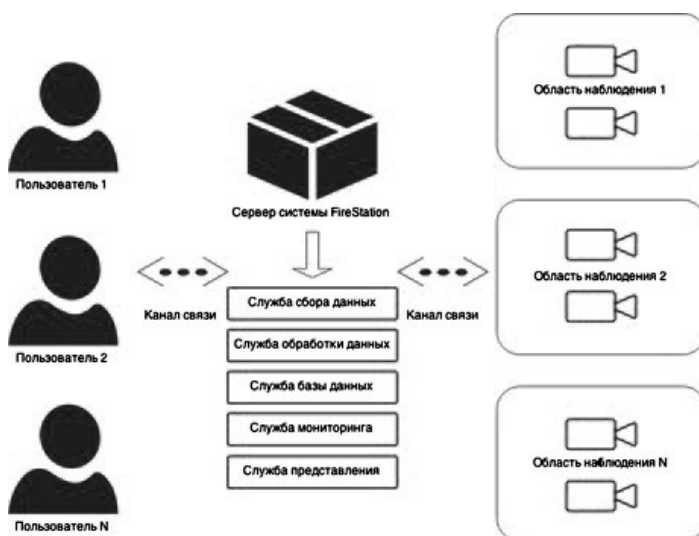


Рис. 1 – Основные элементы программно-аппаратного комплекса

Fig. 1 – Basic units of hardware-software complex

Совокупность видеокамер, установленных на некоторой территории, образует область видеонаблюдения (на рис. 1 – «Область наблюдения n »). Контроль и сбор данных осуществляются с помощью службы сбора данных, запущенной на сервере. Сервер имеет доступ к видеокамерам через локальную или глобальную сеть в зависимости от реализации системы. Служба сбора данных выполняет задачи получения и хранения изображений, получаемых от видеокамер. Служба обработки данных выполняет все функции, связанные с обработкой изображений в соответствии с применяемыми алгоритмами. При изменении и/или дополнении алгоритма служба дополняется новыми параметрами без необходимости приостанавливать работу системы. Служба базы данных выполняет все задачи, связанные с хранением, изменением параметров изображений (результат обработки исходного изображения алгоритмами), настроек системы и пользователей. Служба представления отвечает за формирование отчетов пользователям (данные с видеокамер, результаты обработки изображений, графики, привязка к местности, события системы). Управление функциональными частями сервера осуществляется через web-браузер администратором системы. Служба мониторинга определяет работоспособность серверов и камер системы видеонаблюдения. Если пропадает сигнал какой-либо камеры или отключается один из серверов системы, оператор или

инженер получает оповещение в форме вывода сообщения на экран, подачи звукового сигнала либо отправки сообщения по электронной почте.

Одной из проблем, снижающих эффективность системы, является ограниченная пропускная способность интернет-каналов. Зачастую видеокамеры устанавливаются в местах с доступными сетями 2G/3G, не позволяющими передавать значительный поток информации, что увеличивает время реакции на события. Для преодоления этого недостатка предложено решение по переносу части вычислений на процессор видеокамеры, что позволяет выполнять частичную обработку изображений без передачи на сервер и обеспечивает возможность работы при низкой скорости передачи данных.

2. Алгоритмы обработки и анализа изображений

Алгоритмы обнаружения дымовых облаков

Для обнаружения дымового облака, являющегося основным признаком начинающегося лесного пожара в светлое время суток, на фоне изображения лесного массива используются признак яркостного контраста и признак движения [12, 13]. Дымовое облако на ранней стадии лесного пожара практически всегда светлее фона, поэтому задача заключается в обнаружении светлого пятна на более темном фоне (алгоритм обнаружения, основанный на яркостном контрасте, в темное время суток реагирует на пламя). Сложность задачи состоит в неопределенности формы дымового облака, а также в неоднородности и изменчивости фона, образованного изображениями отдельных деревьев.

Алгоритм обнаружения дымовых облаков по признаку яркостного контраста, описанный в [12–15], основан на анализе динамики характеристик связанных компонент пороговых множеств (СКПМ) при понижении порога. Решение об обнаружении объекта принимается при превышении критического значения $k_{кр}$ отношением $k = S_{max} / S_{-}$ максимальной площади S_{max} связанной компоненты порогового множества к средней площади S_{-} остальных СКПМ. Преимуществами алгоритма являются слабая чувствительность к монотонным изменениям яркости изображения и малое число параметров, требующих априорного задания. Кроме того, алгоритм безразличен к форме дымового облака. К недостаткам относится требование однородности (стационарности) фона, поэтому перед применением алгоритма необходима предварительная обработка изображения для выравнивания фона.

Алгоритм обнаружения движения использует подход, основанный на вычитании двух изображений (кадров), полученных от одной камеры с интервалом, равным периоду кругового обзора. Дискретный характер вращения камер обеспечивает установку камеры по завершении полного цикла обзора в то же положение по азимуту (угол наклона предполагается постоянным). Поэтому на соседних кадрах формируются изображения одного и того же участка местности, которые при отсутствии в поле зрения движущихся объектов отличаются незначительно. Результатом вычитания для пары соседних кадров является изображение, элементы которого заметно отличаются от нуля лишь в тех областях, где имело место значительное изменение (движение). Для обнаружения этих областей используется алгоритм контрастного обнаружения, описанный выше.

Описанная пара алгоритмов может быть использована в различных вариантах. Например, можно после выделения областей движения проверять, имеется ли значительное превышение яркости над окружающим фоном. Второй вариант заключается в проверке, движется ли объект, обнаруженный яркостным алгорит-

мом. Наконец, при параллельном выполнении алгоритмов решение об обнаружении пожара принимается, если оба алгоритма дают совпадающие решения о наличии признаков дымового облака. В любом случае применение пары алгоритмов уменьшает вероятность ложной тревоги и повышает эффективность системы.

Описанные алгоритмы анализа изображений представляют собой ядро программного обеспечения системы раннего обнаружения лесных пожаров FireStation [11]. Создание условий для их эффективного применения обеспечивается алгоритмами предварительной обработки изображений.

Алгоритмы предварительной обработки изображений

В системах, предназначенных для обнаружения редких событий, к которым относятся возгорания, обычно стремятся к тому, чтобы вероятность ошибки первого рода (ложной тревоги) не превышала заданного уровня (критерий Неймана–Пирсона). Уровень F_0 допустимой вероятности ложной тревоги должен быть достаточно малым, чтобы обеспечить комфортные условия труда оператора. Понижение F_0 обычно приводит и к снижению вероятности правильного обнаружения. Однако на практике изображения содержат значительные области, которые заведомо не представляют интереса с точки зрения решаемой задачи (например, небо, дороги, здания и т. п.). Такие области целесообразно исключить из анализа, что снижает вероятность ложной тревоги без ущерба для вероятности правильного обнаружения. Благодаря тому, что круговой обзор осуществляется дискретно с фиксированным шагом по азимуту и камеры автоматически устанавливаются с высокой точностью в одинаковые положения при переходе на новый цикл обзора, можно однажды при настройке системы определить границы зон нечувствительности, в пределах которых изображения будут игнорироваться. В действующей системе зоны нечувствительности задаются однократно вручную при начальной настройке системы. Следует отметить, что процесс задания зон нечувствительности трудоемок и требует определенной квалификации. Эту операцию можно существенно облегчить и ускорить за счет применения разработанного **алгоритма сегментации**, предназначенного для разбиения изображения на области, занимаемые лесом и небом [16, 17]. Результат работы алгоритма используется как начальное приближение для формирования зон нечувствительности; оператор лишь должен при необходимости скорректировать их границы.

Алгоритм выравнивания фона предназначен для обеспечения условий функционирования алгоритма контрастного обнаружения, основанного на анализе динамики СКПМ. Под выравниванием фона понимается компенсация яркостного тренда, вызванного, в частности, наличием атмосферной дымки, благодаря которой с увеличением расстояния до наблюдаемого объекта, как правило, повышается яркость и уменьшается контрастность изображения. Для выравнивания фона используется алгоритм, основанный на применении операций математической морфологии – размыкания и замыкания [18]. Изображение N , получаемое в результате выравнивания, определяется путем вычитания из исходного изображения A среднего арифметического результатов комбинаций операций размыкания \circ и замыкания \bullet исходного изображения A структурным элементом B в форме диска (радиус диска, равный 5, подобран эмпирически):

$$N = A - [(A \bullet B) \circ B + (A \circ B) \bullet B] / 2 .$$

3. Сравнительная оценка эффективности систем раннего обнаружения лесных пожаров

В процессе работы системы раннего обнаружения лесных пожаров могут происходить ошибки двух видов – ложная тревога и пропуск возгорания. Эффективность таких систем должна оцениваться на основе критерия Неймана–Пирсона. Согласно этому критерию более эффективной является система, которая обеспечивает минимальную величину вероятности $P_{пр}$ пропуска события (максимальную вероятность $P_{по}$ правильного обнаружения) при условии, что вероятность ложной тревоги не превышает заданной величины F_0 .

На практике для систем раннего обнаружения лесных пожаров рассчитать указанные вероятности не представляется возможным из-за множества факторов – комплексного эвристического характера алгоритмов, неоднородности фона получаемых изображений, различной освещенности сцены, неопределенности формы и яркости дымового облака и т. п. Поэтому вместо точных расчетных значений показателей эффективности приходится использовать оценки, полученные экспериментально с использованием реальных или модельных изображений. При этом возможности оценивания вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения радикально различаются.

Материалом для оценивания вероятности ложной тревоги служат изображения леса в отсутствие пожара. Таких изображений в процессе работы системы накапливается большое количество, что обеспечивает возможность нахождения достаточно точной оценки. В то же время для оценивания вероятности правильного обнаружения требуются изображения дымовых облаков на фоне леса. Подобного рода изображений, накопленных в архиве в процессе работы системы, не может быть много, потому что лесной пожар является редким в статистическом смысле событием, а его искусственное воссоздание с целью анализа таких изображений требует больших временных и материальных затрат. В качестве инструмента, позволяющего оценивать характеристики эффективности обнаружителя путем статистического моделирования, в данной работе предлагается имитационная модель, позволяющая воссоздать картину появления и дальнейшего развития дымового облака на изображении лесного массива.

В работе [19] была предложена стохастическая клеточная модель для генерирования двумерных полутоновых изображений развивающегося дымового облака. В отличие от традиционных клеточных автоматов, где состояние одной центральной клетки изменяется в зависимости от состояний соседних клеток, в предложенной модели состояние соседних клеток модифицируется в зависимости от состояния центральной клетки. Каждой клетке приписывается определенное неотрицательное число, характеризующее «количество дыма» в ней. Динамика развития дымового облака определяется двумя механизмами – детерминированной диффузией и случайным дрейфом. Диффузия описывает увеличение и подъем дымового облака, обусловленные его тепловым расширением. Дрейфом называется стохастический механизм движения дыма под действием ветра различной силы.

В отличие от работы [19], где смоделированные изображения дыма накладывались на статичные реальные изображения леса, в данной работе предлагается более реалистичная динамическая модель изображения, фонового по отношению к дыму. Хотя при каждом новом цикле обзора камеры устанавливаются с высокой точностью в прежние положения, изображения, соответствующие одному и тому

же участку лесного массива, не являются статичными: их изменение происходит вследствие колебаний деревьев под действием ветра, меняющейся освещенности и др. Таким образом, разность двух изображений одного и того же участка лесного массива, полученных в различных циклах обзора, можно рассматривать как двумерный случайный процесс (случайное поле). Характер этого поля, нестационарного в вертикальном направлении, иллюстрируется графиками оценок математического ожидания и среднеквадратического отклонения, найденных согласно выражениям

$$m_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_{i,j}, \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (I_{i,j} - m_i)^2}, \quad (2)$$

где $I_{i,j}$ – яркость точки, находящейся в i -й строке и j -м столбце разностного изображения; N – количество столбцов, и усредняются по всему набору разностных изображений. Найденные оценки математического ожидания $m = \{m_i, i = \overline{1, N}\}$ и среднеквадратического отклонения $\sigma = \{\sigma_i, i = \overline{1, N}\}$ представлены в виде графиков на рис. 2.

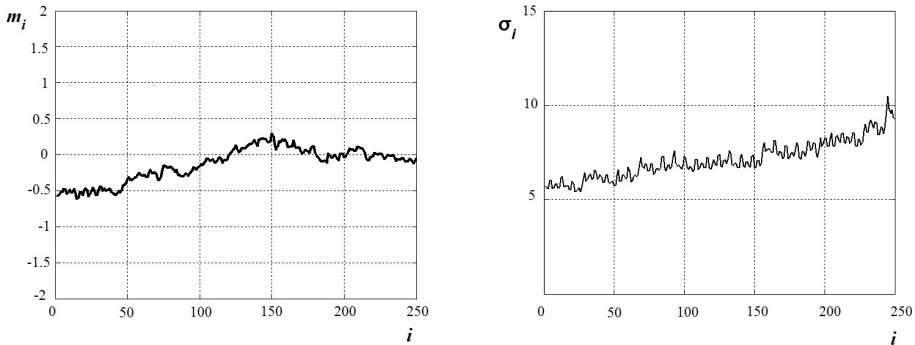


Рис. 2 – Оценки параметров двумерного случайного поля

Fig. 2 – Estimates of parameters of two-dimensional random field

Анализ графиков показывает, что математическое ожидание разностного изображения близко к нулю; это подтверждает, что фоновые изображения в соседних кадрах отличаются незначительно. Тенденция к увеличению среднеквадратического отклонения при движении вниз вдоль столбцов разностных изображений связана с тем, что для объектов переднего плана изменения яркости под действием одних и тех же факторов являются более существенными при формировании изображения, чем для объектов, располагающихся дальше от камеры.

Полученные оценки используются для генерирования последовательности реализаций нестационарного псевдослучайного поля, которые суммируются со статичным изображением леса, в результате чего формируется последовательность фоновых изображений, имитирующая движение фона. Затем на полученные фоновые изображения накладываются последовательные изображения развивающегося дымового облака, формируемые на основе клеточной модели [19]. Оценива-

ние вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения производится путем подсчета соответствующих событий в достаточно длинной серии опытов.

По предлагаемой методике была проведена сравнительная оценка эффективности алгоритма контрастного обнаружения, основанного на анализе динамики СКПМ, и алгоритма классификации точек изображения по яркостному признаку, использующего метод кластеризации «K-means».

Алгоритм кластеризации «K-means» является разновидностью классификатора по минимальному расстоянию [20]. Для реализации данного метода необходимы априорные сведения о количестве классов и об исходных значениях центров каждого класса. Для решения задачи обнаружения дыма классификация точек изображения выполняется в одномерном пространстве признаков: по шкале яркости изображения. Разбиение точек изображения в случае наличия дымового облака на два класса (классы «фон» и «объект») не дает приемлемых результатов обнаружения, поэтому были добавлены промежуточные классы с целью снижения внутриклассовой дисперсии каждого класса по яркостному параметру. В этом случае в качестве класса объекта обнаружения принимается класс точек изображения с максимальным значением яркости его центра, что связано с предположением о повышенной яркости объекта интереса (дымового облака). Увеличение количества классов приводит к соответствующему увеличению объема вычислений, а значит, и времени работы алгоритма обнаружения методом «K-means». Однако большая вычислительная емкость алгоритма компенсируется простотой его реализации.

Представлены результаты сравнительного анализа эффективности указанных алгоритмов по предлагаемой методике (см. таблицу). Количество опытов равно 1120 для каждого алгоритма. Следует отметить, что для систем раннего обнаружения лесных пожаров помимо вероятности правильного обнаружения важную роль играет такой параметр, как время обнаружения: чем быстрее пожар будет обнаружен, тем больше вероятность его успешного тушения. В связи с этим кроме вероятностных характеристик для каждого алгоритма оценивалось время обнаружения пожара, выражаемое значением номера изображения, в котором произошло обнаружение, в последовательности сгенерированных изображений.

Оценки характеристик эффективности
Efficiency characteristics estimates

Алгоритм	Оценка вероятности правильного обнаружения	Номер кадра
K-means	0.371	95
СКПМ	0.817	36

Оценка вероятности ложной тревоги в обоих случаях равна нулю.

Таким образом, алгоритм, основанный на анализе динамики СКПМ, более эффективен по сравнению с алгоритмом, использующим метод «K-means».

Заключение

На основе опыта эксплуатации видеосистемы раннего обнаружения лесных пожаров FireStation разработана модернизированная клиент-серверная архитектура, в которой обработка информации сосредоточена на сервере сети. В программном обеспечении системы реализованы алгоритмы предварительной обработки изображений и алгоритмы обнаружения дымового облака, как признака начинающегося пожара. Предварительная обработка изображений направлена на вырав-

нивание фона по яркости и компенсацию перспективных искажений с целью обеспечения благоприятных условий для работы алгоритма контрастного обнаружения и алгоритма обнаружения движения, основанных на анализе динамики связанных компонент пороговых множеств. Для исследования эффективности алгоритмов предложена методика на основе моделирования изображений дымовых облаков на динамическом фоне, включающем реальное изображение лесного массива с имитацией его движения. По предлагаемой методике проведена оценка эффективности алгоритма контрастного обнаружения, основанного на анализе динамики СКПМ, и алгоритма классификации точек изображения по яркостному признаку, использующего метод кластеризации «K-means».

ЛИТЕРАТУРА

1. Wildfire smoke detection using computational intelligence techniques / A. Genovese, R.D. Labati, V. Piuri, F. Scotti // Proceedings of the IEEE 2011 International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications (CIMSA 2011), Ottawa, Ontario, Canada, September 19–21, 2011. – Piscataway, New Jersey: IEEE, 2011. – P. 1–6. – doi: 10.1109/CIMSA.2011.6059930.
2. **Ollero A., Martínez-de-Dios J.R., Merino L.** Unmanned aerial vehicles as tools for forest-fire fighting [Electronic resource] // Proceedings of the V International Conference on Forest Fire Research, 27–30 November 2006, Coimbra, Portugal / D.X. Viegas (ed.). – Amsterdam: Elsevier, 2006. – URL: http://grvc.us.es/publica/congresosint/documentos/2006VICFFR_AOLLERO.pdf (accessed: 08.06.2015).
3. Wildland fire detection from space: theory and application / D. Cahoon, B. Stocks, B. Alexander, A. Baum, J. Goldammer // Biomass Burning and its Inter-Relationships with the Climate System, Advances in Global Change Research Series / J.L. Innes, M.M. Verstraete, M. Beniston (eds.); series ed.: M. Beniston. – Dordrecht and Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. – P. 151–169.
4. **Stipaničev D., Vuko T., Štula M.** Forest fire protection by advanced video detection system – Croatia experiences [Electronic resource] // Third TIEMS Workshop – Improvement of Disaster Management Systems – local and global trends, Trogir, Hrvatska, 26–27 September 2006. – Trogir: RCADR Divulje, 2006. – URL: https://bib.irb.hr/datoteka/279548.TIEMS_-_Stipanicsev_i_ostali.pdf (accessed: 08.06.2015).
5. **Vries J.S. de.** Autonomous wildfire surveillance // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 1993. – Vol. 2020: Infrared Technology. XIX. – P. 243–250. – doi: 10.1117/12.160577.
6. **Schroeder D.** Evaluation of three wildfire smoke detection systems // Advantage. – 2004. – Vol. 5, N 24. – P. 1–8.
7. **Gomez-Rodriguez F., Arrue B.C., Ollero A.** Smoke monitoring and measurement using image processing: application to forest fires // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2003. – Vol. 5094: Automatic Target Recognition. XIII. – P. 404–411. – doi: 10.1117/12.487050.
8. State of the art in vision-based fire and smoke detection / S. Verstockt, P. Lambert, R. van de Walle, B. Merci, B. Sette // 14th International Conference on Automatic Fire Detection, 8–10 September, 2009. – Duisburg, Germany: University of Duisburg-Essen, Department of Communication Systems, 2009. – Vol. 2. – P. 285–292.
9. **Васюков В.Н., Подовинников А.Н., Васюков В.В.** Программное обеспечение диспетчерского пункта видеосистемы обнаружения лесных пожаров // Сборник научных трудов НГТУ. – 2007. – № 3 (49). – P. 69–74.
10. **Васюков В.Н., Бондаренко В.В.** Архитектура программно-аппаратного комплекса автоматизированного обнаружения лесных пожаров // Современные проблемы радиоэлектроники: сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов, посвященной 117 годовщине Дня радио, г. Красноярск, 3–4 мая 2012 г. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – С. 197–201.

11. **Бондаренко В.В., Васюков В.В.** Программно-аппаратный комплекс автоматизированного обнаружения лесных пожаров // Материалы XI международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения»: АПЭП–2012, Новосибирск, 2–4 октября, 2012: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – Т. 1. – С. 138–142.
12. **Vasyukov V., Kalennikova E.** An adaptive procedure of smoke and background discrimination in the early fire detection video system // Proceedings of the 6th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2011, August 22–24, 2011. – Harbin, Heilongjiang, China, 2011. – Vol. 2. – P. 844–847. – doi: 10.1109/IFOST.2011.6021152.
13. **Васюков В.Н.** Контрастное обнаружение объектов неопределенной формы на сложном фоне // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2012. – № 1 (18). – С. 61–68.
14. **Васюков В.Н., Бондаренко В.В.** Адаптивный выбор порога при контрастном обнаружении объектов неопределенной формы на неровном фоне // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2013. – № 2 (21). – С. 34–45.
15. **Bondarenko V.V., Vasyukov V.N.** Adaptive thresholding for contrast detection of objects of indefinite form // Proceedings of 14 International conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2013), Altai, Erlagol, 1–5 July 2013. – Novosibirsk: NSTU Publ., 2013. – P. 59–62. – doi: 10.1109/EDM.2013.6641941.
16. **Vasyukov V.N., Zaitseva A.Yu.** Image analysis algorithms for forest fire monitoring systems // Proceedings of 12th International Conference APEIE 2014, 2–4 October 2014. – Novosibirsk, 2014. – Vol. 1. – P. 327–331. – doi: 10.1109/APEIE.2014.7040908.
17. **Васюков В.Н., Зайцева А.Ю.** Алгоритмы анализа изображений для системы раннего обнаружения лесных пожаров // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 4 (25). – С. 57–69. – doi: 10.17212/1727-2769-2014-4-57-69.
18. **Gonzales R.C., Woods R.E.** Digital image processing. – New Jersey: Prentice Hall, 2002. – 793 p.
19. **Vasyukov V.N., Podovinnikov A.N.** Simulating 2D images of smoke clouds for the purpose of fire detection algorithms adjustment // Proceedings of the Third International Forum on Strategic Technology IFOST 2008, June 23–29, 2008. – Novosibirsk; Tomsk, 2008. – P. 369–370. – doi: 10.1109/IFOST.2008.4602977.
20. **Petrou M., Sevilla P.G.** Image processing: dealing with texture. – Chichester, England: John Wiley & Sons, 2006. – P. 527–528.

EARLY FOREST FIRE DETECTION SYSTEM - CONFIGURATION AND ALGORITHMS

Vasyukov V.N.¹, Zaitseva A.Yu.¹, Bondarenko V.V.²

¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

²*Technopark of Novosibirsk Academgorodok, Novosibirsk, Russian Federation*

We suggest principles of the early forest fire detection system construction including configuration of the system, image preprocessing algorithms, video data analysis for the purpose of detection and recognition of a smoke cloud. The developed system involves a set of video cameras mounted at high points and combined into the single network with a server at control center. Cameras provide a panoramic view, form forest areas images relatively shifted on a fixed azimuth angle, for example, panorama contains 8 images if shift angle equals 45 degrees. Intensity contrast and movement towards background of smoke are offered to be informative detection features. Actually, image background formed by trees observed at a different angle is non-homogenous due to perspective distortion effect and foreground and background intensity difference. To provide favourable conditions for contrast detection and movement detection algorithms performance preprocessing is offered to align background intensity and compensate perspective distortions. Contrast detection is based on threshold sets connected compounds dynamics analysis and possesses a low sensitivity to priori indefinite image parameters. However, the algorithm assumes homogenous background with a high-intensity spot (probably two or three spots)

of indefinite shape and size on it. Smoke movement detection is based on subtraction of scene images of two neighboring view cycles. To investigate the algorithms we propose the technique of smoke cloud over dynamic background images modeling, the latter represents a real image of forest added with its movement imitation. The results of efficiency comparison of the developed and existed algorithms are described.

Keywords: Forest fires, early detection, video monitoring, cloud architecture, simulation modeling.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-43-56

REFERENCES

1. Genovese A., Labati D.R., Piuri V., Scotti F. Wildfire smoke detection using computational intelligence techniques. *Proceedings of the IEEE 2011 International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications (CIMS A 2011)*, Ottawa, Ontario, Canada, September 19–21, 2011. Piscataway, New Jersey, IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/CIMS A.2011.6059930
2. Ollero A., Martínez-de-Dios J.R., Merino L. Unmanned aerial vehicles as tools for forest-fire fighting. *Proceedings of the V International Conference on Forest Fire Research'*, Coimbra, Portugal, 27–30 November, 2006. Available at: http://grvc.us.es/publica/congresosint/documentos/2006VICFFR_AOLLERO.pdf (accessed 08.06.2015)
3. Cahoon D., Stocks B., Alexander B., Baum A., Goldammer J. Wildland fire detection from space: theory and application. *Biomass Burning and its Inter-Relationships with the Climate System, Advances in Global Change Research Series*. Innes J.L., Verstraete M.M., Beniston M. (eds.), Series ed.: M. Beniston. Dordrecht and Boston, Kluwer Academic Publishers, 2000, pp. 151–169.
4. Stipaničev D., Vuko T., Štula M. Forest fire protection by advanced video detection system – Croatia experiences. *Third TIEMS Workshop – Improvement of Disaster Management Systems – Local and Global Trends*, Trogir, Hrvatska, 26–27 September 2006. Available at: https://bib.irb.hr/datoteka/279548.TIEMS_-_Stipanicev_i_ostali.pdf (accessed 08.06.2015)
5. Vries J.S. de. Autonomous wildfire surveillance. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Infrared Technology*. XIX, 1993, vol. 2020, pp. 243–250. doi: 10.1117/12.160577
6. Schroeder D. Evaluation of three wildfire smoke detection systems. *Advantage*, 2004, vol. 5, no. 24, pp. 1–8.
7. Gomez-Rodriguez F., Arrue B.C., Ollero A. Smoke monitoring and measurement using image processing – application to forest fires. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Automatic Target Recognition*. XIII, 2003, Vol. 5094, pp. 404–411. doi: 10.1117/12.487050
8. Verstockt S., Lambert P., Van de Walle R., Merci B., Sette B. State of the art in vision-based fire and smoke detection. *14th International Conference on Automatic Fire Detection*, Duisburg, Germany, University of Duisburg-Essen, Department of Communication Systems, 8–10 September, 2009, vol. 2, pp. 285–292.
9. Vasyukov V.N., Podovinnikov A.N., Vasyukov V.V. Programmnoe obespechenie dispetcherskogo punkta videosistemy obnaruzheniya lesnykh pozharov [Software for the control centre of early forest fire detection videosystem]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2007, no. 3 (49), pp. 69–74.
10. Vasyukov V.N., Bondarenko V.V. [Architecture of hardware-software complex for automated forest fire detection]. *Sbornik nauchnykh trudov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchennykh i studentov "Sovremennye problemy radioelektroniki"* [Collection of scientific works of Russian scientific and technical conference of young scientists and students "Modern problems of radioelectronics"], 3–4 May 2012, Krasnoyarsk, 2012, pp. 197–201. (In Russian).

11. Bondarenko V.V., Vasyukov V.V. Hardware and software complex configuration for automated wildfire detection. *Proceedings of 11th International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering, APEIE 2012*, Novosibirsk, 2–4 October, 2012, vol. 1, pp. 101–104. doi: 10.1109/APEIE.2012.6629151
12. Vasyukov V., Kalennikova E. An adaptive procedure of smoke and background discrimination in the early fire detection video system. *Proceedings of the 6th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2011*, Harbin, Heilongjiang, China, August 22–24, 2011, vol. 2, pp. 844–847. doi: 10.1109/IFOST.2011.6021152
13. Vasyukov V.N. Kontrastnoe obnaruzhenie ob"ektov neopredelennoi formy na slozhnom fone [Contrast detection of indefinite form objects at composite background images]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2012, no. 1 (18), pp. 61–68.
14. Vasyukov V.N., Bondarenko V.V. Adaptivnyi vybor poroga pri kontrastnom obnaruzhenii ob"ektov neopredelennoi formy na nerovnom fone [Adaptive thresholding for contrast detection of shapeless objects against uneven background]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2013, no. 2 (21), pp. 34–45.
15. Vasyukov V.N., Bondarenko V.V. Adaptive thresholding for contrast detection of objects of indefinite form. *Proceedings of 14 International conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2013)*, Altai, Erlagol, 1–5 July 2013, pp. 59–62. doi: 10.1109/EDM.2013.6641941
16. Vasyukov V.N., Zaitseva A.Yu. Image analysis algorithms for forest fire monitoring systems. *Proceedings of 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2014)*, Novosibirsk, 2–4 October 2014, vol. 1, pp. 327–331. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040908
17. Vasyukov V.N., Zaitseva A.Yu. Algoritmy analiza izobrazhenii dlya sistemy rannego obnaruzheniya lesnykh pozharov [Image analysis algorithms for systems of early forest fire detection]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 4 (25), pp. 57–69. doi: 10.17212/1727-2769-2014-4-57-69
18. Gonzales R.C., Woods R.E. *Digital image processing*. New Jersey, Prentice Hall, 2002. 793 p.
19. Vasyukov V.N., Podovinnikov A.N. Simulating 2D images of smoke clouds for the purpose of fire detection algorithms adjustment. *Proceedings of the Third International Forum on Strategic Technology IFOST 2008*, Novosibirsk, Tomsk, June 23–29, 2008, pp. 369–370. doi: 10.1109/IFOST.2008.4602977
20. Petrou M., Sevilla P.G. *Image processing: dealing with texture*. Chichester, England, John Wiley & Sons, 2006, pp. 527–528.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Васюков Василий Николаевич – родился в 1951 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом научных исследований, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: цифровая обработка и статистический анализ сигналов и изображений. Опубликовано 120 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: vasyukov_vn@ngs.ru, vasyukov@corp.nstu.ru).

Vasyukov Vasily Nikolaevich (b. 1951) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Scientific Research Department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on digital signal and image processing and analysis. He is author of 120 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: vasyukov_vn@ngs.ru, vasyukov@corp.nstu.ru).



Зайцева Анна Юрьевна – родилась в 1993 году, магистрант 2 курса, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: алгоритмы обработки и анализа сигналов и изображений. Опубликовано 11 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: Violino1Ann@mail.ru, ayuzaitseva@yandex.ru).

Zaitseva Anna Yuryevna (b. 1993) – Second year Master student, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are signal and image processing and analysis algorithms. She is author of 11 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: Violino1Ann@mail.ru, ayuzaitseva@yandex.ru).



Бондаренко Валентин Викторович – родился в 1988 г. В 2010 г. окончил Новосибирский государственный технический университет. Инженер, Технопарк Новосибирского Академгородка. Основные научные интересы: алгоритмы обработки видеоизображений, разработка веб-приложений. Опубликовано 4 научные статьи. (Адрес: 630111, Россия, г. Новосибирск, ул. Кропоткина 126. Электронная почта: svix88@mail.ru)

Bondarenko Valentin Victorovich was born in 1988. In 2010 he graduated from the Novosibirsk State Technical University, engineer, Technopark of Novosibirsk Academgorodok. His research interests are video processing algorithms, development of Web applications. He is author of 4 scientific papers. (Address: Nikolaeva str. 12, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: svix88@mail.ru)

Статья поступила 11 мая 2015 г.

Received May 11, 2015

To Reference:

Vasyukov V.N., Zaitseva A.Yu., Bondarenko V.V. Sistema rannego obnaruzheniya lesnykh pozharov – arkhitektura i algoritmy [Early forest fire detection system – configuration and algorithms]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 43–56. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-43-56

УДК 621.319.34

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИОДОВ НА РАБОТУ СХЕМЫ ЭМГ
НА ОСНОВЕ ДУПЛИКАТОРА БЕННЕТА****В.П. Драгунов, В.Ю. Доржиев***Новосибирский государственный технический университет*

В статье проводится математическое моделирование работы схемы электростатического микроэлектромеханического генератора (ЭМГ) на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором. Данная схема позволяет за счет преобразования энергии механических колебаний в электрическую энергию осуществлять подзаряд химического источника питания. Основным достоинством схемы является то, что в отличие от большинства схем для подзаряда источника питания она не содержит трудно изготавливаемого по интегральной технологии индуктивного элемента и переключателей, требующих дополнительных схем синхронизации, потребляющих энергию. Проведено моделирование работы схемы с использованием модели идеального диода, которое показало, что в установившемся режиме ток подзаряда источника питания не принимает отрицательных значений – отсутствует фаза разряда источника. Введение в модель диода обратных токов привело к появлению фазы разряда источника питания, которая вызвана компенсацией утечек заряда конденсаторов через запертые диоды. Проведено моделирование работы схемы с учетом емкостей диодов в предположении, что они не зависят от приложенного к диодам напряжения. Получено аналитическое выражение, позволяющее оценить средний ток подзаряда источника питания с учетом обратных токов и емкостей диодов и определить условия, при которых этот ток будет положительным. Показано, что напряжение пробоя диодов ограничивает возможность увеличения тока подзаряда путем увеличения напряжения на элементах схемы.

Ключевые слова: преобразование энергии, МЭМС, микрогенератор, дубликатор Беннета, емкость диода, обратный ток.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-57-68

Введение

С развитием беспроводных технологий проблема ограниченной энергоемкости применяемых на сегодняшний день автономных источников питания – химических источников тока, требующих периодической замены или подзарядки, становится все более актуальной. В связи с чем интенсивно ведутся поиски путей увеличения их энергоемкости, а также разрабатываются новые виды автономных источников питания, причем особый интерес проявляется к источникам питания, преобразующим энергию окружающей среды непосредственно на месте расположения устройства-потребителя.

Из большого разнообразия источников энергии в окружающей среде одними из наиболее распространенных являются источники механической энергии [1]. Механическая энергия может быть преобразована в электрическую различными способами, однако наиболее перспективным представляется использование электростатических микроэлектромеханических генераторов (ЭМГ) [1, 2], которые могут быть изготовлены по интегральной технологии без применения экзотических технологических операций и материалов.

Структурно ЭМГ можно разделить на две части – механическую и электрическую. Механической частью является переменный конденсатор, играющий роль преобразователя и изготавливаемый по интегральной технологии так, что одна его обкладка жестко связана с корпусом, а вторая закреплена на упругих подвесах. Электрическая часть представляет собой электрическую схему, задающую необходимый режим работы преобразователя и передающую преобразованную энергию в нагрузку или накопительный элемент.

При проектировании механической части ЭМГ одной из основных задач, стоящих перед разработчиками, является увеличение максимальной емкости и глубины модуляции емкости переменного конденсатора. Типичные значения максимальной емкости, которых удалось достичь на сегодняшний день, составляют порядка сотни пФ, при этом глубина модуляции емкости, как правило, не превышает 3 [2–4].

При проектировании электрической части ЭМГ возникает задача выбора электрической схемы, которых на сегодняшний день разработано различное множество [5–7]. Среди них, на наш взгляд, наиболее перспективными являются схемы, подзаряжающие за счет преобразовываемой энергии химический источник питания (аккумуляторную батарею), который согласует ЭМГ с нагрузкой и позволяет питать ее в моменты отсутствия механических колебаний. В большинстве таких схем для увеличения заряда в системе используется индуктивный элемент, трудно реализуемый в рамках интегральной технологии, и переключатель, требующий дополнительной схемы синхронизации, потребляющей энергию. Предложенная же в работе [7] схема ЭМГ на основе дубликатора Беннета состоит только из двух конденсаторов и трех диодов. Ее анализ проводился в работах [7–13], однако применяемые в них модели диодов не учитывали ряд принципиальных особенностей поведения реальных диодов, которые влияют на точность анализа функционирования схемы в целом. Кроме того, в работах [7–10] проводился анализ схемы с дифференциальным конденсатором (он может быть представлен как два переменных конденсатора, емкость которых изменяется в противофазе [14]), изготовление которого по интегральной технологии затруднительно.

В данной работе проводится исследование влияния параметров диодов на функционирование схемы ЭМГ на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором, и определяются условия, необходимые для ее работы в режиме подзаряда источника питания.

1. Анализ работы схемы с идеальными диодами

Электрическая схема ЭМГ на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором представлена на рис. 1. Она содержит источник питания (V_0), переменный конденсатор (C_{var}), постоянный конденсатор (C_{store}) и три диода ($D_1 - D_3$). Преобразование механической энергии в электрическую происходит за счет совершения работы внешней механической силой, направленной против силы притяжения обкладок заряженного переменного конденсатора C_{var} . При этом емкость C_{var} уменьшается и заряд из него перетекает в источник питания, вызывая ток подзаряда конденсатора C_{store} (заряд в системе увеличивается).

В данной работе будем полагать, что $C_{\text{store}} \gg C_{\text{var}}$ [11], а C_{var} является идеальным плоским конденсатором, емкость которого изменяется от минимального (C_{min}) до максимального (C_{max}) значений за счет изменения внешней механической силой его межэлектродного зазора по гармоническому закону с частотой f .

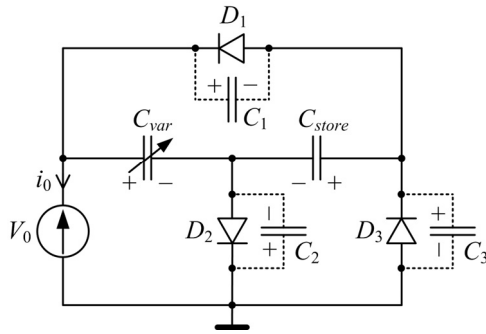


Рис. 1 – Электрическая схема ЭМГ на основе дупликатора Беннета с одним переменным конденсатором

Fig. 1 – Electrical circuit of e-VEH based on Bennet's doubler with single variable capacitor

Проведем моделирование работы схемы с использованием модели идеального диода (идеального ключа), аналогичной модели в [7, 8]. На рис. 2 представлены зависимости нормированных напряжений на конденсаторах, их суммарного заряда и емкости переменного конденсатора от времени, полученные в результате моделирования при $V_0 = 15$ В, $C_{\max} = 100$ пФ, $C_{\min} = 20$ пФ, $C_{\text{store}} = 1$ нФ и $f = 40$ Гц. В начальный момент времени конденсаторы были разряжены, а емкость C_{var} максимальна. Анализ этих зависимостей показывает, что в первый момент времени C_{var} по цепи $V_0 \rightarrow C_{\text{var}} \rightarrow D_2$ заряжается от источника питания до напряжения V_0 . Далее, при уменьшении емкости C_{var} , по цепи $C_{\text{var}} \rightarrow V_0 \rightarrow D_3 \rightarrow C_{\text{store}}$ течет ток, разряжающий C_{var} и заряжающий V_0 и C_{store} , причем заряд, ушедший из C_{var} , равен зарядам, пришедшим в V_0 и C_{store} . При увеличении емкости C_{var} вновь по цепи $V_0 \rightarrow C_{\text{var}} \rightarrow D_2$ течет ток, заряжающий C_{var} от источника питания до напряжения V_0 , и цикл повторяется. Через несколько таких циклов C_{store} заряжается до напряжения V_0 , и схема переходит в установившийся режим работы.

В установившемся режиме работы суммарный заряд конденсаторов остается постоянным и заряд от источника питания не потребляется – отсутствует ток через диод D_2 , а при увеличении емкости C_{var} течет ток по цепи $C_{\text{store}} \rightarrow D_1 \rightarrow C_{\text{var}}$, обусловленный перетеканием заряда из C_{store} в C_{var} . Таким образом, в установившемся режиме работы схемы при уменьшении емкости C_{var} течет ток подзаряда источника питания (i_0) и заряд (обозначим его q_0) из C_{var} перетекает в V_0 , при этом заряд C_{store} также увеличивается на q_0 , а при увеличении емкости C_{var} его заряд восстанавливается перетеканием q_0 из C_{store} .

При принятой модели диода средний ток подзаряда источника питания в установившемся режиме работы схемы ЭМГ на основе дупликатора Беннета с одним переменным конденсатором может быть оценен с помощью выражения

$$\bar{i}_0 = q_0 f = V_0 C_{\text{store}} f \frac{\eta - 2}{\alpha + 1}, \quad (1)$$

где $\alpha = C_{\text{store}}/C_{\min}$; $\eta = C_{\max}/C_{\min}$ – глубина модуляции емкости.

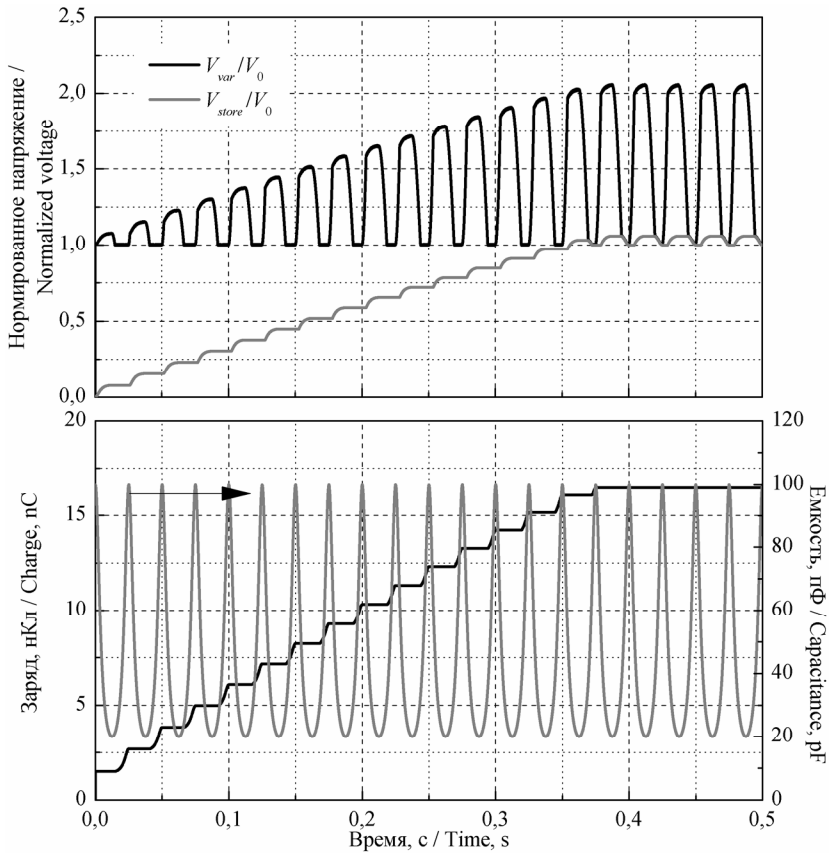


Рис. 2 – Зависимости нормированных напряжений на конденсаторах, их суммарного заряда и емкости переменного конденсатора от времени

Fig. 2 – Dependences of normalized capacitors voltages, their total charge and variable capacitor capacitance on the time

Анализ выражения (1) показывает, что средний ток подзаряда источника питания будет положительным при любом напряжении источника питания и при глубине модуляции емкости больше 2.

Однако сравнение расчетов с использованием (1) с экспериментом [9–13] показывает их существенное различие, которое вызвано, на наш взгляд, тем, что использованная модель диода не учитывает особенностей реальных диодов, таких как обратные токи, емкости и пробой.

2. Анализ влияния обратных токов диодов

Проведем моделирование работы схемы в предположении, что вольт-амперная характеристика диода описывается уравнением

$$I_D = I_S \left(\exp \left(\frac{V_D}{mV_T} \right) - 1 \right), \quad (1)$$

где I_D – ток диода; I_S – обратный ток насыщения; V_D – напряжение на диоде; m – коэффициент неидеальности; $V_T = 0,026$ В – температурный потенциал.

На рис. 3 представлены зависимости тока подзаряда источника питания от времени в установившемся режиме работы схемы, рассчитанные при принятых в предыдущем разделе параметрах и различных значениях обратного тока диодов.

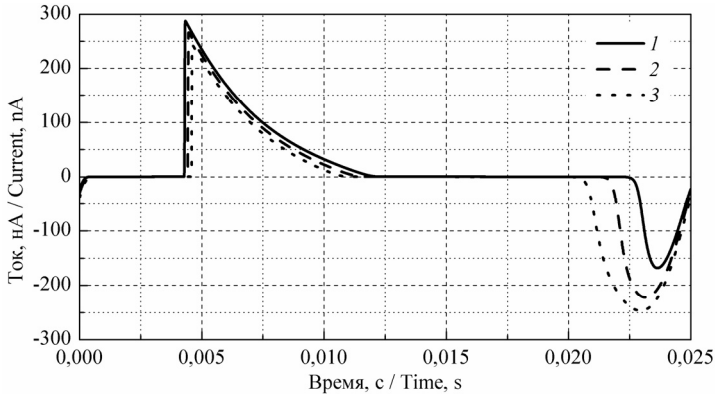


Рис. 3 – Зависимости тока подзаряда источника питания от времени:

$$1 - I_S = 10 \text{ нА}, 2 - I_S = 20 \text{ нА}, 3 - I_S = 30 \text{ нА}$$

Fig. 3 – Dependences of charging current on the time:

$$1 - I_S = 10 \text{ nA}, 2 - I_S = 20 \text{ nA}, 3 - I_S = 30 \text{ nA}$$

Из рисунка видно, что при наличии обратных токов диодов в установившемся режиме присутствует фаза разряда источника питания (ток подзаряда принимает отрицательные значения), причем при увеличении обратного тока разряд источника питания увеличивается, а подзаряд уменьшается. Оценки показывают, что среднее значение тока подзаряда при $I_S = 10 \text{ нА}$ составляет 20 нА , при $I_S = 20 \text{ нА}$ – 6 нА , а при $I_S = 30 \text{ нА}$ – -8 нА . То есть при $I_S = 30 \text{ нА}$ схема разряжает источник питания.

На рис. 4 представлены зависимости тока подзаряда источника питания, токов диодов, нормированных напряжений на конденсаторах и емкости переменного конденсатора от времени, рассчитанные при $I_S = 10 \text{ нА}$. Из рисунка видно, что в момент времени, когда емкость C_{var} максимальна, напряжение на C_{var} равно напряжению источника питания. При уменьшении емкости C_{var} напряжение на нем увеличивается, и пока оно не достигло значения $V_{\text{store}} + V_0$ через диоды течет обратный ток, разряжающий C_{var} по цепи $C_{\text{var}} \rightarrow D_1 \rightarrow D_3 \rightarrow D_2$. При $V_{\text{var}} > V_{\text{store}} + V_0$ диод D_3 открывается, и заряд из C_{var} начинает перетекать в источник питания, создавая ток подзаряда, равный сумме прямого тока диода D_3 и обратного тока диода D_2 , при этом через закрытый диод D_1 заряд из C_{var} также перетекает в C_{store} . После того как напряжение $V_{\text{store}} + V_0$ становится равным напряжению на C_{var} , диод D_3 закрывается и C_{var} вновь начинает разряжаться обратными токами диодов по цепи $C_{\text{var}} \rightarrow D_1 \rightarrow D_3 \rightarrow D_2$ до тех пор, пока его емкость не начнет увеличиваться и напряжение V_{var} не станет меньше V_{store} . При $V_{\text{store}} > V_{\text{var}}$ диод D_1 открывается и заряд из C_{store} начинает перетекать в C_{var} , при этом C_{store} также разряжается и обратными токами диодов по цепи $C_{\text{store}} \rightarrow D_3 \rightarrow D_2$. Когда напряжение на C_{var} становится меньше V_0 , открывается

диод D_2 и C_{var} начинает заряжаться от источника питания до напряжения V_0 , при этом источник питания также разряжается и обратными токами диодов по цепи $V_0 \rightarrow D_1 \rightarrow D_3$. На этом цикл преобразования завершается. Таким образом, наличие обратных токов диодов приводит к уменьшению суммарного заряда конденсаторов, который восстанавливается в конце цикла преобразования зарядом из источника питания.

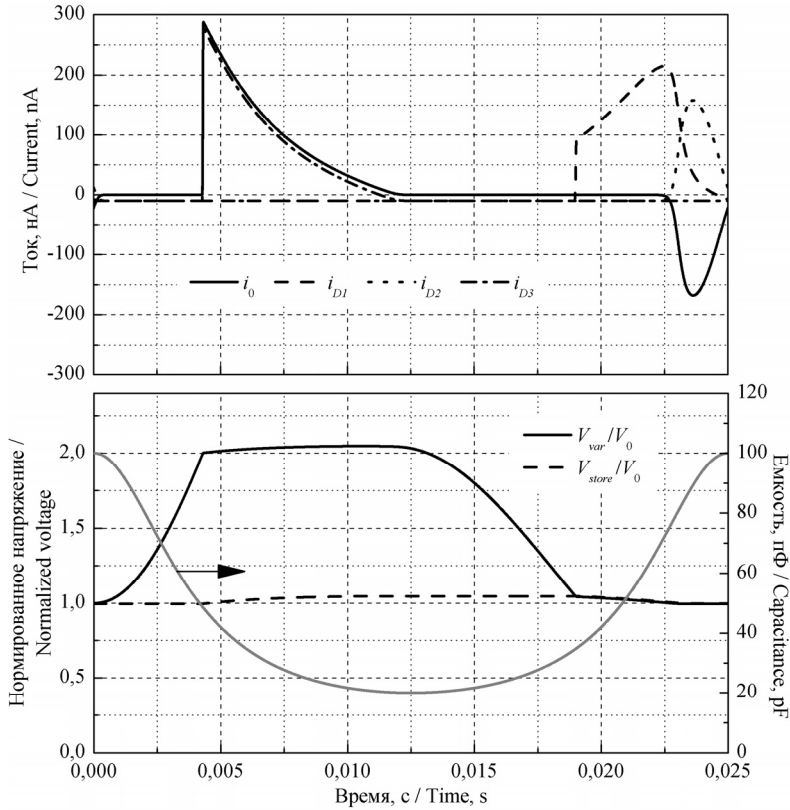


Рис. 4 – Зависимости тока подзаряда источника питания, токов диодов, нормированных напряжений на конденсаторах и емкости переменного конденсатора от времени

Fig. 4 – Dependences of charging current, diodes currents, normalized capacitors voltages and variable capacitor capacitance on the time

На основе проведенного анализа нами было получено аналитическое выражение, позволяющее оценить средний ток подзаряда источника питания с учетом обратных токов диодов,

$$\bar{i}_0 = V_0 C_{\text{store}} f \frac{\eta - 2}{\alpha + 1} - I_S \frac{1.5\alpha + 1}{\alpha + 1}. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что средний ток подзаряда источника питания будет положительным при условиях:

$$\eta > 2 + \frac{I_S + 1.5\alpha I_S}{C_{\text{store}} V_0 f},$$

$$V_0 > \frac{I_S(1.5\alpha + 1)}{C_{\text{store}}f(\eta - 2)},$$

$$f > \frac{I_S(1.5\alpha + 1)}{C_{\text{store}}V_0(\eta - 2)},$$

$$I_S < \frac{C_{\text{store}}V_0f(\eta - 2)}{1.5\alpha + 1}.$$

Оценки показывают, что при расчете зависимостей, показанных на рис. 4, при принятых значениях параметров схемы средний ток в источник питания будет положительным при условии, что глубина модуляции емкости больше 3.3, напряжение источника питания больше 6.3 В, частота изменения емкости больше 17 Гц, а величина обратного тока диодов не превышает 23 нА. В то время как согласно выражению (1) при отсутствии обратных токов диодов напряжение источника питания и частота изменения емкости могут быть сколь угодно малыми, а глубина модуляции емкости должна быть лишь больше 2.

3. Анализ влияния емкостей диодов

Как известно, емкость полупроводникового диода принято разделять на две составляющие: барьерную и диффузионную. Однако диффузионная емкость зашунтирована малым сопротивлением прямосмещенного $p-n$ -перехода и не оказывает существенного влияния на работу схемы. Поэтому в данной работе будем учитывать только барьерную емкость в предположении, что ее величина не зависит от напряжения на диоде.

Проведем моделирование работы схемы с учетом обратных токов и емкостей диодов ($C_1 - C_3$ на рис. 1), считая, что $C_1 = C_2 = C_3 = C_D$. На рис. 5 представлены зависимости тока подзаряда источника питания от времени, рассчитанные при $I_S = 10$ нА и различных значениях C_D (остальные параметры соответствовали принятым в первом разделе). Из рисунка видно, что наличие емкостей диодов приводит к тому, что ток подзаряда становится отличным от нуля практически на протяжении всего цикла преобразования. Оценки показывают, что средний ток подзаряда при $C_D = 0$ пФ составляет 13 нА, при $C_D = 6$ пФ – 10 нА, а при $C_D = 12$ пФ – –1 нА. То есть при $C_D = 12$ пФ схема разряжает источник питания.

На рис. 6 представлены зависимости нормированных напряжений на диодах и тока подзаряда от времени, рассчитанные при $C_D = 6$ пФ. Анализ данных зависимостей показывает, что в момент времени, когда емкость C_{var} максимальна, емкость C_3 заряжена до напряжения V_0 , а емкости C_1 и C_2 разряжены. При уменьшении емкости C_{var} емкость C_3 разряжается, а C_1 и C_2 заряжаются до напряжения V_0 . При этом C_{var} разряжается током, равным сумме токов емкостей $C_1 - C_3$, источник питания заряжается током, равным сумме токов емкостей C_2 и C_3 , а C_{store} заряжается током, равным сумме токов емкостей C_1 и C_3 . При увеличении емкости C_{var} происходит обратный процесс.

На основе проведенного анализа нами было получено аналитическое выражение, позволяющее оценить средний ток подзаряда с учетом и емкостей диодов,

$$\bar{i}_0 = V_0 C_{\text{store}} f \frac{\eta - 2}{\alpha + 1} - I_S \frac{1.5\alpha + 1}{\alpha + 1} - V_0 C_D f \frac{3\alpha + 2}{\alpha + 1}. \quad (4)$$

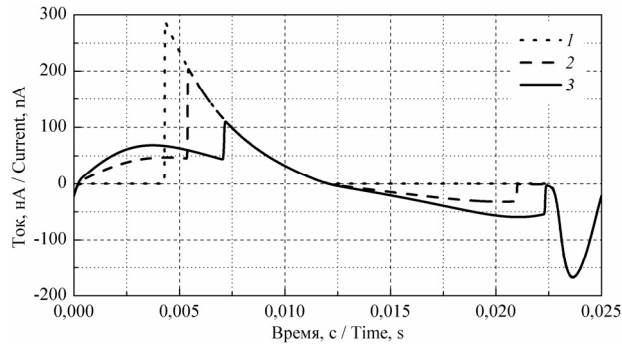


Рис. 5 – Зависимости тока подзаряда источника питания от времени:

1 – $C_D = 0$ пФ, 2 – $C_D = 6$ пФ, 3 – $C_D = 12$ пФ

Fig. 5 – Dependences of charging current on the time:

1 – $C_D = 0$ pF, 2 – $C_D = 6$ pF, 3 – $C_D = 12$ pF

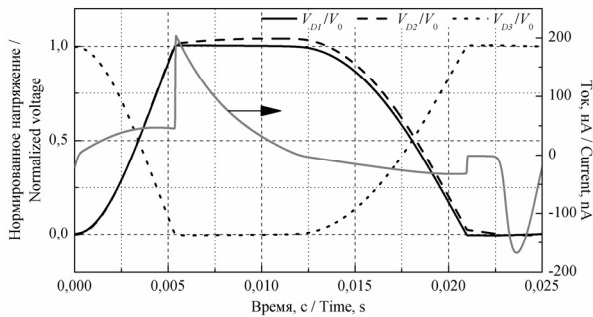


Рис. 6 – Зависимости нормированных напряжений на диодах и тока подзаряда от времени

Fig. 6 – Dependences of diodes voltages and charging current on the time

Анализ выражения (4) показывает, что средний ток подзаряда источника питания будет положительным при условиях:

$$C_D < \frac{2C_{\text{store}}V_0\eta f - 4C_{\text{store}}V_0f - 3I_S\alpha - 2I_S}{V_0f(6\alpha + 4)},$$

$$\eta > 2 + \frac{6C_DV_0\alpha f + 4C_DV_0f + 3I_S\alpha + 2I_S}{2C_{\text{store}}V_0f},$$

$$V_0 > \frac{-I_S(2C_D + 3C_D\alpha)}{2C_Df(2C_D + 2C_{\text{store}} + 3C_D\alpha - C_{\text{store}}\eta)},$$

$$f > \frac{-I_S(2C_D + 3C_D\alpha)}{2C_DV_0(2C_D + 2C_{\text{store}} + 3C_D\alpha - C_{\text{store}}\eta)},$$

$$I_S < \frac{V_0f(2C_{\text{store}}\eta - 6C_D\alpha - 4C_D - 4C_{\text{store}})}{3\alpha + 2}.$$

Оценки показывают, что при расчете зависимостей, показанных на рис. 6, при принятых значениях параметров схемы средний ток в источник питания будет положительным при условии, что глубина модуляции емкости больше 4.2, напряжение источника питания больше 9.1 В, частота изменения емкости больше 25 Гц, а величина обратного тока диодов не превышает 16 нА.

4. Анализ влияния напряжения пробоя диодов

Анализ выражений (1), (3) и (4) показывает, что средний ток подзаряда источника питания может быть увеличен путем увеличения напряжения источника питания, что и было использовано в работах [8, 9]. Однако еще одним из свойств реальных диодов является пробой, характеризующийся напряжением пробоя, при котором обратный ток диодов резко возрастает.

Проведем моделирование работы схемы с учетом обратных токов, емкостей и напряжения пробоя диодов, добавив к правой части выражения (1) слагаемое

$$I_B \exp\left(-\frac{V_D + V_B}{nV_T}\right),$$

где $I_B = 1$ мкА – начальный ток пробоя; V_B – обратное напряжение пробоя; n – коэффициент неидеальности на участке пробоя.

На рис. 7 представлены зависимости тока подзаряда при $V_B = 20$ В и различных значениях напряжения источника питания (остальные параметры соответствовали принятым в первом разделе). Анализ данных зависимостей показывает, что среднее значение тока подзаряда при $V_0 = 15$ В составляет 10 нА, при $V_0 = 20$ В – –12 нА, а при $V_0 = 25$ В – –61 нА. То есть при напряжениях источника питания, близких к напряжению пробоя, схема разряжает источник питания.

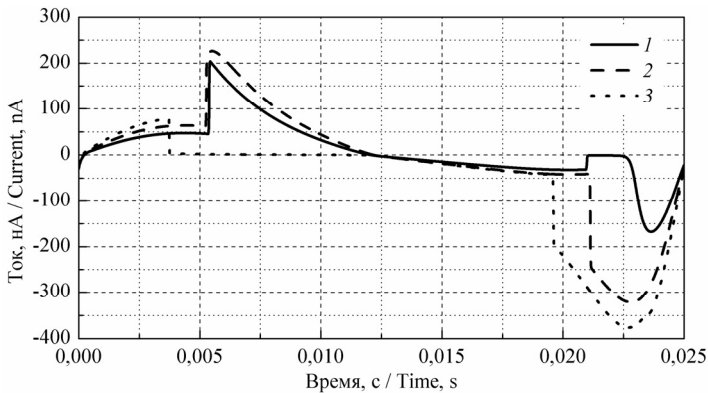


Рис. 7 – Зависимости тока подзаряда источника питания от времени:

1 – $V_0 = 15$ В, 2 – $V_0 = 20$ В, 3 – $V_0 = 25$ В

Fig. 7 – Dependences of charging current on the time

1 – $V_0 = 15$ В, 2 – $V_0 = 20$ В, 3 – $V_0 = 25$ В

Таким образом, для того чтобы средний ток подзаряда источника питания был положительным, необходимо, чтобы напряжение источника питания было меньше напряжения пробоя диодов. Необходимо также отметить, что напряжение пробоя диодов может ограничивать и напряжение, до которого возрастет напряжение на накопительном конденсаторе в случае его использования вместо источника питания [7].

Заключение

В данной статье проведено математическое моделирование работы схемы электростатического микроэлектромеханического генератора на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором с учетом основных параметров реальных диодов. Получено аналитическое выражение, позволяющее оценить средний ток подзаряда источника питания с учетом обратных токов и емкостей диодов. Показано, что обратные токи и емкости диодов могут приводить к появлению фазы разряда источника. Определены условия, при которых средний ток подзаряда источника питания будет положительным. Показано, что напряжение пробоя диодов ограничивает возможность увеличения тока подзаряда путем увеличения напряжения на элементах схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Roundy S.J.** Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion: a dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering-mechanical engineering in the graduate division. – Berkeley: University of California, 2003. – 287 p.
2. A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester / P. Basset, D. Galayko, A.M. Paracha, F. Marty, A. Dudka, T. Bourouina // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2009. – Vol. 19, N 11. – P. 115025/1–115025/12. – doi: 10.1088/0960-1317/19/11/115025.
3. **Chiu Y., Tseng V.F.G.** A capacitive vibration-to-electricity energy converter with integrated mechanical switches // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2008. – Vol. 18, N 10. – P. 104004/1–104004/8. – doi: 10.1088/0960-1317/18/10/104004.
4. Electrostatic vibration energy harvester with combined effect of electrical nonlinearities and mechanical impact / P. Basset, D. Galayko, F. Cottone, R. Guillemet, E. Blokhina, F. Marty, T. Bourouina // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2014. – Vol. 24, N 3. – P. 035001/–035001/14. – doi: 10.1088/0960-1317/24/3/035001.
5. **Драгунов В.П., Остертак Д.И.** Микроэлектромеханические преобразователи // *Микроэлектроника*. – 2012. – Т. 41, № 2. – С. 120–135.
6. **Драгунов В.П., Доржиев В.Ю.** МЭМ рекуператоры без разрыва цепи, содержащей индуктивный элемент // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2011. – № 2 (17). – С. 92–101.
7. **Queiroz A.C.M. de.** Electrostatic vibrational energy harvesting using a variation of Bennet's doubler // *Proceedings of 53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS 2010)*, 1–4 August, 2010, Seattle, Washington, USA. – Piscataway, New Jersey: IEEE, 2010. – P. 404–407. – doi: 0.1109/MWSCAS.2010.5548752.
8. **Queiroz A.C.M. de, Domingues M.** The doubler of electricity used as battery charger // *IEEE Transactions on Circuits and Systems: pt. 2: Express Briefs*. – 2011. – Vol. 58, iss. 12. – P. 797–801. – doi: 10.1109/TCSII.2011.2173963.
9. **Dragunov V., Dorzhiev V.** Electrostatic vibration energy harvester with increased charging current // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2013. – Vol. 476, iss. 1. – P. 012115/1–012115/5. – doi: 10.1088/1742-6596/476/1/012115.
10. **Драгунов В.П., Доржиев В.Ю.** Микроэлектромеханический генератор на основе дубликатора Беннета // *Нано- и микросистемная техника*. – 2012. – № 11. – С. 39–42.
11. Микроэлектромеханический преобразователь на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором / В.П. Драгунов, Д.Ю. Галайко, В.Ю. Доржиев, Ф. Бассэ // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2014. – № 2–3 (23–24). – С. 67–80.
12. Electret-free micromachined silicon electrostatic vibration energy harvester with the Bennet's doubler as conditioning circuit / V. Dorzhiev, A. Karami, P. Basset, F. Marty, V. Dragunov, D. Galayko // *IEEE Electron Device Letters*. – 2015. – Vol. 36, iss. 2. – P. 183–185. – doi: 10.1109/LED.2014.2387213.
13. MEMS electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements / V. Dorzhiev, A. Karami, P. Basset, V. Dragunov, D. Galayko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2014. – Vol. 557, iss. 1. – P. 012126/1–012126/5. – doi: 10.1088/1742-6596/557/1/012126.

14. Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Анализ влияния pull-in эффекта на параметры трехэлектродных МЭМС // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2013. – № 2 (21). – С. 87–97.

INFLUENCE OF DIODES PARAMETERS ON THE OPERATION OF e-VEH CIRCUIT BASED ON BENNET'S DOUBLER

Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

In this paper the simulation of MEMS electrostatic vibration energy harvester (e-VEH) conditioning circuit based on Bennet's doubler with single variable capacitor was carried out. This conditioning circuit allows for converting of mechanical vibrations energy into electrical energy to carry out the recharging chemical power source. The main advantage of this scheme is that unlike most circuits for recharging the power source, it does not contain hardly compatible with batch-fabrication process inductive element and the switch, requiring additional timing circuit that consumes energy. The simulation of the circuit using a model of an ideal diode, which showed that in the steady state charging current does not accept negative values – there is no phase of the source discharging. Introduction to diode model of reverse currents led to the source discharge phase, which is caused by compensation of capacitors charge leakage through locked diodes. The simulation of the circuit with taking into account of diodes capacitance based on the assumption that they do not depend on the voltage applied to the diode is carried out. An analytical expression, allowing to estimate the average charging current with taking into account of diodes reverse currents and capacitors, and to determine the conditions under which the current is positive was obtained. It is shown that the diodes breakdown voltage limits the charging current increasing by increasing the voltage on the circuit elements.

Keywords: energy harvesting, MEMS, microgenerator, Bennet's doubler, diode capacitance, reverse current.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-57-68

REFERENCES

1. Roundy S. *Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion*: a dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering-mechanical engineering in the graduate division. Berkeley, University of California, 2003. 287 p.
2. Basset P., Galayko D., Paracha A.M., Marty F., Dudka A., Bourouina T. A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, vol. 19, no. 11, pp. 115025/1–115025/12. doi: 10.1088/0960-1317/19/11/115025
3. Chiu Y., Tseng V.F.G. A capacitive vibration-to-electricity energy converter with integrated mechanical switches. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, vol. 18, no. 10, pp. 104004/1–104004/8. doi: 10.1088/0960-1317/18/10/104004
4. Basset P., Galayko D., Cottone F., Guillemet R., Blokhina E., Marty F., Bourouina T. Electrostatic vibration energy harvester with combined effect of electrical nonlinearities and mechanical impact. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, vol. 24, no. 3, pp. 035001/–035001/14. doi: 10.1088/0960-1317/24/3/035001
5. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Mikroelektromekhanicheskie preobrazovateli [Microelectromechanical converters]. *Mikroelektronika – Russian Microelectronics*, 2012, vol. 41, no. 2, pp. 120–135. (In Russian)
6. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. MEM rekuperatory bez razryva tsepi, soderzhashchei induktivnyi element [MEM recuperators without break of a circuit with inductor]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2011, no. 2 (17), pp. 92–101.
7. Queiroz A.C.M. de. Electrostatic vibrational energy harvesting using a variation of Bennet's doubler. *Proceedings of 53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS 2010)*, Seattle, Washington, USA, 1–4 August, 2010, pp. 404–407. doi: 0.1109/MWSCAS.2010.5548752

8. Queiroz A.C.M. de, Domingues M. The doubler of electricity used as battery charger. *IEEE Transactions on Circuits and Systems. Pt. 2: Express Briefs*, 2011, vol. 58, iss. 12, pp. 797–801. doi: 10.1109/TCSII.2011.2173963
9. Dragunov V., Dorzhiev V. Electrostatic vibration energy harvester with increased charging current. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, vol. 476, iss. 1, pp. 012115/1–012115/5. doi: 10.1088/1742-6596/476/1/012115
10. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Mikroelektromekhanicheskii generator na osnove duplikatora Benneta [Microelectromechanical generator based on Bennet's doubler]. *Nano- i mikro-sistemnaya tekhnika – Nano and Microsystem Technique*, 2012, no. 11, pp. 39–42.
11. Dragunov V.P., Galaiko D.Yu., Dorzhiev V.Yu., Basse F. Mikroelektromekhanicheskii preobrazovatel' na osnove duplikatora Benneta s odnim peremennym kondensatorom [Microelectromechanical harvester based on Bennet's doubler with one variable capacitor]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 2–3 (23–24), pp. 67–80.
12. Dorzhiev V., Karami A., Basset P., Marty F., Dragunov V., Galayko D. Electret-free micromachined silicon electrostatic vibration energy harvester with the Bennet's doubler as conditioning circuit. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, vol. 36, iss. 2, pp. 183–185. doi: 10.1109/LED.2014.2387213
13. Dorzhiev V., Karami A., Basset P., Dragunov V., Galayko D. MEMS electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 557, iss. 1, pp. 012126/1–012126/5. doi: 10.1088/1742-6596/557/1/012126
14. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Analiz vliyaniya pull-in effekta na parametry trekh-elektroodnykh MEMS [Analysis of pull-in effect influence on three-electrode MEMS parameters]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2013, no. 2 (21), pp. 87–97.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Драгунов Валерий Павлович – родился в 1947 году, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры ППИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: наноэлектроника, физика низкоразмерных структур, нано- и микросистемная техника. Опубликовано более 130 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: drag@adm.nstu.ru).

Dragunov Valery Pavlovich (b. 1947) – Doctor of Science, Professor, department of semiconductor devices and microelectronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanoelectronics, physics of low-dimensional structures, nano- and microsystem technology. He is author of more than 130 scientific papers. (Address: 20, Prospekt Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: drag@adm.nstu.ru).



Доржиев Виталий Юрьевич – родился в 1988 году, аспирант кафедры ППИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. Опубликовано более 15 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Email: dorzhiev@corp.nstu.ru).

Dorzhiev Vitaly Yuryevich (b. 1988) – PhD student, department of semiconductor devices and microelectronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nano- and microsystem technology. He is author of more than 15 scientific papers. (Address: 20, Prospekt Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: dorzhiev@corp.nstu.ru).

Статья поступила 02 июня 2015 г.

Received June 02, 2015

To Reference:

Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Vliyaniye parametrov diodov na rabotu skhemy EMG na osnove duplikatora Benneta [Influence of diodes parameters on the operation of e-VEH circuit based on Bennet's doubler]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 57–68. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-57-68

УДК 538.945

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РАЗБРОСА ПЛОТНОСТИ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА
В ТУННЕЛЬНЫХ КОНТАКТАХ ДЖОЗЕФСОНА****Б.И. Иванов¹, И.Л. Новиков¹, П.С. Щекин¹, И.В. Ильичев^{1,2}**¹Новосибирский государственный технический университет²Лейбниц, Институт фотонных технологий

В данной работе представлен результат экспериментального исследования разброса плотности критического тока для туннельных $Al/Al_xO_y/Al$ контактов Джозефсона, выполненных по технологии «теневого напыления» при разных временах окисления барьера. Плотность критического тока вычислялась из величины полного критического тока, которая определялась из вольт-амперных характеристик (ВАХ) контактов с учетом уровня собственного шума контакта и шума измерительного тракта. Измерения были выполнены в рефрижераторе при рабочей температуре 320 мК. Было произведено измерение серии чипов, каждый чип содержал 4 туннельных контакта шириной 200 нм и разной длины: 500, 750, 1000, 1500 нм. Максимальный разброс плотности критического тока составил не более 80 А/см^2 . Для измерения ВАХ туннельных контактов представлена установка измерения, включающая в себя генератор тока, фильтры нижних частот и прецизионный усилитель с величиной плотности шумового напряжения $1,5 \text{ нВ/(Гц)}^{1/2}$.

Ключевые слова: сверхпроводимость, Al контакт Джозефсона, туннельный контакт, плотность критического тока, потоковый кубит.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-69-76

Введение

Известно и экспериментально доказано многими научными группами, что микроэлектронные устройства, основывающиеся на эффекте сверхпроводимости, могут быть описаны как макроскопические квантовые объекты [1–3]. Использование их как базовых элементов для разработки квантового компьютера является актуальной и перспективной задачей. Основу таких объектов составляет сверхпроводниковый квантовый бит (кубит), представляющий собой туннельные контакты Джозефсона, включенные последовательно в замкнутую петлю. Энергия такого контакта определяется двумя составляющими: потенциальной энергией Джозефсона E_J и его Кулоновской энергией E_C . В случае если $E_C \gg E_J$, система представляет собой зарядовый кубит, если $E_C \ll E_J$, то имеем дело с потоковым кубитом. В основе обоих типов кубитов лежит туннельный контакт с толщиной барьера не более 10 нм.

Важным свойством туннельных контактов является их сравнительно малый шум и собственные диссипативные свойства. Тем не менее создание устройств на

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания, проект № 8.337.2014/К и РФФИ, проект 14-02-31601 мол_а.

© 2015 Б.И. Иванов, И.Л. Новиков, П.С. Щекин, Е.В. Ильичев, А.Г. Вострецов

основе контактов Джозефсона, работающих при температурах ниже одного градуса Кельвина, ограничено несколькими причинами: а) низкочастотным шумом магнитного потока, связанным с наличием сверхпроводникового контура, соединяющим контакты; б) потерями, связанными с подщелевым сопротивлением; в) разбросом критического тока.

Спектральная плотность шума магнитного потока для современной технологии составляет несколько единиц $\mu\Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$ (где Φ_0 – квант магнитного потока) в низкочастотной области вблизи 1 Гц и достаточно высока для влияния на время декогеренции в сверхпроводниковых кубитах, и на чувствительность в Сверхпроводниковых Квантовых Интерференционных устройствах (СКВИДах). Хорошо установлено, что для передовых технологий изготовления контактов шум не зависит от материала тонкой пленки, а определяется геометрией контакта и связан с флуктуацией магнитных моментов электронов, находящихся на дефектных состояниях, образованных на границе раздела материалов [4].

Потери в туннельном контакте из-за присутствия дефектных состояний в барьере (подщелевое сопротивление) являются одним из ограничивающих факторов работы контакта при низких температурах. Например, это может быть дополнительным источником для увеличения времени декогерентного состояния кубита.

Одним из наиболее важных технологических параметров является разброс критического тока контакта I_C . Как показано в последних научных работах, девиации I_C могут быть вызваны вариациями плотности критического тока, а не размерами контактов [5]. Разброс плотности критического тока j_C сильно влияет на свойства сверхпроводниковых кубитов, так как энергетический зазор двухуровневой системы сильно зависит от Джозефсоновской энергии связи $E_{Jj} = I_C \Phi_0 / 2\pi$ туннельного контакта, которая определяет свойства потокового кубита. Особо актуально исследование разброса плотности критического тока для мультикубитных систем, известных как квантовые метаматериалы [6, 7]. Исследование группового квантового феномена в мультикубитных структурах требует повторяемости процесса изготовления, обеспечивая необходимые параметры цепей. Следовательно, исследование разброса плотности критического тока как в одном технологическом процессе, так и между процессами является необходимой и актуальной задачей для современной сверхпроводниковой технологии.

Как показано в приведенных работах [8–11], шум магнитного потока, разброс плотности критического тока и подщелевой избыточный ток зависят от межслоевой морфологии контактов Джозефсона [12].

Наиболее известным материалом для создания межслоеного перехода, используемого в технологии нанесения сверхпроводящих пленок и формирования контактов Джозефсона, является оксид алюминия Al_2O_3 [13, 14]. Таким образом, при субкельвиновых температурах актуально использование тонких пленок алюминия в качестве основного сверхпроводникового материала. Микрограф потокового кубита показан на рис. 1.

В данной работе представлен результат исследования разброса плотности критического тока для туннельных $\text{Al}/\text{Al}_x\text{O}_y/\text{Al}$ контактов Джозефсона, выполненных по технологии «теневого напыления». Результаты представлены для различных времен окисления барьерного слоя туннельного контакта. Приведены установка измерения транспортных свойств исследуемых контактов, система охлаждения, выполнен предварительный анализ полученных результатов.

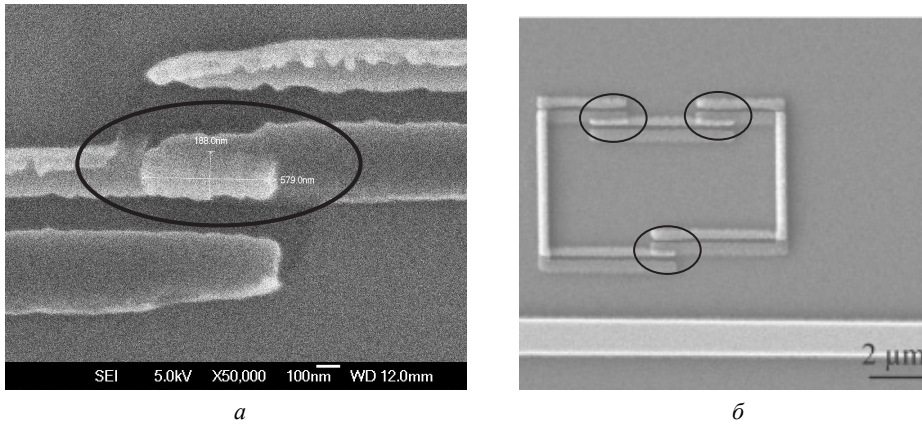


Рис. 1 – Микрограф увеличенного изображения (а) туннельного контакта, полученного посредством растрового электронного микроскопа. Область контакта Джозефсона отмечена эллипсом (б) трехконтактного потокового кубита. Область переходов Джозефсона представлена серым цветом и отмечена овальным маркером

Fig. 1 – A micrograph of a tunnel Josephson junction made by scanning electron microscopy (a). A micrograph of a three junction superconducting flux qubit made by scanning electron microscopy (b)

1. Технология изготовления и экспериментальная установка

Исследуемые в данной работе туннельные контакты Джозефсона были изготовлены в Лейбнице в Институте Фотонных Технологий (Германия).

Технологический способ, позволяющей реализовать микронные и субмикронные размеры контактов, называется «теневое напыление». Этот процесс можно условно разделить на два этапа. Первый этап – изготовление маски, необходимой для формирования структуры. Второй этап – собственно напыление и удаление резиста. Формирование джозефсоновских контактов осуществляется напылением сверхпроводникового металла под одним углом, дальнейшим окислением в атмосфере кислорода с целью формирования туннельного барьера и напылением второго слоя сверхпроводника под противоположным углом.

Для набора туннельных контактов были проведены исследования ВАХ при температуре 320 мК. Измерение контактов осуществлялось по классической четырехзондовой схеме. Источник тока представлен в виде аналогового генератора тока, построенного на основе микросхем TL072, ОРА2111, ОР 270. Для уменьшения влияния шума комнатной электроники на исследуемые образцы были установлены фильтры нижних частот при комнатной температуре, при температурах 4,2 К и 1,2 К. Предварительно была произведена калибровка резисторов и конденсаторов при температуре 4,2 К. Номиналы элементов фильтров были выбраны с учетом максимальной рассеиваемой тепловой мощности. Для измерения выходного напряжения использовался комнатный маломощный усилитель.

Основу схемы измерительного усилителя составляет микросхема

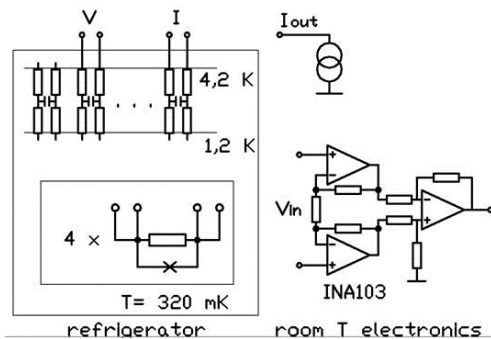


Рис. 2 – Экспериментальная установка измерения ВАХ туннельных контактов

Fig. 2 – Measurement setup

INA103. Для обеспечения высокого значения КОСС, более 60 дБ, во всей рабочей полосе усилителя, были отобраны прецизионные резисторы с одинаковым номиналом сопротивления до третьего знака после запятой. Усилитель имеет коэффициент усиления по напряжению 1000 в полосе частот от 0 до 10 кГц. КОСС в данной полосе имеет значение более 100 дБ. Измеренное значение спектральной плотности шума напряжения и шума тока соответствует значениям $1,5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ и $3 \text{ пкА}/\sqrt{\text{Гц}}$, соответственно. Итоговый вид экспериментальной установки представлен на рис. 2.

2. Экспериментальное исследование транспортных свойств туннельных контактов Джозефсона

Для определения критического тока и измерения ВАХ контактов были подготовлены кремниевые подложки с туннельными $\text{Al}/\text{Al}_x\text{O}_y/\text{Al}$ контактами Джозефсона. На одной подложке находилось по 4 контакта различной длины, изготовленных в одном технологическом процессе. То есть с одинаковым временем окисления барьера и уровнем давления кислорода, что в свою очередь должно формировать одинаковую толщину барьера.

Было проведено исследование нескольких таких чипов с разными временами окисления. В рассматриваемом нами случае все чипы имели одинаковый набор длин контактов: 500, 750, 100 и 1500 нм. Ширина всех контакта составляет 200 нм и имеет технологический разброс не более 10 %. Разница между чипами только в толщине барьера, т. е. времени его окисления.

Так как температура эксперимента составляла 320 мК, то влиянием собственного теплового шума контакта можно пренебречь [15]. Оценка параметра шума

$$\Gamma = \frac{2\pi k_B T}{I_C \Phi_0}$$

дает малую величину порядка 10^{-2} .

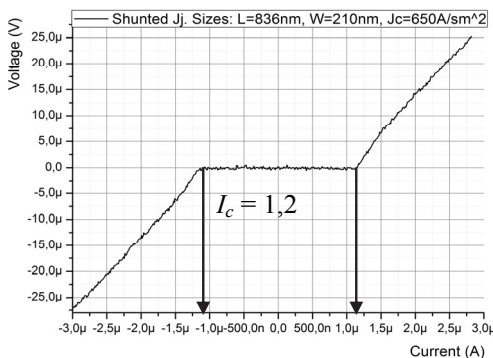


Рис. 3 – Экспериментальная ВАХ туннельного контакта. Температура измерения 320 мК. Ось x – величина тока в А. Ось y – величина напряжения в В

Fig. 3 – A measured IV-curve for a tunnel $\text{Al}/\text{Al}_x\text{O}_y/\text{Al}$ Josephson junction

0,3 мкВ. Согласно этому критерию величина критического тока, представленного на ВАХ рис. 3, равна 1,2 мкА.

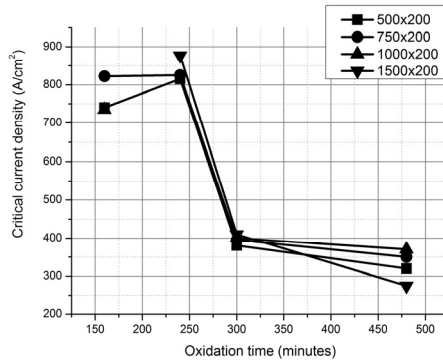
Таким образом, было проведено измерение серии туннельных контактов при длительном времени окисления и низком давлении кислорода в камере. Характеристика плотности критического тока контактов представлена на рис. 4.

Внешний шум измерительной системы, связанный с напряжением шума источника тока и выходного усилителя, существенно влияет на результат измерения. Оба измерительных прибора формируют белый шум в исследуемой полосе частот. Поэтому было проведено статистическое измерение и усреднение полученной величины критического тока.

ВАХ контакта размерами 750 нм × 200 нм представлен на рис. 3. Уровень критического тока соответствует появлению напряжения на шунтированном контакте выше напряжения шума, действующее значение которого равно

Рис. 4 – Экспериментально полученные значения плотности критического тока туннельных контактов, изготовленных при разных временах окисления барьера. Ось X – время окисления в мин. Ось Y – плотность тока контакта в A/cm^2

Fig. 4 – The experimental values of the critical current density of tunnel junctions fabricated at different oxidation barrier times. X – axis oxidation time in minutes. Y – axis the contact current density in A/cm^2



Из характеристики видно, что максимальный разброс плотности критического тока контактов, изготовленных при одинаковом времени окисления, составил не более $80 A/cm^2$. В то время как между различными временами окисления, разброс плотности критического тока составил не более $20 A/cm^2$. Разброс плотности критического тока на одном чипе, вероятней всего, связан с краевыми эффектами. Эти эффекты образуются на краях контактов и находятся не под технологическим контролем. Решением является использование более широкой пленки нижнего слоя алюминия.

Интересно отметить, что большинство контактов показывают тенденцию увеличения плотности критического тока при увеличении длины контакта. Это хорошо видно при 240, 300 и 480 минутах окисления. Такое увеличение может быть связано с увеличением площади поверхности окисления и поэтому недостаточности времени для образования барьерного слоя Al_xO_y оптимальной толщины.

Участок малых времен окисления интересен заниженным значением плотности критического тока, что находится в противоречии с ее экспоненциальным поведением от времени окисления и связанной с ним толщиной барьера. Такое уменьшение можно объяснить несоответствием геометрической площади контакта и фактически окисленной (она меньше из-за малости времени окисления). Тогда при расчете плотности тока мы получим заниженное значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Quantum superposition of macroscopic persistent-current states / C.H. van der Wal, A.C.J. ter Haar, F.K. Wilhelm, R.N. Schouten, C.J.P.M. Harmans, T.P. Orlando, Seth Lloyd, J.E. Mooij // Science. – 2000. – Vol. 290, N 5492. – P. 773–777. – doi: 10.1126/science.290.5492.773.
2. Josephson persistent-current qubit / J.E. Mooij, T.P. Orlando, L. Levitov, L. Tian, C.H. van der Wal, S. Lloyd // Science. – 1999. – Vol. 285, N 5430. – P. 1036–1039. – doi: 10.1126/science.285.5430.1036.
3. Continuous monitoring of Rabi oscillations in a Josephson flux qubit / E. Il'ichev, N. Oukhanski, A. Izmailkov, Th. Wagner, M. Grajcar, H.-G. Meyer, A.Yu. Smirnov, A.M. van den Brink, M.H.S. Amin, A.M. Zagorskin // Physical Review Letters. – 2003. – Vol. 91, iss. 9. – P. 097906-1–097906-4. – doi: 10.1103/PhysRevLett.91.097906
4. Localization of metal-induced gap states at the metal-insulator interface: origin of flux noise in SQUIDs and superconducting qubits / S.K. Choi, D.-H. Lee, S.G. Louie, J. Clarke // Physical Review Letters. – 2009. – Vol. 103, iss. 19. – P. 197001-1–197001-13. – doi: 10.1103/PhysRevLett.103.197001.
5. European roadmap on superconductive electronics – status and perspectives / S. Anders, M.G. Blamire, F.-Im. Buchholz, D.-G. Crété, R. Cristiano, P. Febvre, L. Fritzsche, A. Herr, E. Il'ichev, J. Kohlmann, J. Kunert, H.-G. Meyer, J. Niemeyer, T. Ortlev, H. Rogalla, T. Schurig, M. Siegel, R. Stolz, E. Tart, H.J.M. ter Brake, H. Toepfer, J.-C. Villegier, A.M. Zagorskin, A.B. Zorin // Physica C: Superconductivity. – 2010. – Vol. 470, iss. 23–24. – P. 2079–2126. – doi: 10.1016/j.physc.2010.07.005.

6. Parametric testing of HYPRES superconducting integrated circuit fabrication processes / D. Yohannes, A. Kirichenko, S. Sarwana, S.K. Tolpygo // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2007. – Vol. 17, iss. 2. – P. 181–186. – doi: 10.1109/TASC.2007.897399.
7. Multistability and switching in a superconducting metamaterial / P. Jung, S. Butz, M. Marthaler, M.V. Fistul, J. Leppäkangas, V.P. Koshelets, A.V. Ustinov // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5. – P. 3730-1–3730-6. – doi: 10.1038/ncomms4730.
8. **Wellstood F.C., Urbina C., Clarke J.** Low frequency noise in dc superconducting quantum interference devices below 1 K // *Applied Physics Letters*. – 1987. – Vol. 50, iss. 12. – P. 772–774. – doi: 10.1063/1.98041.
9. Investigation of low-frequency excess flux noise in DC SQUIDS at mK temperatures / D. Drung, J. Beyer, J.-H. Storm, M. Peters, T. Schurig // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2011. – Vol. 21, iss. 3. – P. 340–344. – doi: 10.1109/TASC.2010.2084054.
10. Influence of Nb film surface morphology on the sub-gap leakage characteristics of Nb/AlO_x-Al/Nb Josephson junctions / J. Du, A.D.M. Charles, K.D. Petersson, E.W. Preston // *Superconductor Science and Technology*. – 2007. – Vol. 20, N 11. – P. S350–S355. – doi: 10.1088/0953-2048/20/11/S10.
11. Effects of underlayer roughness on Nb/AlO_x/sub x//Nb junction characteristics / S. Komina-mi, H. Yamada, N. Miyamoto, K. Takagi // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 1993. – Vol. 3, iss. 1. – P. 2182–2186. – doi: 10.1109/77.233936.
12. The morphology of al-based submicron Josephson junction / V.V. Roddatis, U. Hübner, B.I. Ivanov, E. Il'ichev, H.-G. Meyer, M.V. Koval'chuk, A.L. Vasiliev // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – Vol. 110, iss. 12. – P. 123903-1–123903-4. – doi: 10.1063/1.3670003.
13. Are "pinholes" the cause of excess current in superconducting tunnel junctions? A study of Andreev current in highly resistive junctions / T. Greibe, M.P.V. Stenberg, C.M. Wilson, T. Bauch, V.S. Shumeiko, P. Delsing // *Physical Review Letters*. – 2011. – Vol. 106, iss. 9. – P. 097001-1–097001-4.
14. Implementation of a quantum metamaterial using superconducting qubits / P. Macha, G. Oelsner, Jan-M. Reiner, et al. // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5. – P. 5146-1–5146-6. – doi: 10.1038/ncomms6146.
15. **Greenberg Ya.S.** The theory of the voltage-current characteristic of high T_c DC SQUIDS // *Physica C: Superconductivity*. – 2002. – Vol. 371, iss. 2. – P. 156–172. – doi: 10.1016/S0921-4534(01)00970-4.

EXPERIMENTAL STUDY OF A CRITICAL CURRENT DENSITY SPREAD IN JOSEPHSON TUNNEL JUNCTIONS

B.I. Ivanov¹, I.L. Novikov¹, P.S. Shchekin¹, E.V. Il'ichev^{1,2}

¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

²*Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany*

In this paper an experimental study of a critical current density spread in Al/Al_xO_y/Al-Josephson tunnel junctions fabricated by the “shadow” deposition technology. The Josephson junctions have different barrier oxidation times. The critical current density was calculated from the full critical current value and junction sizes. We give the definition of a critical current from the C–V-curve of a junction taking into account intrinsic noise parameters of a junction and measuring equipment. All measurements were made at a working temperature of 320 mK in a refrigerator. A set of different oxidation time chips were characterized. Each chip consisted of 4 junctions of 200 nm in width and 500, 750, 1000, 1500 nm in length. The maximum critical current density spread amounted to 80 A/cm². An experimental setup including a low noise current generator, cryogenic filters and an instrumental amplifier with a spectral noise voltage density of 1,5 nV/(Hz)^{1/2} was designed to measure junction C–V-curves.

Keywords: superconductivity, Al Josephson junction, tunnel junction, critical current density, superconducting qubit.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-69-76

REFERENCES

1. Wal C.H. van der, Haar A.C.J. ter, Wilhelm F.K., Schouten R.N., Harmans C.J.P.M., Orlando T.P., Lloyd S., Mooij J.E. Quantum superposition of macroscopic persistent-current states. *Science*, vol. 290, no. 5492, pp. 773–777. doi: 10.1126/science.290.5492.773
2. Mooij J.E., Orlando T.P., Levitov L., Tian L., Wal C.H. van der, S. Lloyd. *Science*, 1999, vol. 285, no. 5430, pp. 1036–1039. doi: 10.1126/science.285.5430.1036
3. Il'ichev E., Oukhanski N., Izmalkov A., Wagner Th., Grajcar M., Meyer H.-G., Smirnov A.Yu., Brink A.M. van den, Amin M.H.S., Zagoskin A.M. Continuous monitoring of Rabi oscillations in a Josephson flux qubit. *Physical Review Letters*, 2003, vol. 91, iss. 9, pp. 097906-1–097906-4. doi: 10.1103/PhysRevLett.91.097906
4. Choi S.K., Lee D.-H., Louie S.G., Clarke J. Localization of metal-induced gap states at the metal-insulator interface: origin of flux noise in SQUIDs and superconducting qubits. *Physical Review Letters*, 2009, vol. 103, iss. 19, pp. 197001-1–197001-13. doi: 10.1103/PhysRevLett.103.197001
5. Anders S., Blamire M.G., Buchholz F.-Im., Crété D.-G., Cristiano R., Febvre P., Fritzsche L., Herr A., Il'ichev E., Kohlmann J., Kunert J., Meyer H.-G., Niemeyer J., Ortlev T., Rogalla H., Schurig T., Siegel M., Stolz R., Tart E., Brake H.J.M. ter, Toepfer H., Villegier J.-C., Zagoskin A.M., Zorin A.B. European roadmap on superconductive electronics – status and perspectives. *Physica C: Superconductivity*, 2010, vol. 470, iss. 23–24, pp. 2079–2126. doi: 10.1016/j.physc.2010.07.005
6. Yohannes D., Kirichenko A., Sarwana S., Tolpygo S.K. Parametric testing of HYPRES superconducting integrated circuit fabrication processes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, vol. 17, iss. 2, pp. 181–186. doi: 10.1109/TASC.2007.897399
7. Jung P., Butz S., Marthaler M., Fistul M.V., Leppäkangas J., Koshelets V.P., Ustinov A.V. Multistability and switching in a superconducting metamaterial. *Nature Communications*, 2014, vol. 5, pp. 3730-1–3730-6. doi: 10.1038/ncomms4730
8. Wellstood F.C., Urbina C., Clarke J. Low frequency noise in dc superconducting quantum interference devices below 1 K. *Applied Physics Letters*, 1987, vol. 50, iss. 12, pp. 772–774. doi: 10.1063/1.98041
9. Drung D., Beyer J., Storm J.-H., Peters M., Schurig T. Investigation of low-frequency excess flux noise in DC SQUIDs at mK temperatures. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, vol. 21, iss. 3, pp. 340–344. doi: 10.1109/TASC.2010.2084054
10. Du J., Charles A.D.M., Petersson K.D., Preston E.W. Influence of Nb film surface morphology on the sub-gap leakage characteristics of Nb/AlO_x-Al/Nb Josephson junctions. *Superconductor Science and Technology*, 2007, vol. 20, no. 11, pp. S350–S355. doi: 10.1088/0953-2048/20/11/S10
11. Kominami S., Yamada H., Miyamoto N., Takagi K. Effects of underlayer roughness on Nb/AlO_x/sub x/Nb junction characteristics. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1993, vol. 3, iss. 1, pp. 2182–2186. doi: 10.1109/77.233936
12. Roddatis V.V., Hübner U., Ivanov B.I., Il'ichev E., Meyer, H.-G., Koval'chuk M.V., Vasiliev A.L. The morphology of Al-based submicron Josephson junction. *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 110, iss. 12, pp. 123903-1–123903-4. doi: 10.1063/1.3670003
13. Greibe T., Stenberg M.P.V., Wilson C.M., Bauch T., Shumeiko V.S., Delsing P. Are "pinholes" the cause of excess current in superconducting tunnel junctions? A study of Andreev current in highly resistive junctions. *Physical Review Letters*, 2011, vol. 106, iss. 9, pp. 097001-1–097001-4.
14. Macha P., Oelsner G., Reiner J.-M., Marthaler M., André S., Schön G., Hübner U., Meyer H.-G., Il'ichev E., Ustinov A.V. Implementation of a quantum metamaterial using superconducting qubits. *Nature Communications*, 2014, vol. 5, pp. 5146-1–5146-6. doi: 10.1038/ncomms6146

15. Greenberg Ya.S. The theory of the voltage-current characteristic of high Tc DC SQUIDS. *Physica C: Superconductivity*, vol. 371, iss. 2, pp. 156–172, 2002. doi: 10.1016/S0921-4534(01)00970-4

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Иванов Борис Игоревич – родился в 1986 году, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории криогенной квантовой электроники НГТУ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. Email: to_ivanov_boris@yahoo.com).

Ivanov Boris (b. 1986) – PhD (Eng.), senior research worker in the cryogenic quantum electronics laboratory, Novosibirsk State Technical University. He is author of 12 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: to_ivanov_boris@yahoo.com).



Новиков Илья Леонидович – родился в 1969 году, канд. техн. наук., доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники, научный сотрудник межфакультетской лаборатории криогенной квантовой электроники НГТУ. Email: ilya_novikov@mail.ru).

Novikov Ilya (b. 1969) – PhD (Eng.), associate professor, department of semiconductor devices and microelectronics, senior research worker in the cryogenic quantum electronics laboratory, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on applied superconductivity, superconducting quantum. He is author of more than 20 scientific papers. (Email: ilya_novikov@mail.ru)



Щекин Павел Сергеевич – родился в 1985 году, инженер лаборатории криогенной квантовой электроники НГТУ. (Email: a7s2@yandex.ru).

Shchekin Pavel (b. 1985) – engineer in the cryogenic quantum electronics laboratory, Novosibirsk State Technical University. (Email: a7s2@yandex.ru).



Ильичев Евгений Вячеславович – родился в 1957 году, д-р физ.-мат. наук, профессор лаборатории криогенной квантовой электроники НГТУ. Руководитель группы «Макроскопические квантовые системы» в Институте фотонных технологий, г. Йена, Германия. (Email: evgeni.ilichev@ipht-jena.de).

Il'ichev Evgeniy (b. 1957) – Ph.D., professor, cryogenic quantum electronics laboratory in NSTU; group leader in the macroscopic quantum systems laboratory at the Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany. He is author of over 50 publications cited to Web of Science, including 2 monographs. His research interests are currently focused on macroscopic quantum systems and superconducting quantum bits. (Email: evgeni.ilichev@ipht-jena.de)

Статья поступила 22 мая 2015 г.
Received May 22, 2015

To Reference:

Ivanov B.I., Novikov I.L., Shchekin P.S., Il'ichev I.V. Eksperimental'noe issledovanie razbrosa plotnosti kriticheskogo toka v tunnel'nykh kontaktakh Dzhozefsona [Experimental study of a critical current density spread in Josephson tunnel junctions]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 69–76. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-69-76

УДК 621.314.222.6

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ АКТИВНЫМИ СИЛОВЫМИ ФИЛЬТРАМИ**О.В. Нос, Е.С. Кучер, А.В. Бакляк***Новосибирский государственный технический университет*

Среди всего многообразия различных способов снижения влияния преобразовательной техники на качество электрической энергии можно выделить несколько основных направлений, из которых наиболее перспективными являются подходы, основанные на использовании внешних фильтрокомпенсирующих устройств. Традиционно для обеспечения гармонического закона изменения токов и напряжений применяют пассивные корректирующие RLC -цепи соответствующего порядка, шунтирующие нагрузку по цепи прохождения пульсационных составляющих, полупроводниковые активные силовые фильтры (АСФ), осуществляющие предварительное искажение трехфазных переменных, или их различного рода совместные комбинации. При этом алгоритмы активной фильтрации обладают рядом преимуществ по отношению к методам пассивной коррекции, к числу которых, например, можно отнести низкий уровень собственных среднеквадратичных потерь, автоматическую подстройку к изменяющимся режимам работы электрооборудования и конфигурации питающей сети, полную инвариантность к температурному дрейфу параметров и т. д., что в конечном итоге полностью снимает какие-либо ограничения по области практического применения. Данная статья посвящена анализу алгоритмических принципов построения систем управления последовательно-параллельными АСФ с использованием $p-q$ теории мгновенной мощности, а также аналитических методов, основанных на выделении из нелинейной трехфазной системы прямой последовательности фаз по основной гармонике.

Ключевые слова: активный силовой фильтр, компенсационные воздействия, алгоритм компенсации.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-77-87

Введение

Широкое распространение полупроводниковых преобразователей электрической энергии в составе различного рода технологического оборудования, частотно-регулируемых электроприводов, цифровой вычислительной и копировальной техники и т. д. приводит к искажению синусоидальной формы сигналов в трехфазной сети, что неблагоприятно сказывается на других потребителях электрической энергии. В настоящее время наиболее эффективным подходом к решению прикладной задачи улучшения гармонического состава напряжений и токов является преднамеренная генерация в систему электроснабжения силовых компенсационных воздействий, формируемых на выходе АСФ [1, 2], которые в зависимости от конечных целей энергосбережения [3] функционируют в режимах быстродействующего источника напряжения (последовательный АСФ) или тока (параллельный АСФ) [4], причем каждый из них обладает собственными достоинствами и недостатками. Так, например, в первом случае мультигармонический состав фазных токов остается неизменным и не подвергается какой-либо коррекции, а параллельный АСФ обеспечивает приемлемое качество компенсации неэффективных потоков электрической энергии только в случае синусоидального

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России и DAAD в рамках международного научно-образовательного сотрудничества по программе «Михаил Ломоносов».

симметричного закона изменения трехфазных напряжений. В этой связи наиболее предпочтительным вариантом технической реализации алгоритмов активной фильтрации является совместная последовательно-параллельная комбинация двух типов АСФ [5], которая в зарубежных литературных источниках получила название Unified Power Quality Conditioner (UPQC) [4, 6, 7]. В данной статье рассматриваются алгоритмические принципы формирования компенсационных воздействий на выходе UPQC, основанные на математическом описании трехфазных переменных во временной и частотной областях.

1. Последовательно-параллельный АСФ

UPQC структурно состоит из системы управления **CS**, двух автономных инверторов напряжения **VSI1** и **VSI2**, объединенных между собой по звену постоянного тока через силовой емкостной фильтр **C** и аккумуляторную батарею **GB**, автоматического выключателя **Q**, а также датчиков тока **UA** и напряжения **UV**, что иллюстрирует рис. 1 [6, 8]. Первый инвертор **VSI1** через согласующий трансформатор **TV** осуществляет одновременное регулирование амплитуды u_m и углового сдвига трехфазных напряжений u_s источника **TS**, а также исключает в их спектре высокочастотные гармоники. В свою очередь **VSI2** подсоединяется параллельно нелинейному потребителю **NL** через индуктивный дроссель **L**, который предназначен для снижения пульсаций i_c , и выполняет три базовые функции, а именно устраняет искажения в потребляемых токах i_s , компенсирует реактивную мощность по основной гармонике, а также осуществляет стабилизацию u_{dc} . Помимо этого UPQC поддерживает непрерывное питание нагрузки в случае кратковременной просадки u_s за счет запасенной в **GB** электрической энергии.

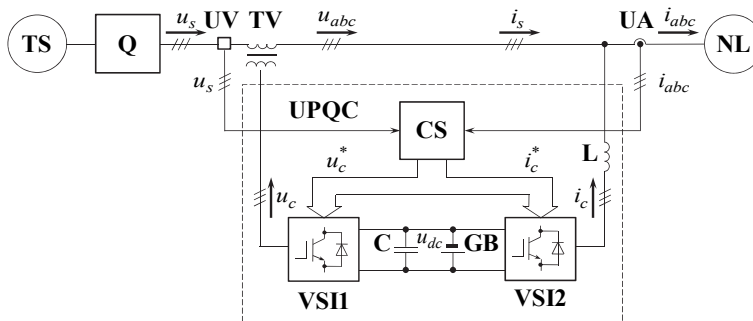


Рис. 1 – Функциональная схема UPQC

Fig. 1 – Block diagram of a UPQC

В номинальном режиме работы UPQC большая часть потребляемой мощности передается непосредственно от источника **TS** к нагрузке **NL** и только ее небольшая часть, как правило, не превышающая 15 % [7], проходит через силовые цепи последовательно-параллельного АСФ с целью коррекции искажений и углового сдвига, а также заряда аккумуляторной батареи **GB**. При нахождении действующих значений напряжений u_s вне рабочего диапазона автоматический выключатель **Q** отсоединяет потребителя **NL** от сети **TS**, переводя его на резервное питание от **GB** через **VSI2**, что обуславливает широкое распространение UPQC в системах жизнеобеспечения и хранения данных, телекоммуникационных объектах, аварийно-спасательном оборудовании и т. д.

2. Алгоритмы управления параллельным АСФ

Алгоритмические принципы построения систем управления UPQC, который, как было указано выше, представляет собой последовательно-параллельный АСФ, базируются на различных способах представления трехфазных переменных во временной или частотной областях, причем в последнем случае требуется наличие высокопроизводительных программно-аппаратных средств в составе **СS** из-за необходимости проведения большого объема вычислительных операций. В свою очередь среди всего многообразия аналитических процедур определения компенсационных воздействий i_c и u_c во временной области на практике наибольшее распространение получил метод на основе так называемой исходной p - q теории мгновенной мощности [9], в рамках которой первоначально осуществляется переход от трехфазных переменных к координатам состояния x_α, x_β, x_o в соответствии с линейным ортогональным преобразованием E. Clarke [10, 11]

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

здесь x_a, x_b, x_c – мгновенные значения фазных напряжений или токов, после чего постулируются [4, 12]:

– активная мгновенная мощность, заданная в виде скалярного произведения векторов напряжения и тока в плоскости α, β ,

$$p_{\alpha\beta} = \vec{u}_\alpha \cdot \vec{i}_\alpha + \vec{u}_\beta \cdot \vec{i}_\beta;$$

– вектор мгновенной реактивной мощности, определяемый на основании правил векторного произведения

$$\vec{q}_{\alpha\beta} = \vec{u}_\alpha \times \vec{i}_\beta + \vec{u}_\beta \times \vec{i}_\alpha,$$

– мгновенная мощность нулевой составляющей, вычисляемая как результат скалярного произведения векторов напряжения и тока, направленных по координатной оси аппликат o

$$p_o = \vec{u}_o \cdot \vec{i}_o.$$

Как показано в [13], при полном преобразовании электрической энергии на стороне нагрузки в составе потребляемой мгновенной мощности присутствует только постоянная составляющая активной мгновенной мощности

$$\bar{P}_{\alpha\beta} = p_{\alpha\beta} - \tilde{P}_{\alpha\beta} = \text{const},$$

здесь $\tilde{P}_{\alpha\beta}$ – переменная составляющая $p_{\alpha\beta}$, получаемая на выходе специальной динамической подсистемы низкочастотной фильтрации [2], в результате чего алгоритм управления параллельным АСФ в координатах состояния α, β, o принимает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{co} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \begin{bmatrix} u_{\alpha} & -u_{\beta} & 0 \\ u_{\beta} & u_{\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & \|\mathbf{u}_{\alpha\beta}\|^2 \cdot u_o^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p}_{\alpha\beta} - \bar{p}_o \\ q_{\alpha\beta} \\ p_o \end{bmatrix},$$

где $q_{\alpha\beta} = u_{\alpha}i_{\beta} - u_{\beta}i_{\alpha}$ – модуль вектора $\vec{q}_{\alpha\beta}$, или окончательно, после обратного перехода к фазным переменным

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{co} \end{bmatrix}.$$

В заключение также необходимо отметить, что помимо описанного выше подхода к решению задачи синтеза непрерывных законов токовой компенсации с использованием пространственных векторов, к которому также относится расширенная модификация исходной p - q теории [14] и p - q - r теория мгновенной мощности [15], алгоритмы активной фильтрации могут реализовываться в рамках математических аппаратов тензорного исчисления [16] и некоммутативной алгебры кватернионов [17–19].

3. Алгоритмы управления последовательным АСФ

В соответствии с основными положениями исходной p - q теории, изложенными в предыдущем разделе, формирование компенсационных воздействий u_c на выходе последовательного АСФ применительно к трехфазной системе с изолированной средней точкой основывается на следующей аналитической зависимости:

$$\begin{bmatrix} u_{c\alpha} \\ u_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2} \begin{bmatrix} i_{\alpha} & -i_{\beta} \\ i_{\beta} & i_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p}_{\alpha\beta} \\ q_{\alpha\beta} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Как отмечено в [4], техническая реализация (2) позволяет обеспечить полное исключение $\tilde{p}_{\alpha\beta}$ и $q_{\alpha\beta}$ только в случае симметричной гармонической системы токов нагрузки i_a, i_b, i_c , что представляет интерес только с теоретической точки зрения и не имеет практического приложения. В этой связи далее остановимся более подробно на анализе других способов численного расчета u_c , которые базируются на непосредственном определении высокочастотных составляющих u_s или выделении из полного спектра трехфазной системы напряжений источника прямой последовательности фаз по основной гармонике.

Один из вариантов функциональной схемы алгоритма коррекции напряжений **TS**, выполненного на основе первого теоретического приема, иллюстрирует рис. 2 [20], в соответствии с которым входные сигналы с датчиков **UV** оцифровываются с помощью аналого-цифрового преобразователя **ADC** и поступают на центральный процессор обработки сигналов **DSP**. Далее из дискретных значений u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} вычитаются основные гармоники, получаемые при помощи рекур-

сивного фильтра низких частот **LPF**, и полученная разность через цифро-аналоговый преобразователь **DAC** подается в качестве задания u_c^* на трехканальный широтно-импульсный модулятор **VSII**.

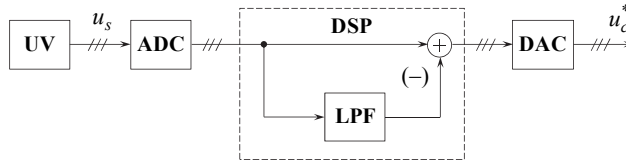


Рис. 2 – Функциональная схема системы управления последовательного АСФ

Fig. 2 – Block diagram of series APF control block

Далее рассмотрим основные положения метода синтеза управлений последовательным АСФ, базирующимся на принятии в качестве эталона прямой последовательности фаз по основной гармонике [3, 4],

$$u_{1+} = \frac{1}{3}(u_{sa1+} + au_{sb1+} + a^2u_{sc1+}) = u_{m1+} \cos(\omega t + \phi_{1+}),$$

где $a = e^{j120^\circ}$ – оператор поворота на угол 120° ; $u_{sa1+}, u_{sb1+}, u_{sc1+}$ – гармонические составляющие с угловой частотой $\omega = 100\pi \text{ с}^{-1}$, выделяемые из полного спектра фазных напряжений источника **TS** после прохождения сигналов с датчиков **UV** через полосовой фильтр [21], передаточная функция которого в изображениях Лапласа, например, может быть выбрана в виде [22]

$$W(s) = \frac{\omega^{-1}Q^{-1}s}{\omega^{-2}s^2 + \omega^{-1}Q^{-1}s + 1},$$

здесь Q – добротность.

В свою очередь переход от u_{1+} к фазным значениям выполняется в виде

$$\begin{bmatrix} u_{sa1+} \\ u_{sb1+} \\ u_{sc1+} \end{bmatrix} = u_{m1+} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi_{1+}) \\ \cos(\omega t - 120^\circ + \phi_{1+}) \\ \cos(\omega t + 120^\circ + \phi_{1+}) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

причем левую часть (3) можно также непосредственно получить из матричного равенства [5]

$$\begin{bmatrix} u_{sa1+} \\ u_{sb1+} \\ u_{sc1+} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} u_{sa1} \\ u_{sb1} \\ u_{sc1} \end{bmatrix} - \frac{1}{6} \begin{bmatrix} u_{sb1} + u_{sc1} \\ u_{sc1} + u_{sa1} \\ u_{sa1} + u_{sb1} \end{bmatrix} + j \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} u_{sb1} - u_{sc1} \\ u_{sc1} - u_{sa1} \\ u_{sa1} - u_{sb1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где j – оператор поворота на угол 90° , реализуемый при помощи фазосдвигающего фильтра с передаточной функцией второго порядка

$$W(s) = \frac{s^2 - \omega s + a}{s^2 + \omega s + a},$$

где $a = \pi/2$ – постоянный коэффициент.

Выделение гармонических составляющих в функции ω из периодических не-синусоидальных функций времени u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} можно также выполнить в частотной области, воспользовавшись тригонометрическим рядом Фурье

$$u_{si} = \frac{B_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \sin(k\omega t) + B_k \cos(k\omega t)),$$

где i – нижний индекс, показывающий буквенное обозначение одной из фаз a, b, c ; B_0, A_k, B_k – коэффициенты, соответственно определяемые как

$$A_k = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi\omega^{-1}} u_{si} \sin(k\omega t) dt \text{ при } k = 1, 2, 3, \dots,$$

$$B_k = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi\omega^{-1}} u_{si} \cos(k\omega t) dt \text{ при } k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Численные значения A_1 и B_1 , отвечающие за амплитуду и угловой сдвиг первой гармоники соответствующего напряжения u_{si} , вычисляются на основе текущей информации о первых членах следующих линейных комбинаций [14, 23]:

$$u_{si} \sin \omega t = \frac{A_1}{2} + \frac{B_0}{2} \sin \omega t + \frac{B_1}{2} \sin 2\omega t - \frac{A_1}{2} \cos 2\omega t + \dots,$$

$$u_{si} \cos \omega t = \frac{B_1}{2} + \frac{B_0}{2} \cos \omega t + \frac{B_1}{2} \cos 2\omega t + \frac{A_1}{2} \sin 2\omega t + \dots,$$

что иллюстрирует рис. 3, на котором в качестве **LPF** обозначен фильтр низких частот.

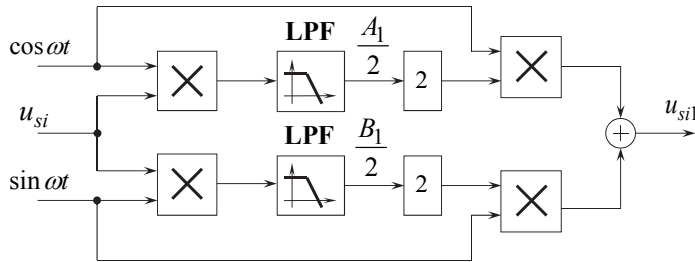


Рис. 3 – Структурная схема выделения основной гармоники одной фазы напряжения u_{si1}

Fig. 3 – Method to obtain the voltage fundamental component u_{si1}

В заключение рассмотрим базовые принципы теоретического приема к расчету компенсационных напряжений u_c в преобразованном пространстве состояний [5], основанном на последовательно выполняемых инвариантных относительно скалярных величин переходах от алгебраического вектора-столбца из левой части матричных уравнений (3) или (4) к α, β координатам $x_{\alpha 1+}, x_{\beta 1+}$ в соответствии с (1), а затем к d, q переменным [24]:

$$x_{d1+} = x_{\alpha1+} \cos \gamma + x_{\beta1+} \sin \gamma,$$

$$x_{q1+} = x_{\beta1+} \cos \gamma - x_{\alpha1+} \sin \gamma,$$

где γ – угол поворота плоскости d, q относительно неподвижной продольной оси α, β ,

$$\gamma = \arctg \frac{x_{\beta1+}}{x_{\alpha1+}},$$

в результате чего алгоритм активной фильтрации принимает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} = \frac{U_{abc}}{u_{d1+}} \begin{bmatrix} u_{a1+} \\ u_{b1+} \\ u_{c1+} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix},$$

здесь U_{abc} – модуль пространственного вектора напряжений, желаемое значение которого выбирается как [11]

$$U_{abc} = \sqrt{3} \cdot 220 \text{ В.}$$

Таким образом, описанные в данном разделе аналитические процедуры численного расчета компенсационных воздействий u_c на выходе последовательного АСФ в конечном итоге обеспечат коррекцию мгновенной формы трехфазных напряжений источника с целью обеспечения синусоидального закона изменения с одновременным соблюдением условия симметрии по мгновенным значениям.

Заключение

Практическая реализация представленных в данной статье алгоритмических решений в области управления последовательно-параллельными АСФ позволит значительно улучшить мгновенную форму сетевых напряжений и токов, а также исключить из состава потребляемой от источника мгновенной мощности все составляющие, обусловленные негативным действием высокочастотных гармоник и параметрической асимметрии. По этой причине данный тип силовых преобразовательных устройств в настоящее время является наиболее эффективным техническим средством энергосбережения [1, 18, 19], позволяющим существенно повысить качество доставляемой конечному потребителю электрической энергии с одновременным снижением активных потерь в трехфазных системах электропитания общего назначения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Германской службы академических обменов и Министерства образования и науки РФ в рамках международного научно-образовательного сотрудничества по программе «Михаил Ломоносов» по теме «Синтез алгоритмов управления полупроводниковыми устройствами компенсации неактивной мощности с использованием гиперкомплексных чисел».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Akagi H.** Active harmonic filters // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, iss. 12. – P. 2128–2141. – doi: 10.1109/JPROC.2005.859603.
2. **Nos O.V., Kharitonov S.A.** A system to control power currents of ineffective instantaneous power compensation // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86, iss. 2. – P. 72–78. – doi: 10.3103/S1068371215020108.

3. **Нос О.В.** Гармонический анализ кватерниона мгновенной мощности трехфазной нагрузки произвольного вида // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 1 (26). – С. 75–84. – doi: 10.17212/1727-2769-2015-1-75-84.
4. **Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M.** Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – Piscataway, New Jersey: IEEE Press; Hoboken, New Jersey: Wiley, 2007. – 379 p.
5. **Lee G.-Myoung, Dong-Choon Lee, Jul-Ki Seok** Control of series active power filters compensating for source voltage unbalance and current harmonics // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2004. – Vol. 51, iss. 1. – P. 132–139. – doi: 10.1109/TIE.2003.822040.
6. **Nasiri A., Amac A.E., Emadi A.** Series-parallel active filter/uninterruptible power supply system // Electric Power Components and Systems. – 2004. – Vol. 32, iss. 11. – P. 1151–1163. – doi: 10.1080/15325000490441507.
7. **Шалыгин К.А., Нос О.В.** Техническая реализация принципов энергосбережения на базе силовых активных фильтров // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 2. – С. 28–32.
8. A new control strategy of UPQC in three-phase four-wire system / T. Zhili, L. Xun, C. Jian, K. Yong, Z. Yang // IEEE 38 Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC'07, USA, Orlando, 17–21 June 2007: [proceedings]. – Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 2007. – P. 1060–1065. – doi: 10.1109/PESC.2007.4342139.
9. **Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.** Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits // Proceedings of the International Power Electronics Conference (IPEC'83), Japan, Tokyo, 1983. – Tokyo, 1983. – P. 1375–1386. – doi: 10.1002/ej.4391030409.
10. **Duesterhoef W.C., Schulz M.W., Clarke E.** Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1951. – Vol. 70, iss. 2. – P. 1248–1255. – doi: 10.1109/T-AIEE.1951.5060554.
11. **Нос О.В.** Математические модели преобразования энергии в асинхронном двигателе: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 168 с.
12. **Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.** Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1984. – Vol. IA-20, iss. 3. – P. 625–630. – doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
13. **Herrera R.S., Salmerón P., Kim H.** Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: different approaches, assessment, and experimental results // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55, iss. 1. – P. 184–196. – doi: 10.1109/TIE.2007.905959.
14. **Nabae A., Nakano H., Togasawa S.** An instantaneous distortion current compensator without any coordinate transformation // International Power Electronic Conference, IPEC'95: proceedings, 3–7 April 1995. – Yokohama, Japan, 1995. – P. 1651–1655.
15. **Kim H., Akagi H.** The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames // Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99, Hong Kong, 27–29 July 1999. – Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 1999. – Vol. 1. – P. 422–427. – doi: 10.1109/PEDS.1999.794600.
16. **Ustariz A.J., Cano E.A., Tacca H.E.** Tensor analysis of the instantaneous power in electrical networks // Electric Power Systems Research. – 2010. – Vol. 80, iss. 7. – P. 788–798. – doi: 10.1016/j.epsr.2009.12.004.
17. **Cristaldi L., Ferrero A.** Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: an algebraic approach // European Transactions on Electrical Power. – 1996. – Vol. 6, iss. 5. – P. 305–309. – doi: 10.1002/etep.4450060504.
18. **Нос О.В., Панкратов В.В.** Алгоритм управления выходными токами активного силового фильтра с использованием гиперкомплексных чисел // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 33–39.
19. **Нос О.В., Панкратов В.В.** Анализ трехфазных систем компенсации мгновенной неэффективной мощности в кватернионном базисе // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 3–8.
20. **Агунов А.В.** Спектрально-частотная силовая активная фильтрация // Электротехника. – 2004. – № 10. – С. 30–32.

21. A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory / S.-J. Lee, H. Kim, S.-K. Sul, F. Blaabjerg // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2004. – Vol. 19, iss. 3. – P. 814–827. – doi: 10.1109/TPEL.2004.826499.
22. **Тигце У., Шенк К.** Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство: пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
23. **Salmerón P., Herrera R.S., Vázquez J.R.** A new approach for three-phase loads compensation based on the instantaneous reactive power theory // *Electric Power Systems Research*. – 2008. – Vol. 78, iss. 4. – P. 605–617. – doi: 10.1016/j.epsr.2007.05.003.
24. **Park R.H.** Two-reaction theory of synchronous machines // *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. – 1929. – Vol. 48, iss. 3. – P. 716–727. – doi: 10.1109/T-AIEE.1929.5055275.

CONTROL STRATEGIES OF THE SERIES–SHUNT ACTIVE POWER FILTERS

Nos O.V., Kucher E.S., Baklyak A.V.

Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russian Federation

Currently there are a number of ways for power quality improvement by reducing the influence of electronic converters on the AC public distribution systems. One of the most effective of them is based on the implementation of harmonic filtering and inactive power compensation. Conventionally to provide current and voltage sinusoidal waveforms passive *RLC*-filters, active power filters (APF) or their combinations are used. The passive ones allow us to shunt the high frequency current harmonics, generated by a nonlinear load. The APFs generate instantaneous compensative actions for preliminary distortion three-phase currents or voltages. In this context APF control strategies have a set of significant advantages over the passive compensation approach. Firstly an APF has the lower RMS losses in the power circuits. In the second place, APF can be automatically adjusted to the conditions changes such as operating modes or topology of AC electrical power system. Moreover, APF can be invariant to the thermal drift of the parameters. This makes implementation of APF free of any practical limitations in its application area. This paper deals with algorithmic principles for the series-shunt active power filter control strategies. The analysis is based on both the instantaneous *p-q* power theory and analytic techniques using extraction of positive sequence fundamental component from any nonlinear three-phase electrical quantities.

Keywords: active power filter, compensative actions, control strategy of compensation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-77-87

REFERENCES

1. Akagi H. Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*, 2005, vol. 93, iss. 12, pp. 2128–2141. doi: 10.1109/JPROC.2005.859603
2. Nos O.V., Kharitonov S.A. A system to control power currents of ineffective instantaneous power compensation. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, iss. 2, pp. 72–78. doi: 10.3103/S1068371215020108
3. Nos O.V. Garmonicheskii analiz kvaterniona mgnovennoi moshchnosti trekhfaznoi nagruzki proizvol'nogo vida [Harmonic analysis of the instantaneous power quaternion of an arbitrary-type three-phase load]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 1 (26), pp. 75–84. doi: 10.17212/1727-2769-2015-1-75-84
4. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Piscataway, New Jersey, IEEE Press; Hoboken, New Jersey, Wiley, 2007. 379 p.
5. Lee G.-M., Lee D.-Ch., Seok J.-K. Control of series active power filters compensating for source voltage unbalance and current harmonics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, vol. 51, iss. 1, pp. 132–139. doi: 10.1109/TIE.2003.822040
6. Nasiri A., Amac A.E., Emadi A. Series-parallel active filter/uninterruptible power supply system. *Electric power components and systems*, 2004, vol. 32, iss. 11, pp. 1151–1163. doi: 10.1080/15325000490441507

7. Shalygin K.A., Nos O.V. [Energy efficiency principles based on active power filters technical implementation]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014*. T. 2 [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on the Automatic Electric Drive], Saransk, October, 7–9, 2014, vol. 2, pp. 28–32.
8. Zhili T., Xun L., Jian C., Yong K., Yang Z. A new control strategy of UPQC in three-phase four-wire system. *IEEE 38 Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC07, USA, Orlando, 17–21 June 2007*: [proceedings]. Piscataway, New Jersey, IEEE Press, 2007, pp. 1060–1065. doi: 10.1109/PESC.2007.4342139
9. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. *Proceedings of the international power electronics conference IPEC'83, Japan, Tokio, 1983*, pp. 1375–1386. doi: 10.1002/ej.4391030409
10. Duesterhoeft W.C., Schulz M.W., Clarke E. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1951, vol. 70, iss. 2, pp. 1248–1255. doi: 10.1109/T-AIEE.1951.5060554
11. Nos O.V. *Matematicheskie modeli preobrazovaniya energii v asinkhronnom dvigatele* [Mathematical models of electrical energy conversion in the induction motor]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1990. 168 p.
12. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1984, vol. IA-20, iss. 3, pp. 625–630. doi: 10.1109/TIA.1984.4504460
13. Herrera R.S., Salmeron P., Kim H. Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: different approaches, assessment, and experimental results. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, iss 1, pp. 184–196. doi: 10.1109/TIE.2007.905959
14. Nabae A., Nakano H., Togasawa S. An instantaneous distortion current compensator without any coordinate transformation. *International Power Electronic Conference IPEC'95*: [proceedings], Japan, Yokohama, 3–7 April 1995, pp. 1651–1655.
15. Kim H., Akagi H. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference. *Proceedings of the IEEE 1999 international conference on power electronics and drive systems PEDS'99, Hong Kong, 27–29 July 1999*. Piscataway, New Jersey, IEEE Press, 1999, vol. 1, pp. 422–427. doi: 10.1109/PEDS.1999.794600
16. Ustariz A.J., Cano E.A., Tacca H.E. Tensor analysis of the instantaneous power in electrical networks. *Electric Power Systems Research*, 2010, vol. 80, iss. 7, pp. 788–798. doi: 10.1016/j.epsr.2009.12.004
17. Cristaldi L., Ferrero A. Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: an algebraic approach. *European Transactions on Electrical Power*, 1996, vol. 6, iss. 5, pp. 305–309. doi: 10.1002/etep.4450060504
18. Nos O.V., Pankratov V.V. Algoritm upravleniya vykhodnymi tokami aktivnogo silovogo fil'tra s ispol'zovaniem giperkompleksnykh chisel [Control strategy of shunt active power filters by using hypercomplex numbers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 6, pp. 33–39.
19. Nos O.V., Pankratov V.V. Analiz trekhfaznykh sistem kompensatsii mgnovЕННОI neeffektivnoi moshchnosti v kvaternionnom bazise [Analysis of three-phase system in quaternion basis for ineffective instantaneous power compensation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 3–8.
20. Agunov A.V. Spektral'no-chastotnaya silovaya aktivnaya fil'tratsiya [Spectral frequency active power filtering]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2004, no. 10, pp. 30–32. (In Russian)
21. Lee S.-J., Kim H., Sul S.-K., Blaabjerg F. A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, vol. 19, iss. 3, pp. 814–827. doi: 10.1109/TPEL.2004.826499
22. Tietze U., Schenk Ch. Halbeiter-Schaltungstechnik. Fünfte überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1980. 734 p. (Russ. ed.: Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika*. Translated from German. Moscow, Mir Publ., 1982. 512 p.).

23. Salmerón P., Herrera R.S., Vázquez J.R. A new approach for three-phase loads compensation based on the instantaneous reactive power theory. *Electric Power Systems Research*, 2008, vol. 78, iss. 4, pp. 605–617. doi: 10.1016/j.epsr.2007.05.003
24. Park R.H. Two-reaction theory of synchronous machines. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1929, vol. 48, iss. 3, pp. 716–727. doi: 10.1109/T-AIEE.1929.5055275

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Нос Олег Викторович – родился в 1972 году, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры проектирования технологических машин Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов связана с решением прикладных задач повышения энергоэффективности трехфазных систем переменного тока. Автор и соавтор более 70 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: nos@corp.nstu.ru).

Nos Oleg Victorovich (b. 1972) – Candidate of Science (Eng.). He is an associate professor at the department of technological machine design in the Novosibirsk state technical university. His research interests include instantaneous power theories and power quality. He is author and co-author of more than 70 scientific papers and work-books. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: nos@corp.nstu.ru).



Кучер Екатерина Сергеевна – родилась в 1984 году, канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – адаптивное бездатчиковое управление асинхронными электроприводами. Автор и соавтор более 15 научных работ. (Адрес: 630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: kucher@corp.nstu.ru).

Kucher Ekaterina Sergeevna (b. 1984) – Candidate of Science (Eng.). She is an associate professor at the department of electric drives and industry automation in the Novosibirsk state technical university. Scientific interests – adaptive sensorless control of AC electric drives. She is author and co-author of more than 15 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: kucher@corp.nstu.ru).



Бакляк Алина Валерьевна – родилась в 1992 году, закончила Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов связана с улучшением качества электрической энергии в трехфазных системах переменного тока. (Адрес: 630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: alina_baklyak@mail.ru).

Baklyak Alina Valerievna (b. 1992) – graduated from Novosibirsk State Technical University. Scientific interests are concerned with power quality improvement of AC three-phase systems. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: alina_baklyak@mail.ru).

Статья поступила 11 мая 2015 г.

Received May 11, 2015

To Reference:

Nos O.V., Kucher E.S., Baklyak A.V. Algoritmy upravleniya posledovatel'no-parallelnymi aktivnymi silovymi fil'trami [Control strategies of the series-shunt active power filters]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 77–87. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-77-87

УДК 535.65.088.3+343.98

**ЦВЕТОВОЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭКСПЕРТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
СЛЕДОВ ВЫСТРЕЛА****И.Г. Пальчикова^{1,2}, И.В. Латышов³,
В.А. Васильев³, А.В. Кондаков³, Е.С. Смирнов¹**¹*Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения СО РАН*²*Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет*³*Волгоградская академия Министерства внутренних дел
Российской Федерации*

В работе предложен и рассмотрен способ выявления и характеристики дополнительных следов выстрела на мишени путем обработки ее цифровой фотографии, обеспечивающий получение карт численных значений доминирующей длины волны и насыщенности цвета и последующую сегментацию цифрового изображения по этим цветовым характеристикам. Обоснована необходимость проведения калибровки цифровых измерительных колориметрических систем. Разработана процедура корректировки алгоритма вычисления доминирующей длины волны, которая улучшает достоверность, воспроизводимость и повышает точность определения спектральных цветов до величины $\pm 2,5$ нм. Экспериментально выявлено, что цветовое пространство признаков цифрового изображения адекватно отображает характеристики дополнительных следов выстрела, а величина доминирующей длины волны и насыщенности изменяется монотонно в зависимости от удаленности от центра входного отверстия. Они могут служить специфическими маркерами расстояния для нахождения размера общей зоны отложения копоти выстрела; размеров центральной и периферийной зон отложения копоти выстрела и соотношения их площадей. Предложенные алгоритмы и разработанная программа позволяют находить, выделять, визуализировать, проводить расчет области поражения, выполняя объективный количественный анализ базовых характеристик следов выстрела.

Ключевые слова: обработка цифровых изображений, измерение цвета, калибровка, доминирующая длина волны, насыщенность цвета, следы выстрела.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-88-101

Введение

За годы развития в рамках видов судебных экспертиз сложились определенные научные представления в области методики и инструментального сопровождения экспертных исследований. Так, изучение следов выстрела, образующихся на объекте поражения, позволяет решать диагностические экспертные задачи определения обстоятельств выстрела – их количества и очередности, направления и расстояния (дистанции) выстрела, положения потерпевшего к дульному срезу ствола оружия в момент выстрела и ряд других.

Кроме морфологии входного и выходного огнестрельных отверстий (основного следа выстрела) при экспертном исследовании принимают во внимание и характеристики дополнительных следов выстрела, возникающих при воздействии на преграду пламени выстрела, газопороховой струи и входящих в нее компонентов (копоти, зерен пороха, частиц металла оболочки пуль, элементов капсюльного состава, частиц влагозащитного лака, ружейного масла и осалки патронов). Среди

перечисленных наибольшее значение имеют следы копоти, зерна пороха, а также частицы металла с оболочки пули. Именно они в большей степени характеризуют следовую картину на поврежденном объекте в условиях выстрела с близкого расстояния. При этом установлено, что для большинства видов ручного стрелкового огнестрельного оружия зона преимущественного отложения копоти выстрела находится в интервале от 3 см до 30–40 см, а с расстояния от 40 до 150 см в силу большей массы зерен пороха и частиц металла на преграде осаждаются исключительно они. При стрельбе из оружия, канал ствола которого покрыт слоем ружейной смазки, капли масла летят до 200 см.

В выборе методов исследования образцов принимают во внимание действующее в криминалистической науке и практике правило, по которому приоритет отдается тем из них, использование которых не ведет к утрате объекта, не приводит к необратимому изменению их свойств. То есть в перечне неразрушающих методов экспертного исследования следов выстрела существенная роль должна принадлежать анализу видео- и фотоизображений, который является актуальным инструментом в ряде научно-технических задач, таких как сортировка объектов по цвету [1, 2], определение качества мясного сырья [3] и т. д.

В зарубежной [4] и отечественной [5] практике известны попытки адаптации отдельных моделей криминалистической техники (например, видеоспектральных компараторов) для исследования следов выстрела. При этом признают, что подобное оборудование изначально создавалось под решение задач технико-криминалистической экспертизы документов. Возможности этой техники заключаются лишь в визуализации и фотофиксации следов, которая к тому же нередко осложняется негативным влиянием цвета материала объекта, сходного с цветом копоти. Налетом мелкодисперсной копоти покрыты и вылетающие из ствола частицы металла оболочки пули. В числе прочих методов используется и наблюдение объекта в УФ- либо ИК-лучах. Источниками излучения света здесь служит, как правило, прибор ОЛД-41 и электронно-оптический преобразователь «Рельеф 2». Специализированной криминалистической техники для выявления и анализа следов выстрела на сегодня не существует.

Современная экспертная практика нуждается не только в выявлении и фиксации следов выстрела, но и в количественном подсчете и анализе базовых характеристик следов выстрела, определяемых закономерностями явления выстрела, внешней баллистики выстреленной пули, механизмом образования следов. Развитие методов компьютерного зрения [1] и разработка специальных методов обработки цифровых изображений для баллистической экспертизы и трасологии являются актуальной задачей.

Настоящая работа посвящена рассмотрению вопросов использования цветового анализа видеоизображений при производстве экспертных исследований следов выстрела. Изучаются возможности, которые предоставляют интегральные цветовые характеристики (доминирующая длина волны и насыщенность) для количественного описания дополнительных следов выстрела на цифровой фотографии мишени. Предлагается и рассматривается процедура корректировки алгоритма вычисления доминирующей длины волны, которая повышает достоверность и точность определения спектральных цветов в изображении и актуализирует количественный анализ базовых характеристик следов выстрела.

1. Определение цветовых характеристик цифрового изображения

Первой задачей, решаемой при производстве анализа изображения, является определение пространства значимых признаков, в которое затем отображается набор входных данных и, при необходимости производится его сегментация.

Удобные и измеримые признаки – это яркость и цвет изображения. Наиболее простым является одномерное яркостное пространство. Для большинства изображений контрастная чувствительность постоянна во всем диапазоне яркостей, что позволяет численно анализировать модуль разности яркостей. Однако признаки цвета несут дополнительную информацию.

В пикселях полутоновых цифровых изображений сохраняется единственная величина – это интенсивность (или уровень серого), в то время как каждый пиксель цветного изображения [6] содержит три значения интенсивности в соответствии с трехкомпонентной теорией цвета. Разработаны и применяются различные виды цветовых пространств, включая аппаратно-ориентированные, пространства, ориентированные на визуальное восприятие человека, или ориентированные на инструментальное использование в полиграфии. *RGB*-цветовое пространство (*R* – красный, *G* – зеленый, *B* – голубой) хорошо согласуется со способом фиксации изображения цифровой камерой и конструкцией цветных дисплеев. Два наиболее распространенных цветовых пространства – это *HSL* (цветовой тон, насыщенность, светлота) и *HSV* (цветовой тон, насыщенность, яркость), в которых приняты цилиндрические координаты. Эти цветовые пространства были разработаны для приложений компьютерной графики, сканеров, принтеров и широко применяются в редакторах цифровых фотоизображений. Однако хотя координата *H* пространства *HSL(V)* отвечает за оттенок цвета, она плохо коррелирует с оценками, выполненными экспертами, которые, как правило, ориентируются на спектральные цвета. Это, вероятно, связано с особенностями цветопередачи компьютерными девайсами и их различиями с восприятием цвета экспертом при естественном освещении. Цветовым пространством, адаптированным для использования различными инструментами, такими как колориметры, является *CIE XYZ*.

Процесс определения цветовых характеристик включает подготовку образца, получение и регистрацию изображения образца в стандартных условиях, преобразование изображения в цифровой формат для дальнейшего использования в компьютере и последующую обработку файла по алгоритмам, выделяющим цветовые и специальные характеристики.

Для численного описания морфологии и характеристик дополнительных следов выстрела могут быть использованы как матрицы цветовых координат пикселей изображения, так и интегральные цветовые характеристики. Для сегментации изображений обычно используются специальные метрики [7] цветовых пространств. Однако экспертное описание содержит визуальную оценку цвета образца, которая основывается на применении специальных цветовых атласов или ориентирована на спектральные цвета. Поэтому мы предлагаем строить количественное описание с использованием интегральных характеристик (доминирующей длины волны и насыщенности), которые с одной стороны хорошо коррелируют с качественными визуальными экспертными оценками, а с другой – являются объективными количественными характеристиками.

Обработка цифрового изображения проводилась нами в программной среде *MathCAD*, разработанная программа вычисляет значения доминирующей длины волны и насыщенности для каждой точки цифрового изображения (пикселя) на основе значений ее цветовых координат (*R*, *G*, *B*). Программа позволяет получить усредненные оценки изображения как по всему кадру, так и по какой-либо выделенной части кадра. Предусмотрен вывод двумерных карт и трехмерных распределений вычисленных значений характеристик.

Доминирующая длина волны (λ_d) и насыщенность (*s*) для каждой точки изображения (пикселя) вычисляются с использованием спектрального локуса [1, 6]. Цветности реальных излучений ограничены на диаграмме цветности кривой спек-

тральных цветов (локусом) и линией пурпурных тонов, замыкающей красный и синий концы локуса. Каждая точка линии локуса характеризуется собственной длиной волны (λ). Точки внутри области, ограниченной локусом, представляют смесь спектральных цветов, которая характеризуется доминирующей длиной волны (λ_d) и насыщенностью ($0 < s < 1$). Для определения λ_d и s , кроме цветовых координат пикселя, необходимо знать цветовые координаты осветителя, которые в нашем случае задаются как координаты равноэнергетического белого цвета E ($x = 0,33$; $y = 0,33$) ввиду того, что доминирующая длина волны определяется каждый раз для изображения объекта, нормированного на белый фон. Наилучшей поверхностью белого цвета для цветовых измерений является плоская матовая поверхность порошкообразной химически чистой окиси магния.

Проекция координат (R, G, B) в систему $CIE XYZ$ осуществляется согласно [6] по формулам:

$$X = 2,7687R + 1,7516G + 1,1301B,$$

$$Y = 1R + 4,5904G + 0,0601B,$$

$$Z = 0,0565G + 5,5939B.$$

Значения хроматических координат X и Y определяются по формулам [6]:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}.$$

Насыщенность s рассчитывается с помощью следующего выражения:

$$s = \frac{\sqrt{(x_{src} - x)^2 + (y_{src} - y)^2}}{\sqrt{(x_{src} - W_x)^2 + (y_{src} - W_y)^2}},$$

где x_{src} и y_{src} – хроматические координаты источника; W_x и W_y – хроматические координаты доминирующей длины волны, полученные в точке пересечения цветового локуса с прямой, соединяющей точку источника (x_{src}, y_{src}) с точкой цвета (x, y) пикселя. В наших приложениях мы не вводили дополнительных длин волн для пурпурных цветов, а принимали для них отрицательные значения на линии пурпурных тонов. При таком определении пурпурные цвета не маскируют остальные в процессе последующей обработки цифровых изображений и не используются для выделения характеристик изображения или значимых маркеров.

2. Эффективность передачи цвета и алгоритм коррекции вычислений

Способы калибровки камер повышенной дигитализации, особенности регистрации и необходимые параметры съемки цифровых изображений, предназначенных для обработки и извлечения количественных данных об их оптической плотности, подробно проанализированы нами в [8]. Для рассматриваемых здесь вопросов первостепенное значение имеют достоверность и точность количественного определения спектральных цветов в изображении, эффективность передачи цвета.

Различие между двумя цветами в колориметрии можно выразить численно для цифровых изображений. Обычно цветовое расстояние находится с помощью формулы для вычисления расстояния в евклидовом пространстве, однако ни одно цветовое пространство не является евклидовым со строгой математической точки зрения [9]. И даже поправки (компенсации для нейтральных цветов, светлоты,

насыщенности цвета и тона), внесенные в новый стандарт *CIE* [10], полностью устранили неоднородности восприятия цветового различия.

Эффективность передачи цвета мы определяли экспериментально с помощью эталонного атласа цветов [11] для диапазона спектральных длин волн: 380–645, 705–780 нм, с шагом 1–5 нм. Изучались цветопередача и возможности применения в цветоизмерительных системах типичных камер, используемых криминалистами: 1) Видеоскан 415/Ц *USB Camera* (матрица *ICX415*, *Sony Corp., Japan*; ООО «ЭВС» Россия, Санкт-Петербург); 2) камера *Canon EOS 500D* (*Canon Inc., Japan*). В таблице представлены основные характеристики каждой из камер. Осветителем служили две линейные галогенные лампы накаливания Фотон (ООО «Фотон», Россия, Москва) с цветовой температурой до 3400 К, расположенные таким образом, что обеспечивалась практически равномерная засветка поля формата А4.

Характеристики камер
Characteristics of cameras

Характеристика	Модель камеры	
	Видеоскан 415/Ц <i>USB</i>	<i>Canon EOS 500 D</i>
Датчик, тип	<i>CCD</i>	<i>CMOS</i>
Размер матрицы, мм	7,48×6,15	22,3×14,9
Количество пикселей	782×582	4752×3168
Диапазон оцифровки изображений (дигитализация)	8 бит	14 бит
Ручной баланс белого	Нет	Да

В экспериментах выбирались параметры съемки, зависящие от камеры. Верная передача цвета в цифровой фотографии достигается настройкой баланса белого. При использовании камеры Видеоскан 415/Ц *USB* пользователю доступны только две настройки – усиление и экспозиция (выбиралось усиление 100 %, экспозиция – в зависимости от освещенности до 1152 миллисек). Предусловки производителя по цветоделению не могут быть изменены. Цифровое изображение бралось в формате *TIFF* 8-бит.

Пользовательская установка баланса белого позволяет избежать автоматической коррекции соотношений цветовых каналов. Камера *Canon EOS 500D* допускает режим пользовательских настроек, в котором исключены предобработки изображения встроенным процессором самой камеры. В этом режиме задано: ручной баланс белого, отсутствие сдвига баланса, отсутствие брекетинга, стиль изображения «Точное», светочувствительность *ISO* 100, расширение диапазона *ISO* отключено, шумоподавление при длительной выдержке и высоких *ISO* отключено, приоритет цветов запрещен, автокоррекция яркости запрещена. Изображение образца регистрировалось в режиме пользовательских настроек камеры в формате *RAW* 14-бит.

Зарегистрированные изображения цветовых элементов атласа попиксельно нормировались на соответствующие изображения белого фона атласа, съемка которого осуществлялась камерами предварительно. По нормированным изображениям производились вычисления доминирующих длин волн.

Результаты представлены на рис. 1, а, б. Прямые точечные линии отмечают «идеальную» цветопередачу. Сплошные линии – это графики зависимости длины волны λ_d , вычисленной по программе, обрабатывающей изображение цветового элемента атласа, от номинальной доминирующей длины волны λ_c цветового элемента. Стандартные ошибки средних значений λ_d для выборок пикселей в пределах цветового элемента составили не более 0,05 % от λ_d . В силу малого своего значения данный параметр не различим на рис. 1, а и б. Камеры значительно

отличаются по своим характеристикам, тем не менее ход сплошных кривых на графиках на рис. 1, а и б очень близок.

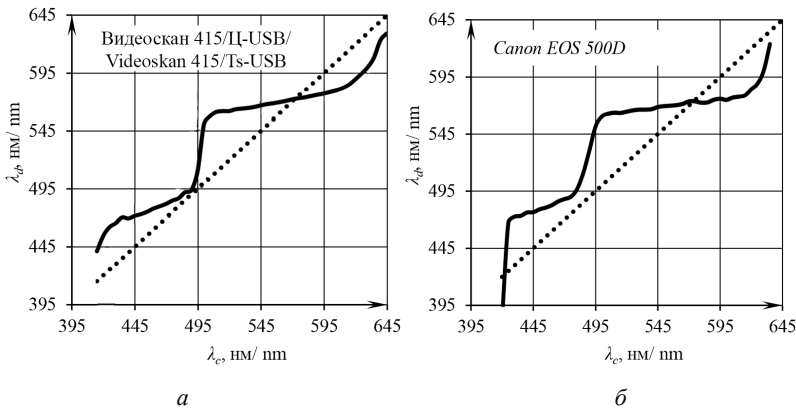


Рис. 1 – Цветопередача камер:

а – Видеоскан 415/Ц USB; б – Canon EOS 500D

Fig. 1 – The color rendition of cameras:

а – Videоскан 415/Тs-USB; б – Canon EOS 500D

Для линейризации рассматриваемой зависимости мы предложили и разработали алгоритм внесения поправочных коэффициентов в расчет доминирующей длины волны, графическая интерпретация которого сводится к совмещению кривой графика на рис. 1 с прямой линией. Способ внесения поправки очевиден из вида графика. Так, прибавляя к ординатам точек сплошной кривой некоторое значение поправки, всегда можно получить точки, близкие к прямой линии «идеальной цветопередачи». График зависимости вносимых поправок $\Delta\lambda$ от номинальной длины волны λ_c цветового элемента представлен на рис. 2. Вариация значений поправок составляет от +6 до -12 % в спектральном диапазоне. Представленные значения поправок находились путем усреднения по многим цифровым изображениям. Из рис. 2 следует, что поправки близки для обеих камер и ход кривых одинаков. Этот факт связан с тем, что на величину поправок и на форму графика коррекции (рис. 2) в значительной степени влияет форма локуса. С шагом 0,1 нм по длинам волн был построен и исследован locus колориметрического наблюдателя с углом зрения 10° (рис. 3). На рис. 3 цифрой 1 обозначено положение источника света на локусе Планка 3, цифра 2 отмечает точку определяемого цвета. Длина волны, на которую приходится минимальная поправка (496,2 нм, рис. 3) – это суть точка, в которой угол γ между касательной к локусу и осью абсцисс составляет 90° и в этом месте происходит разрыв в зависимости угла γ от длины волны.

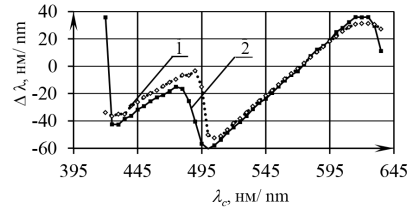


Рис. 2 – Значения поправок для доминирующей длины волны изображения спектральных цветов:

точечная линия 1 – камера Видеоскан 415/Ц USB, сплошная линия 2 – камера Canon EOS 500D

Fig. 2 – Correction values for dominant wavelength spectral image colors:

dotted line 1 is camera Videоскан 415/Тs-USB, solid line 2 is camera Canon EOS 500D

длина волны, на которую приходится минимальная поправка (496,2 нм, рис. 3) – это суть точка, в которой угол γ между касательной к локусу и осью абсцисс составляет 90° и в этом месте происходит разрыв в зависимости угла γ от длины волны.

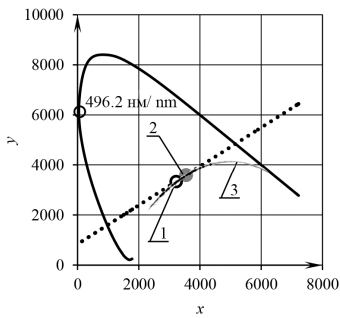


Рис. 3 – Иллюстрация к определению λ_d с помощью локуса

Fig. 3 – Illustration to the definition λ_d with the help of the color locus

фонового элемента. Точность определения доминирующей длины волны цвета элементов атласа с коррекцией составила $\pm 2,5$ нм (рис. 4). Рис. 4 иллюстрирует отличие δ вычисленной с коррекцией доминирующей длины волны λ'_d цветочных элементов атласа от ее номинального значения.

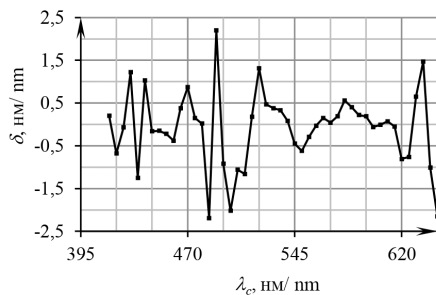


Рис. 4 – Зависимость величины $\delta = \lambda'_d - \lambda_c$ от значения доминирующей длины волны λ_c цветочных элементов атласа

Fig. 4 – The dependence of the $\delta = \lambda'_d - \lambda_c$ from value of dominant wavelength λ_c from the atlas color elements

3. Эксперименты с изображениями мишеней

Вычислительный эксперимент проводился с изображениями следов выстрела на мишенях, представляющих собой прострелянную темную ткань. Общий вид мишени дан на рис. 5. Непосредственное визуальное восприятие мишени или фотографии не выявляет ощутимой окраски или ее вариации на следах выстрела. Для скрупулезного анализа общего вида следов выстрела средствами *Adobe Photoshop Creative Suite (Adobe Systems, Inc., USA)* «вырезалась» центральная часть и производилось контрастирование цифрового изображения. Результаты контрастирования использовались лишь для визуальных оценок и предварительных выводов относительно возможностей применения вычислительных технологий к форматам сырых изображений. На рис. 6, а дано исходное изображение с усиленной насыщенностью цветов. Увеличенное изображение этого фрагмента – на рис. 6, б. Здесь уже хорошо различимы зоны отложения копоти, частицы металла и зерна пороха в виде пятен различной окраски и яркости (светлые и темные точки на изображении). На негативном изображении мишени на рис. 6, в темные пятна выделяются наиболее четко.

При производстве экспертных исследований интерес могут представлять подсчет количества пятен в выделенной области изображения и, возможно, их сорти-

ровка по яркости (типу). Такого рода анализ цифрового изображения предполагает определение геометрических областей, отличающихся средней яркостью, и указание для каждой из них номера типа. В нашем случае предпочтительным методом сегментации будет пороговая обработка с автоматическим определением порога. Алгоритмы пороговой обработки известны [1] и легко реализуемы.

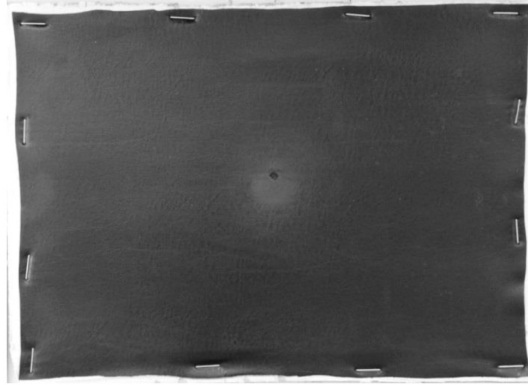


Рис. 5 – Вид мишени со следами выстрела

Fig. 5 – The target with the shot's trace

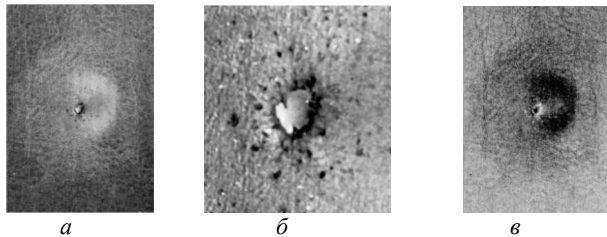


Рис. 6 – Различные способы контрастирования центральной части мишени

Fig. 6 – Different ways to contrast the central part of the target

Для математической обработки брались сырые файлы, полученные непосредственно с камер. В ходе вычислительного эксперимента строились карты распределения доминирующих длин волн λ'_d и насыщенности s по выделенным областям изображений с координатами сторон l_1, l_2 . На рис. 7, *а* дано трехмерное представление распределения λ'_d (сглаженное скользящим окном 7×7), на рис. 7, *б* – двумерное. Насыщенность s цветов – 100 %. На рис. 8, *а* дано трехмерное представление распределения насыщенности s (сглаженное скользящим окном 7×7), на рис. 8, *б* – двумерное.

Расчеты выявили, что величина доминирующей длины волны и насыщенность изменяются монотонно в зависимости от удаленности от центра входного отверстия. То есть сегментация цветовой карты изображения также может быть выполнена на основе пороговой обработки, а λ'_d и s могут служить специфическими маркерами расстояния для нахождения размера общей зоны отложения копоти выстрела; размеров центральной и периферийной зон отложения копоти выстрела и соотношения их площадей. Перечисленные характеристики определяются по

количеству пикселей в соответствующих зонах, а после фотограмметрической калибровки камеры – в метрической мере.

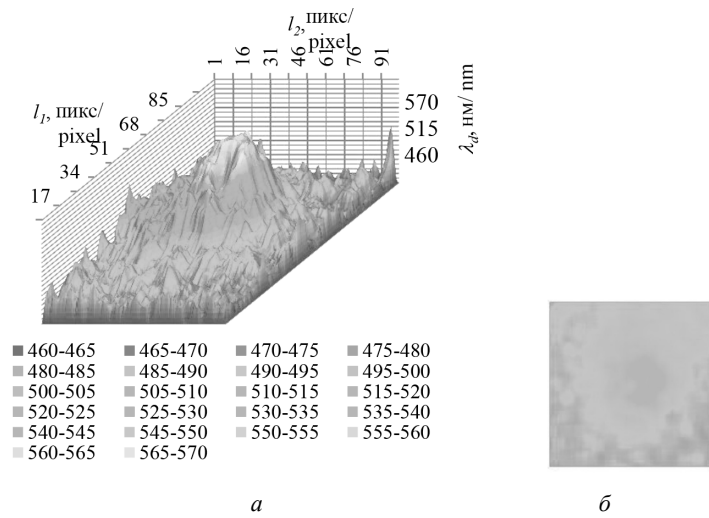


Рис. 7 – Карта распределения λ'_d по выделенной области изображения:

a – трехмерное представление; *б* – двумерное представление

Fig. 7 – The distribution map of λ'_d of the selected image area:

a – 3D representation; *b* – 2D representation

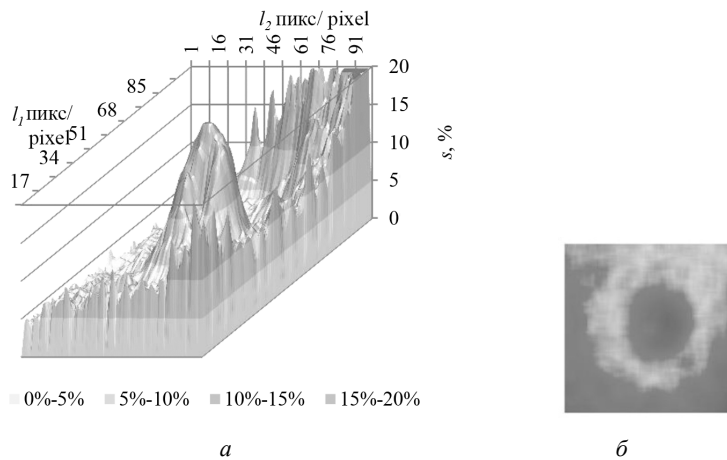


Рис. 8 – Карта распределения насыщенности *s* по выделенной области изображения:

a – трехмерное представление; *б* – двумерное представление

Fig. 8 – The distribution map of the saturation *s* of the selected image area:

a – 3D representation; *b* – 2D representation

Эти положения иллюстрируются рис. 9. На рис. 9, *a* дан график зависимости λ'_d от относительной координаты на прямой линии, проходящей через центр отверстия на цифровом изображении следа. Центр отверстия расположен в координате 50. На рис. 9, *б* – соответствующий график зависимости *s* от координаты.

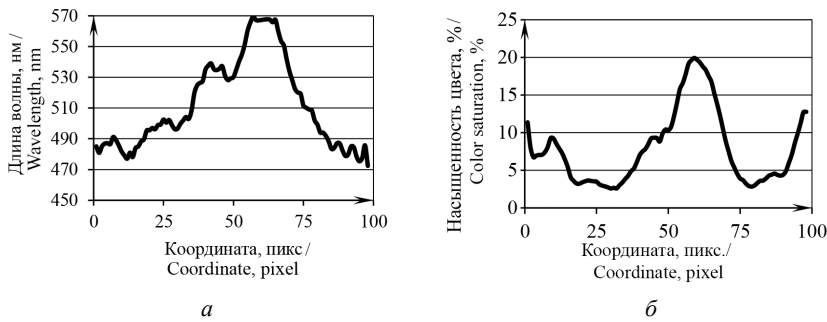


Рис. 9 – Графики зависимости от координаты:

a – доминирующей длины волны λ'_d ; *b* – насыщенности s

Fig. 9 – The graphs of the coordinate:

a – the dominant wavelength λ'_d ; *b* – the saturation s

Цветовое пространство признаков цифрового изображения адекватно отображает характеристики дополнительных следов выстрела. Предложенные алгоритмы и разработанная программа позволяют находить, выделять, визуализировать, проводить расчет области поражения.

Закключение

В результате экспериментального изучения и сравнения эффективности передачи цвета различными камерами обоснована необходимость проведения калибровки цифровых измерительных колориметрических систем и уточнения алгоритма расчета доминирующей длины волны. Разработанный и предложенный алгоритм расчета и внесения поправок в значения доминирующих длин волн на цифровых изображениях позволяет повысить достоверность и точность определения спектральных цветов до величины $\pm 2,5$ нм. Увеличение точности определения доминирующих длин волн в изображении позволяет использовать полученные значения для оценки не только визуальных сравнительных характеристик образцов, но и расчета цветовых характеристик образца в специальных применениях.

Проведенные исследования подтверждают перспективность применения предложенных подходов при выявлении, расчете и анализе следов выстрела, в том числе при определении следующих их базовых характеристик: размера входного отверстия и пояска обтирания; размера общей зоны отложения копоти выстрела; размеров центральной и периферийной зон отложения копоти выстрела, соотношения их площадей; размеров зон осыпи зерен пороха и частиц металла оболочки пуль.

Из совокупности полученных результатов следует, что для нахождения базовых характеристик достаточно произвести обработку цифрового изображения, обеспечивающую получение карт численных значений доминирующей длины волны, насыщенности цвета и последующую сегментацию цифрового изображения с отображением (выводом) базовых характеристик в удобном для эксперта виде, например, двумерных графиков или трехмерных представлений, диаграмм, таблиц и т. д.

Количественная оценка перечисленных характеристик следов выстрела позволяет создать условия для автоматизации процесса сравнения исследуемого огнестрельного повреждения с банком данных огнестрельных повреждений, экспериментально полученных при стрельбе из различных образцов и моделей ручного стрелкового оружия с близкой дистанции. Производство экспертных исследований следов выстрела требует создания профильных цифровых колориметрических программно-технических решений, которые включают в себя осветитель, цифровую регистрирующую видеосистему, сопряженную с компьютером, и специализированную программу обработки исходных данных исследуемого следа выстрела.

В перспективе на базе цифрового колориметрического программно-технического решения возможно создание профильной информационно-поисковой системы для целей экспертной практики.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гонсалес Р., Вудс Р.Е.** Цифровая обработка изображений: пер. с англ. – Изд. 3-е, испр. и доп. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
2. **Молочков В.П.** Основы работы в Adobe Photoshop CS5 [Электронный ресурс]: курс лекций. – [Б. м.]: INTUIT, 2011. – 186 с. – URL: <http://i.booksgid.com/web/online/41239> (дата обращения: 05.06.2015).
3. Установки для экспресс-оценки свежести мяса / А.Ф. Алейников, И.Г. Пальчикова, Ю.В. Обидин, В.С. Глянченко, Е.С. Смирнов, Ю.В. Чугуй, А.Н. Швыдков // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 4. – С. 74–77.
4. Visualization of gunshot residue patterns on dark clothing / C.S. Atwater, M.E. Durina, J.P. Durina, R.D. Blackledge // Journal of Forensic Sciences. – 2006. – Vol. 51, iss. 5. – P. 1091–1095. – doi: 10.1111/j.1556-4029.2006.00226.x.
5. Возможности использования аппаратных ресурсов видеоспектрального компаратора «Docucenter Nirvis Projectina» при производстве судебно-баллистических исследований следов выстрела / И.В. Латышов, А.В. Кондаков, В.А. Васильев, М.Е. Пахомов // Судебная экспертиза: российский и международный опыт: сборник научных трудов II международной научно-практической конференции, Волгоград, 21–22 мая 2014 г. – Волгоград: ВА МВД России, 2014. – С. 181–185.
6. **Луизов А.В.** Цвет и свет. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
7. **Чочиа П.А.** Сегментация изображений на основе анализа расстояний в пространстве признаков // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 97–110.
8. Особенности применения цифровых камер для цитофотометрического определения количества ДНК в ядрах клеток / И.Г. Пальчикова, Л.В. Омелянчук, Е.И. Пальчиков, Е.С. Смирнов, В.Ф. Семешин // Датчики и системы. – 2012. – № 3. – С. 2–12.
9. **Melgosa M., Quesada J.J., Hita E.** Uniformity of some recent color metrics tested with an accurate color-difference tolerance dataset // Applied Optics. – 1994. – Vol. 33, iss. 34. – P. 8069–8077. – doi: 10.1364/AO.33.008069.
10. **Sharma G., Wu W., Dalal E.N.** The CIEDE2000 color-difference formula: implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations // Color Research and Application. – 2005. – Vol. 30, iss. 1. – P. 21–30. – doi: 10.1002/col.20070.
11. **Пальчикова И.Г., Смирнов Е.С.** Особенности цветовой калибровки измерительных систем // Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2014: X международный научный конгресс, 08–18 апреля 2014 г., Новосибирск; Международная научная конференция «СибОптика-2014»: сборник материалов. – Новосибирск: СГГА, 2014. – Т. 5, № 1. – С. 128–134.

COLOR ANALYSIS OF DIGITAL IMAGES IN EXPERT JUDGEMENT OF SHOT'S TRACE

Palchikova I.G.^{1,2}, Latyshov I.V.³,
Vasil'ev V.A.³, Kondakov A.V.³, Smirnov E.S.¹

¹*Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation*

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

³*The Volgograd Academy of the Russian Internal Affairs Ministry,
Volgograd, Russian Federation*

The approach for revelation and characterization of additional shot's traces at the target digital images is proposed and examined. The per-pixel maps of dominant wavelengths and saturation for target digital images is computed and drawn. Regarding these colour characteristics the digital image segmentation is performed. Need of carrying out calibration of the digital measuring colorimetric systems is proved. Special corrective procedure for algorithm of dominant wavelength calculation is introduced. It enhance reliability, repeatability and accuracy of calculation of spectral colors up to $\pm 2,5$ nm. It is experimentally revealed that the color space of attributes of the digital image adequately displays characteristics of additional traces of a shot, and the quantities of the dominant wavelength and the saturation vary monotonically according to remoteness from the center of an inlet hole. Color attributes of the digital image can serve as specific markers of the distance for finding the size of the general zone of a shot soot deposit; sizes of the central and peripheral zones of a shot soot deposit, and ratio of their areas. The proposed algorithms and the developed program allow to find, allocate, visualize, carry out the calculation of affected area, making the objective quantitative analysis of basic characteristics of shot traces.

Keywords: digital image processing, color, measurement, calibration, dominant wavelength, saturation of color, shot's trace.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-88-101

REFERENCES

1. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital image processing*. 3rd ed. New Jersey, Prentice-Hall, 2008. 954 p. (Russ. ed.: Gonsales R., Vuds R.E. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii*. Translated from English. Mocow, Tekhnosfera Publ., 2012. 1104 p.).
2. Molochkov V.P. *Osnovy raboty v Adobe Photoshop CS5* [The basics of the Adobe Photoshop CS5]. S. I., INTUIT Publ., 2011. 186 p. (In Russian). Available at: <http://i.booksgid.com/web/online/41239> (accessed 05.06.2015)
3. Alejnikov A.F., Palchikova I.G., Obidin Ju.V., Gljanenko V.S., Smirnov E.S., Chuguj Ju.V. Ustanovki dlya ekspress-otsenki svezhesti myasa [Devices for the fast assessment of freshness of meat]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK – Achievements of Science and Technology of AI-Cis*, 2013, no. 4, pp. 74–77.
4. Atwater C.S., Durina M.E., Durina J.P., Blackledge R.D. Visualization of gunshot residue patterns on dark clothing. *Journal of Forensic Sciences*, 2006, vol. 51, iss. 5, pp. 1091–1095. doi: 10.1111/j.1556-4029.2006.00226.x
5. Latyshov I.V., Kondakov A.V., Vasil'ev V.A., Pahomov M.E. [Applicability video spectrometer hardware «Docucenter Nirvis Projectina» in the production forensic ballistic studies of shot's tracks]. *Sudebnaya ekspertiza: rossiiskii i mezhdunarodnyi opyt: sbornik nauchnykh trudov 2 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Forensic examination: Russian and International experience: proceedings of the 2nd International Scientific-Practical Conference], Volgograd, May 21–22, 2014, pp. 181–185.
6. Luizov A.V. *Tsvet i svet* [Color & Light]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1989. 256 p.
7. Chochia P.A. Segmentatsiya izobrazhenii na osnove analiza rasstoyanii v prostranstve priznakov [Image segmentation based on the analysis of distances in an attribute space]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2014, vol. 50, iss. 6, pp. 613–624.

- doi: 10.3103/S8756699014060107. Translated from *Avtometriya*, 2014, vol. 50, iss. 6, pp. 97–110.
8. Palchikova I.G., Omel'janchuk L.V., Pal'chikov E.I., Smirnov E.S., Semeshin V.F. Osobennosti primeneniya tsifrovyykh kamer dlya tsitofotometricheskogo opredeleniya kolichestva DNK v yadrah kletok [Digital camera characteristics and application for cytophotometric measurements of DNA content in nuclei of cells]. *Datchiki i sistema – Sensors & Systems*, 2012, no. 3, pp. 2–12.
 9. Melgosa M., Quesada J.J., Hita E. Uniformity of some recent color metrics tested with an accurate color-difference tolerance dataset. *Applied Optics*, 1994, vol. 33, iss. 34, pp. 8069–8077. doi: 10.1364/AO.33.008069
 10. Sharma G., Wu W., Dalal E.N. The CIEDE2000 color-difference formula: implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research and Application*, 2005, vol. 30, iss. 1, pp. 21–30. doi: 10.1002/col.20070
 11. Palchikova I.G., Smirnov E.S. [Features of colour calibration for measuring systems]. *Interexpo Geo-Sibir'-2014: X mezhdunarodnyi nauchnyi kongress*, 08–18 aprelya 2014 g., Novosibirsk; *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "SibOptika-2014"*: sbornik materialov [Interexpo GEO-Siberia-2014: X International Scientific Congress, 08–18 of April 2014, Novosibirsk; International Science Conference "Siberian Optics-2014": sourcebook]. Novosibirsk, 2014, vol. 5, no. 1, pp. 128–134. (In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Пальчикова Ирина Георгиевна – родилась в 1954 году, д-р техн. наук, доцент, профессор НГУ, заведующая лабораторией лазерных прецизионных систем в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН и профессор кафедры «Общая физика» НГУ. Область научных интересов: лазерные информационные технологии, компьютерная оптика, обработка изображений, микроскопия, цифровая фотография. E-mail: palchikova@gmail.com

Palchikova Irina Georgievna, (b. 1954) graduated from Novosibirsk State University in 1976, majoring in Physics and Applied Mathematics. She received her Doctor in Physics & Maths degree from Novosibirsk State University in 2000. Professor. Head of Laser Precision Technologies Laboratory of Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, professor at NSU's General Physics sub department. Her leading research interests include laser information technologies, computer optics, image processing, microscopy.



Латышов Игорь Владимирович, канд. юрид. наук, доцент, начальник кафедры трасологии и баллистики УНК ЭКД федерального государственного казенного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Волгоградская академия Министерства внутренних дел Российской Федерации». Область научных интересов: криминалистика, судебная экспертиза. E-mail: latyshov@gmail.com.

Latyshov Igor Vladimirovich, Candidate of Science (Law), Associate Professor, the Head of the Chair of Traceology and Ballistics of the Training and Scientific Complex of Expert Criminalistic Activities of the Volgograd Academy of the Ministry of Interior of Russia. Research interests are criminology, forensics.



Васильев Василий Алексеевич, канд. хим. наук, ст. препод. кафедры трасологии и баллистики учебно-научного комплекса федерального государственного казенного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Волгоградская академия Министерства внутренних дел Российской Федерации». Область научных интересов: судебная экспертиза. E-mail: v-vasiliev@inbox.ru.

Vasiliev Vasily Alexeevich, Candidate of science (chemistry), Senior Lecturer of the Chair of Traceology and Ballistics of the Training and Scientific Complex of Expert Criminalistic Activities of the Volgograd Academy of the Ministry of Interior of Russia. Research interest is forensics.



Кондаков Александр Владимирович, канд. юрид. наук, ст. преподаватель кафедры трасологии и баллистики УНК ЭКД федерального государственного казенного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Волгоградская академия Министерства внутренних дел Российской Федерации». Область научных интересов: криминалистика, судебная экспертиза. E-mail: akondakov@rambler.ru.

Kondakov Alexander Vladimirovich, Candidate of Science (Law), Senior Lecturer of the Chair of Traceology and Ballistics of the Training and Scientific Complex of Expert Criminalistic Activities of the Volgograd Academy of the Ministry of Interior of Russia. Research interests are criminology, forensics.



Смирнов Евгений Сергеевич – родился в 1985 г., Сибирская государственная геодезическая академия, специальность 200203 «Оптико-электронные приборы и системы» (2010), аспирантура НГУ по специальности 01.04.05 «Оптика», младший научный сотрудник в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН. Область научных интересов: обработка графических изображений, специальные методы обработки цифровых изображений. E-mail: the-first-person@yandex.ru

Smirnov Evgenii Sergeevich, graduated from Siberian state Academy of Geodesy in 2010, majoring in Optoelectronic Devices and Systems, postgraduate student of NSU in Optics. Junior researcher at the Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS. Research interests are computer graphics processing, special processing of digital images.

*Статья поступила 18 мая 2015 г.
Received May 18, 2015*

To Reference:

Pal'chikova I.G., Latyshov I.V., Vasil'ev V.A., Kondakov A.V., Smirnov E.S. Tsvetovoi analiz tsifrovyykh izobrazhenii pri proizvodstve ekspertnykh issledovaniy sledov vystrela [Color analysis of digital images in expert judgement of shot's trace]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 88–101. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-88-101

УДК 621.396.96

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ ИНВЕРСНОЙ И ВИНЕРОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Ю.С. Петрова, А.А. Спектор

Новосибирский государственный технический университет

В информационно-измерительных системах для ослабления действия помех часто применяются многоканальные структуры, в которых работа датчиков основывается на принципах различной физической природы. В данной статье рассматриваются двухканальная система с использованием датчиков перемещения на основе инверсной фильтрации и двухканальная система на основе фильтра Винера. Один из каналов является основным, а другой – дополнительным. Измерительные датчики в основном и дополнительном каналах основываются на различных физических принципах, благодаря чему полезный эффект, для регистрации которого предназначен основной канал, в дополнительных каналах отсутствует, а некоторые виды помех в основном и дополнительном каналах являются коррелированными. Поэтому использование дополнительных датчиков помогает оценить помеху в дополнительном канале без полезного эффекта, наблюдаемого в основном канале и модифицировать сигнал дополнительного канала, приведя его к виду сигнала основного канала и выполнить вычитание сигналов, таким образом ослабить действие помехи в основном канале. В результате представлены графики зависимости дисперсии ошибки преобразования от дисперсии входного шума для системы на основе инверсной фильтрации и для системы на основе фильтра Винера. Рассматривается помехоустойчивость системы применительно к случаю, когда в роли датчика перемещения используется гироскоп.

Ключевые слова: многоканальные структуры, датчики, инверсная фильтрация, фильтр Винера, помеха.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-102-109

Введение

В информационно-измерительных системах для ослабления действия помех часто применяются многоканальные структуры, в которых работа датчиков основывается на принципах различной физической (или иной) природы. Один из каналов, называемый далее основным, является формирователем полезного эффекта. Остальные каналы – дополнительные, служат для ослабления помех в основном канале. Значительного эффекта часто удается достичь уже при использовании даже одного дополнительного канала. Многоканальные информационные схемы используют в тех случаях, когда применением фильтрации помех в основном канале не удастся достичь требуемого качества [4]. Усложнение измерительных систем, вызванное многоканальностью, обычно оправданно при создании особо ответственных систем, когда для достижения требуемого качества приемлемы повышенные расходы.

1. Постановка задачи

Использование в основном и дополнительных каналах датчиков, работающих на различных принципах, обычно приводит к тому, что полезный эффект, для

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по государственному заданию № 2014/138, проект № 1176.

регистрации которого предназначен основной канал, в дополнительных каналах отсутствует, а некоторые виды помех в основном и дополнительном каналах оказываются коррелированными. Это дает возможность, осуществив определенное преобразование сигнала дополнительного канала (фактически – модифицированной помехи основного канала) с целью приведения к виду помехи основного канала, выполнить его вычитание из наблюдаемого сигнала основного канала, ослабив этим действие помехи. На рис. 1 показана структурная схема формирования и подавления помехи в измерительной системе, содержащей, кроме основного, один дополнительный канал.

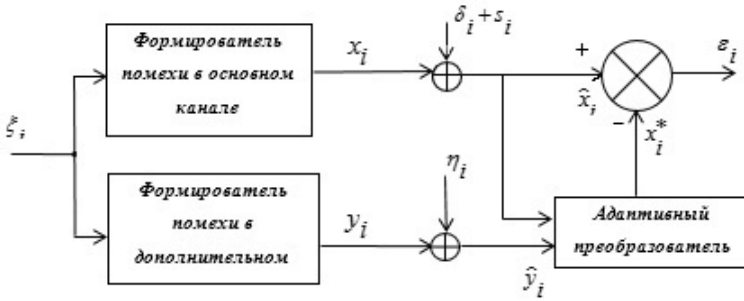


Рис. 1 – Формирование и компенсация помехи в двухканальной измерительной системе

Fig. 1 – Generation and compensation of a noise in a two-channel system

Общим для обоих каналов источником помехи является информационный белый гауссовский шум ξ_i , из которого измерительные системы формируют наблюдаемые в каналах помехи x_i и y_i . Все процессы происходят в дискретном времени $-\infty < i < \infty$. В обоих каналах присутствуют белые гауссовские шумы регистрирующих устройств δ_i и η_i , а в основном канале – и полезный сигнал s_i , оценивание которого является конечной задачей измерительной системы. Адаптивный преобразователь на основе анализа сигналов $\hat{y}_i = y_i + \eta_i$ и $\hat{x}_i = x_i + \delta_i + s_i$ преобразует первый из них таким образом, чтобы характеристики сигнала x_i^* на его выходе совпадали с аналогичными характеристиками x_i . При этом в выходном продукте обработки $\varepsilon_i = \hat{x}_i - x_i^*$ достигается ослабление помехи x_i .

В реальных измерительных системах часто помехи x_i и y_i описываются гауссовскими моделями и, следовательно, формирователи в схеме рис. 1 являются линейными преобразователями. Представим выполняемые ими преобразования в виде

$$x_i = L_x(\Xi), \quad y_i = L_y(\Xi),$$

где Ξ – вектор отсчетов входного белого шума ξ_i . Пусть обратное преобразование для дополнительного канала описывается соотношением

$$\xi_i = L_y^{-1}(\mathbf{Y}), \quad (1)$$

в котором \mathbf{Y} – вектор, состоящий из отсчетов y_i . Будем находить оценку $\hat{\xi}_i$ белого шума ξ_i , применяя преобразование (1) к наблюдаемому сигналу \hat{y}_i :

$$\hat{\xi}_i = L_y^{-1}(\hat{\mathbf{Y}}), \quad (2)$$

где $\hat{\mathbf{Y}}$ – вектор, состоящий из отсчетов наблюдаемого сигнала \hat{y}_i . Выполняя далее преобразование $x_i = L_x(\hat{\Xi})$, находим оценку помехи в основном канале:

$$x_i^* = L_x(\hat{\Xi}), \quad (2+)$$

где $\hat{\Xi}$ – вектор оценок белого шума $\hat{\xi}_i$, полученных инверсным преобразованием сигнала дополнительного канала. При этом, конечно, оценка x_i^* не совпадает с точным значением помехи x_i из-за влияния шума наблюдения η_i в дополнительном канале. Применение инверсного преобразования, не являясь оптимальной процедурой борьбы с помехой, представляет, однако, интерес в силу своей простоты. Вместе с тем ее практическая целесообразность определяется степенью влияния шума наблюдения, которую можно оценить теоретически (что не представляет трудностей в силу линейности всех преобразований), либо экспериментально.

Более эффективным, но и затратным, является объединение каналов на основе оптимальной фильтрации. Существуют задачи, когда сбор данных и их обработка осуществляются в разное время и в разных условиях. Так, например, при электро-разведке полезных ископаемых обработку данных, накопленных в полевых условиях, часто выполняют в лаборатории. Это дает возможность использовать некаузальные алгоритмы, потенциальная эффективность которых, как известно, выше, чем каузальных. Поэтому для объединения каналов в рассматриваемой задаче можно использовать фильтр Винера, задачей которого является получение наилучшей оценки сигнала x_i на основе наблюдаемой последовательности \hat{y}_i , в которой обрабатываемый продукт y_i искажен шумом наблюдения η_i .

Рассмотрим далее случай, когда формирователи помех в схеме рис. 1 описываются моделями линейного предсказания:

$$x_i = \sum_{j=1}^J a_j x_{i-j} + a_0 \xi_i = \mathbf{A}^T \mathbf{X}_i + a_0 \xi_i, \quad (3)$$

$$y_i = \sum_{k=1}^K b_k Y_{i-k} + b_0 \xi_i = \mathbf{B}^T \mathbf{Y}_i + b_0 \xi_i. \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{A} = \|a_1, a_2, \dots, a_J\|^T$, $\mathbf{B} = \|b_1, b_2, \dots, b_K\|^T$ – векторы коэффициентов предсказания; $\mathbf{X}_i = \|x_{i-1}, x_{i-2}, \dots, x_{i-J}\|^T$, $\mathbf{Y}_i = \|y_{i-1}, y_{i-2}, \dots, y_{i-K}\|^T$ – соответственно J - и K -мерные векторы-предшественники сигналов x_i и y_i , участвующие в процедурах предсказания; a_0 и b_0 – коэффициенты чувствительности к входному формирующему белому шуму. Очевидно, с учетом (4) обратное преобразование (1) имеет в этом случае вид

$$\xi_i = (y_i - \mathbf{B}^T \mathbf{Y}_i) / b_0 \quad (5)$$

и при отсутствии шума наблюдения точно определяет значение входного шума. При использовании вместо неизвестного сигнала \mathbf{Y}_i доступного сигнала $\hat{\mathbf{Y}}_i$ из (2) находим оценку белого шума:

$$\hat{\xi}_i = (\hat{y}_i - \mathbf{B}^T \hat{\mathbf{Y}}_i) / b_0$$

и далее, при помощи (2+) и (3), оценку помехи в основном канале:

$$x_i^* = \mathbf{A}^T \mathbf{X}_i^* + a_0 \hat{\xi}_i.$$

При использовании фильтра Винера формирование оценки x_i^* удобно проводить в частотной области, определяя ее при помощи обращения спектра $X^*(\omega)$:

$$X^*(\omega) = \hat{Y}(\omega) \cdot K_B(\omega).$$

Здесь $\hat{Y}(\omega)$ – спектр сигнала y_i , а $K_B(\omega) = \frac{\tilde{H}^*(\omega)}{|\tilde{H}(\omega)|^2 + \frac{\tilde{G}_\eta(\omega)}{\tilde{G}_y(\omega)}}$ – коэффициент пе-

редачи фильтра Винера, где $\tilde{G}_\eta(\omega)$, $\tilde{G}_y(\omega)$ – спектральные плотности мощности периодически продолженных шума и исходного сигнала; $()^*$ – символ комплексного сопряжения; $\tilde{H}(\omega)$ – частотная характеристика искажающей системы.

Частотная характеристика искажающей системы представляет собой

$$\tilde{H}(\omega) = H_{\text{обр.доп}}(\omega) H_{\text{осн}}(\omega) = \frac{H_{\text{осн}}(\omega)}{H_{\text{доп}}(\omega)},$$

где $H_{\text{осн}}(\omega)$, $H_{\text{доп}}(\omega)$ – передаточные характеристики формирующих фильтров основного и дополнительного каналов.

Системная функция фильтра, формирующего процесс из белого шума:

$$H_{\text{осн}}(z) = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^J A_j z^{-j}},$$

$$H_{\text{доп}}(z) = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^K B_k z^{-k}},$$

где A и B – коэффициенты линейного предсказания Юла–Уолкера для основного и дополнительного каналов соответственно, z^{-j} , z^{-k} – z -преобразование.

$$H_{\text{осн}}(z) = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^J A_j e^{-j2\pi \frac{ij}{N}}},$$

$$H_{\text{доп}}(z) = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^K B_k e^{-j2\pi \frac{ik}{N}}},$$

где N – длина сигнала (в отсчетах); j, k – номер порядка предсказания.

2. Результаты экспериментов

Анализ эффективности описанных методов комплексирования выполнялся при помощи моделирования. За основу были взяты записи двух координатных сигналов электронного гироскопа, образцы которых приведены на рис. 2. Один из сигналов (рис. 2, а) рассматривался как прообраз сигнала основного канала измерительной системы, второй (рис. 2б) – дополнительного. По реальным сигналам на основе метода Юла–Уолкера 8-го порядка находились оценки параметров предсказания $\mathbf{A} = \|a_1, a_2, \dots, a_J\|^T$, $\mathbf{B} = \|b_1, b_2, \dots, b_K\|^T$, которые далее использовались для моделирования сигналов и совместной обработки.

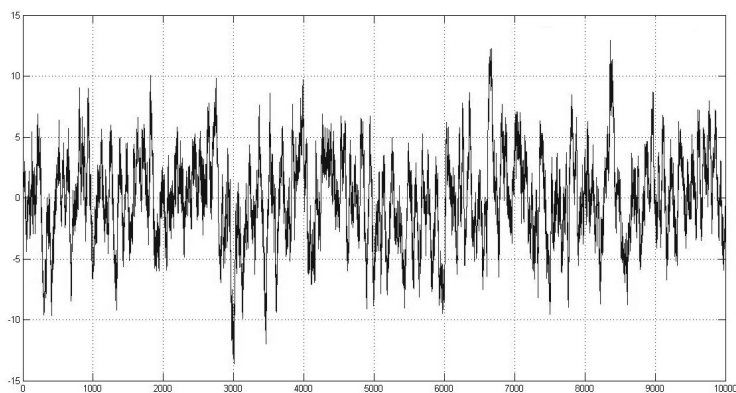


Рис. 2а – Прообраз сигнала основного канала

Fig. 2a – A preimage of a main channel signal

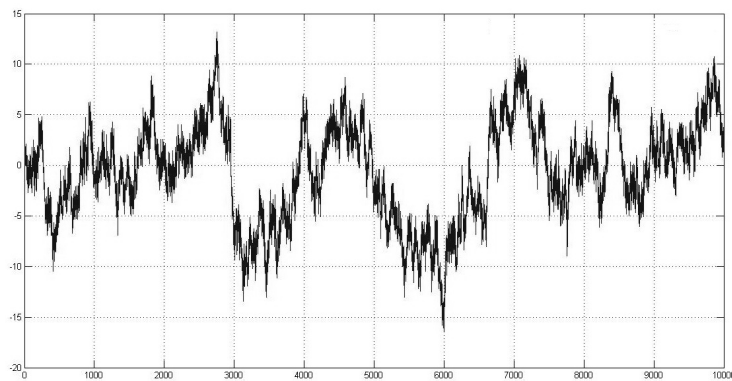


Рис. 2б – Прообраз сигнала дополнительного канала

Fig. 2b – A preimage of an additional channel signal

На рис. 3 приведены фрагменты сигналов, полученных в эксперименте при относительном уровне шума в дополнительном канале $\overline{\eta^2/y^2} = 0,5$. Непрерывная кривая соответствует сигналу основного канала, штриховая – дополнительного канала, а штрихпунктирная отображает сигнал дополнительного канала после его приведения к виду основного канала при помощи фильтра Винера. Качественно видна высокая эффективность преобразования.

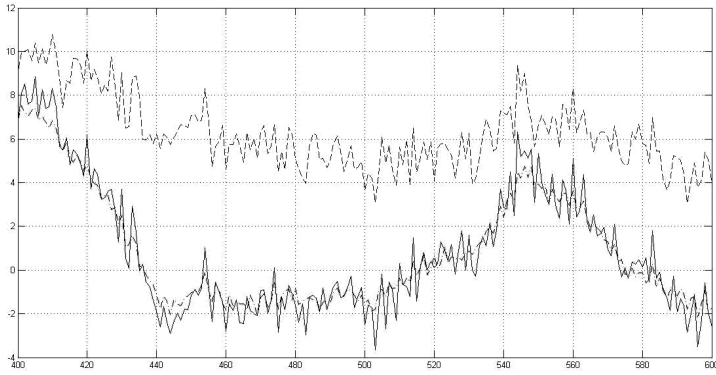


Рис. 3 – Фрагменты сигналов основного канала и дополнительного канала до и после его приведения к виду основного канала

Fig. 3 – Signal fragments of the main channel and the additional channel before and after bringing it to the main channel form

Основные результаты моделирования представлены на рис. 4 в виде зависимости относительной ошибки компенсации $\overline{\varepsilon_i^2/x_i^2} = \overline{(x_i - x_i^*)^2/x_i^2}$ от относительного уровня шума $\overline{\eta^2/y^2}$ в дополнительном канале, где черта сверху означает операцию математического ожидания. Кривая 1 соответствует инверсному фильтру, кривая 2 – фильтру Винера.

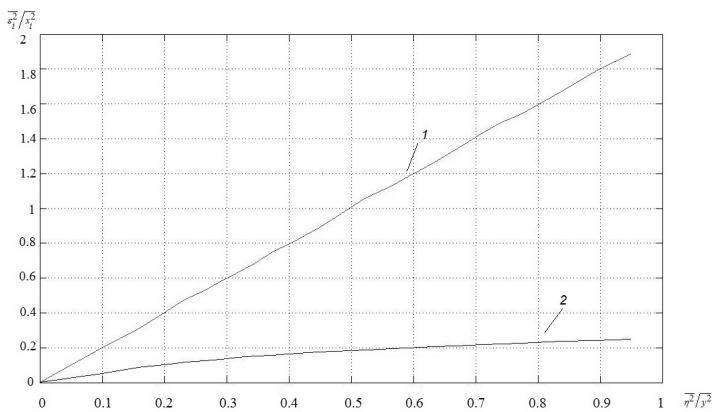


Рис. 4 – Зависимости среднего квадрата ошибки компенсации от уровня шума в дополнительном канале

Fig. 4 – Dependences of the compensation error mean square on the noise level in the additional channel

Заключение

При инверсном комплексировании уровень выходной ошибки растет пропорционально уровню шума наблюдения в дополнительном канале, что делает проблематичным применение данного метода даже при относительно небольших уровнях шума. Значительно ниже ошибки компенсации при использовании некаузального фильтра Винера, вследствие чего его применение в практических системах представляется перспективным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учебное пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перetyагин, А.А. Спектор. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
2. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: пер. с англ. Кн. 2. – М.: Мир, 1982. – 480 с.
3. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.

SENSOR INTEGRATION IN A MULTICHANNEL MEASUREMENT SYSTEM BASED ON INVERSE OR WIENER FILTERING

Petrova J.S., Spector A.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Multichannel structures using additional sensors are often used to attenuate the noise in information-measuring systems. The operation of sensors is based on different physical principles. This article discusses a dual-channel system with motion sensors based on inverse filtering and a dual-channel system based on the Wiener filter. One of the channels is the main channel, and the other is an additional channel. Measurement sensors in the main and the additional channels are based on different physical principles and this leads to the fact that the useful effect present in the main channel is not observed in the additional channel, and some types of noises in the main and the additional channel are correlated. Therefore, the use of additional sensors helps to estimate the noise in the additional channel without any useful effect observed in the main channel and to modify the signal of the additional channel to the form of the main channel signal. The subtraction of these two signals helps to attenuate the noise in the main channel. As a result, there are graphs of the dependence of the output error variance on the input noise variance for the system of inverse filtering and the Wiener filter system. The noise immunity of the system is applied to the case when a gyroscope is used as a motion sensor.

Keywords: multichannel structures, sensors, inverse filtering, Wiener filter, interference.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-102-109

REFERENCES

1. Gruzman I.S., Kirichuk V.S., Kosykh V.P., Peretyagin G.I., Spector A.A. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii v informatsionnykh sistemakh* [Digital image processing in information systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2002. 352 p.
2. Pratt W.K. *Digital image processing*. New York, John Wiley & Sons, 1978. 750 p. (Russ. ed.: Prett U. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii*. Кн. 2. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1982. 480 p.).
3. Marple S.L., jr. *Digital spectral analysis with application*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1987. 492 p. (Russ. ed.: Marpl-ml. S.L. *Tsifrovoi spektral'nyi analiz i ego prilozheniya*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1990. 584 p.).

4. Widrow B., Stearns S.D. *Adaptive signal processing*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1985. 474 p. (Russ. ed.: Uidrou B., Stirnz S. *Adaptivnaya obrabotka signalov*. Translated from English. Moscow, Radio i svyaz', Publ. 1989. 440 p.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Петрова Юлия Сергеевна – студентка 2 курса магистратуры кафедры теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: радиотехнические навигационные системы и устройства, радиотехнические системы зондирования, локации и навигации. Опубликовано 4 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: julia Petrova92@bk.ru).

Petrova Julia Sergeevna – 2nd year Master degree student at the department of theoretical basics of radio engineering in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on radio navigation systems and devices, radio sounding systems, and location and navigation. She is author of 4 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: julia Petrova92@bk.ru).



Спектор Александр Аншелевич – заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета, д-р техн. наук, профессор кафедры теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: локационные, навигационные и инфокоммуникационные технологии, цифровые статистические методы обработки сигналов и изображений. Опубликовано около 200 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: spectoraa@mail.ru).

Spector Alexander Anshelevich – Head of the department of theoretical basics of radio engineering in the Novosibirsk State Technical University, D.Sc.(Eng.), professor at the theoretical basics of radio engineering department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on location, navigation, and information communication technologies, digital statistical methods of signal and image processing. He is author of about 200 scientific papers (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: spectoraa@mail.ru).

*Статья поступила 13 мая 2015
Received November May 13, 2015*

To Reference:

Petrova Yu.S., Spector A.A. Kompleksirovanie datchikov v mnogokanal'noi izmeritel'noi sisteme na osnove inversnoi i Vinеровskoi fil'tratsii [Sensor integration in a multichannel measurement system based on inverse or Wiener filtering]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 102–109. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-102-109

УДК 621.391

МНОГОВЫБОРОЧНАЯ РАНГОВАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Р.В. Подрезов

Новосибирский государственный технический университет

В данной статье рассматривается задача сегментации изображений в условиях непараметрической априорной неопределенности относительно распределений яркостных классов. Отсчеты изображения предполагаются независимыми. В таких условиях применимы ранговые алгоритмы сегментации, но недостатком таких алгоритмов, оценивающих порог по одной рабочей выборке с фиксированным положением или подбором положения, является значительная чувствительность к взаимному расположению области класса и выборки. В отличие от существующих ранговых методов предлагаемый алгоритм использует критерий максимального правдоподобия, вычисляемого по нескольким выборкам. Также в статье изложен способ эффективного вычисления решающей статистики для предлагаемого метода и метода, использующего подбор положения выборки. Способ заключается в предварительном сопоставлении номера выборки каждому рангу и использовании номера выборки для вычисления приращения логарифмической функции правдоподобия. Работа алгоритма была проверена на моделях изображений с нормальными распределениями классов. Приведены зависимости вероятности ошибки по критерию Котельникова от дисперсии распределений классов, количества наблюдений классов в рабочих выборках и расположения пространственно сгруппированных наблюдений класса относительно выборок. Характеристики подтверждают возможность решения задач сегментации полутонных изображений устойчиво к изменению положения сгруппированных наблюдений.

Ключевые слова: сегментация изображений, максимальное правдоподобие, ранговая статистика.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-110-116

Введение

К настоящему времени получили широкое развитие методы, используемые в задачах распознавания объектов на изображениях. Решение подобных задач связано с обработкой большого количества информации системами, реализующими распознавание. Одним из возможных подходов к выделению полезной информации является сегментация изображения, осуществляемая обычно на начальном этапе.

Задачу сегментации изображения во многих случаях приходится решать при отсутствии априорной информации о распределениях яркостных классов. Существует большое разнообразие алгоритмов, эффективно работающих в этих условиях, например, метод окон Парзена–Розенблатта [1, 2] и метод k -ближайших соседей [3]. Также довольно эффективным является алгоритм ранговой сегментации, рассмотренный в [4].

Непараметрический метод сегментации, основанный на теории ранговых критериев и предложенный в [4], использует правдоподобие упорядоченного рангового вектора $\vec{R} = \{R^{(i)}\}_{i=1}^m$ рабочей выборки, взятой из изображения $Q = \{q_i\}_{i=1}^n$

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по государственному заданию № 2014/138, проект № 1176.

при условии возможности безошибочного порогового разделения классов по яркости:

$$P(\bar{R} | k, l) = \frac{1}{C_l^k C_{n-l}^{m-k}}. \quad (1)$$

Оценка рангового порога соответствует максимуму правдоподобия [4]:

$$\hat{k} = \arg \min_{k, R^{(k)}} C_{R^{(k)}+1}^k C_{n-R^{(k)}-1}^{m-k}, \quad (2)$$

$$\hat{l} = R^{(k)} + 1, \quad (3)$$

где k – количество наблюдений фона в рабочей выборке; l – количество наблюдений фона на изображении в целом (порог ранговой сегментации); $C_{R^{(k)}+1}^k$ – биномиальный коэффициент; $R^{(k)}$ – k -я порядковая статистика рангов рабочей выборки.

Точность оценивания порога l по одной выборке зависит от способа ее формирования. Такая оценка становится тем точнее, чем ближе реальный состав рабочей выборки к тому составу, в котором выборка включает в себя все точки только одного из классов.

Соответствующая модификация вышеуказанного метода была изложена в [5], где предлагается подбирать положение выборки, формируя несколько рабочих выборок $\bar{Z}_i, i = 1, t$, включающих наблюдения из несовпадающих областей изображения. В качестве оценки принимается решение, удовлетворяющее условию минимизации по всем выборкам отдельно:

$$\hat{k} = k, \min_t \min_k C_{R^{(k)}+1}^k C_{n-R^{(k)}-1}^{m-k}. \quad (4)$$

При этом ранговый порог вычисляется в соответствии с выражением (2).

В данной статье предлагается совместный критерий максимального правдоподобия, вычисляемый по нескольким выборкам.

Описание алгоритма. Пусть имеется изображение $Q = \{q_i\}_{i=1}^n$, состоящее из отсчетов принадлежащих одному из двух классов (класс 0 – Q_0 и класс 1 – Q_1) с неперекрывающимися плотностями распределений, удовлетворяющих условию

$$q_i < q_j, \forall q_i \in Q_0, \forall q_j \in Q_1, i \neq j.$$

Из изображения сформируем $t = n/m$ равных по объему выборок $Z_i = \{z_{ij}\}_{j=1}^m, i = \overline{1, t}$, для которых определены упорядоченные ранговые векторы $\bar{R}_i = \{R^{(j)}\}_{j=1}^m, i = \overline{1, t}$. При этом функция правдоподобия совокупности ранговых векторов будет представлять собой совместную вероятность упорядоченных ранговых векторов:

$$P(\{\bar{R}_i\}_{i=1}^t | \{k_i\}_{i=1}^t, l) = P(\bar{R}_1 | k_1, l) \cdot \prod_{j=2}^t P(\bar{R}_j | \{\bar{R}_i\}_{i=1}^{j-1}, \{k_i\}_{i=1}^j, l). \quad (5)$$

Выражение (5) с учетом (1) примет вид

$$P(\{\bar{R}_i\}_{i=1}^t | \{k_i\}_{i=1}^t, l) = \frac{1}{C_l^{k_1} C_{n-l}^{m-k_1}} \prod_{j=2}^t \frac{1}{C_{l-\sum_{i=1}^{j-1} k_i}^{k_j} C_{n-l-\sum_{i=1}^{j-1} (m-k_i)}^{m-k_j}}, \quad (6)$$

где $k_i = \sum_j \theta(l - R^{(j)})$ – количество наблюдений класса 0 в i -й выборке, $\theta(x) =$

$$= \begin{cases} 0, & \text{если } x < 0 \\ 1, & \text{если } x \geq 0 \end{cases}.$$

Путем сокращений выражение (6) можно привести к виду

$$P(\{\bar{R}_i\}_{i=1}^t | \{k_i\}_{i=1}^t, l) = \frac{1}{\binom{l}{\{k_i\}_{i=1}^t} \binom{n-l}{\{m-k_i\}_{i=1}^t}}, \quad (7)$$

где $\binom{l}{\{k_i\}_{i=1}^t} = \frac{l!}{k_1! \cdot k_2! \cdot \dots \cdot k_t!}$ – мультиномиальный коэффициент, равный числу упорядоченных разбиений l -элементного множества на t подмножеств мощностей k_i . Порог сегментации определяется с помощью выражения, соответствующего максимуму правдоподобия:

$$\hat{l} = \arg \max_l P(\{\bar{R}_i\}_{i=1}^t | \{k_i\}_{i=1}^t, l) = \arg \min_l (-\ln P(\{\bar{R}_i\}_{i=1}^t | \{k_i\}_{i=1}^t, l)). \quad (8)$$

Выражение (7) с учетом (8) можно записать как

$$\hat{l} = \arg \min_l \left(\ln \Gamma(l+1) - \sum_j \ln \Gamma(k_j+1) + \ln \Gamma(n-l+1) - \sum_j \ln \Gamma(m-k_j+1) \right), \quad (9)$$

где $\ln \Gamma(l+1)$ – логарифм гамма-функции Эйлера.

Заметим, что при простом поиске значения l от 0 до n , при увеличении его на единицу, увеличивается на единицу число наблюдений класса 0 k_i только в выборке, содержащей ранг $R=l$. Это свойство позволяет вычислять статистику (9) без построения вариационного ряда рангов рабочей выборки. Обозначим $L(l) = -\ln P(\{\bar{R}_i\}_{i=1}^t | \{k_i\}_{i=1}^t, l)$, определение порога l можно представить в виде рекуррентного уравнения:

$$L(l) = L(l-1) + \ln(l) - \ln(n-l+1) + \ln(m-k_i^*) - \ln(k_i^*), \quad (10)$$

$$L(0) = L(n) = \ln \Gamma(n+1) - t \ln \Gamma(m+1)$$

где k_i^* – число наблюдений класса 0 в выборке, содержащей ранг $R=l$.

Простой поиск порога можно применить и к методу, использующему подбор положения выборки (4). Так как в этом методе используется построение упорядоченных ранговых векторов, по выборкам перекрывающих все наблюдения, а оценка порога (3) основывается на ранге наблюдения, принадлежащего текущей выборке, то минимизацию по всем выборкам и по k можно заменить на минимизацию по l . Тогда выражения (3), (4) будут эквивалентны следующему выражению:

$$\hat{l} = \arg \min_l C_l^{k_i^*} C_{n-l}^{m-k_i^*}, \quad (11)$$

или с применением логарифмирования

$$\hat{l} = \arg \min_l \left(\ln \Gamma(l+1) - \ln \Gamma(k_i^* + 1) - \ln \Gamma(l - k_i^* + 1) + \right. \\ \left. + \ln \Gamma(n-l+1) - \ln \Gamma(m - k_i^* + 1) - \ln \Gamma(n-l-m + k_i^* + 1) \right). \quad (12)$$

Таким образом, для упрощенного вычисления порога сегментации в соответствии с формулами (10), (12) достаточно каждому отсчету изображения с соответствующим рангом поставить в соответствие номер выборки, в которой этот отсчет находится. Целесообразно данную информацию получать в процессе ранжирования.

Рабочие характеристики алгоритма. Как было упомянуто выше, качество оценивания зависит от взаимного расположения выборок и обнаруживаемого объекта, от чисел фактически входящих и не входящих в выборки наблюдений классов. Поэтому этот факт необходимо учитывать при построении рабочей характеристики алгоритма.

Все указанные рабочие характеристики (рис. 1) построены при моделировании изображением размера 320×240 пикселей ($n = 76800$) и размером выборки 64×48 пикселей ($m = 3072$). Обнаруживаемый на изображении объект имеет прямоугольную форму. Отсчеты объекта могут принимать значения, соответствующие распределению классов 0 либо 1. Распределения классов предполагаются нормальными.

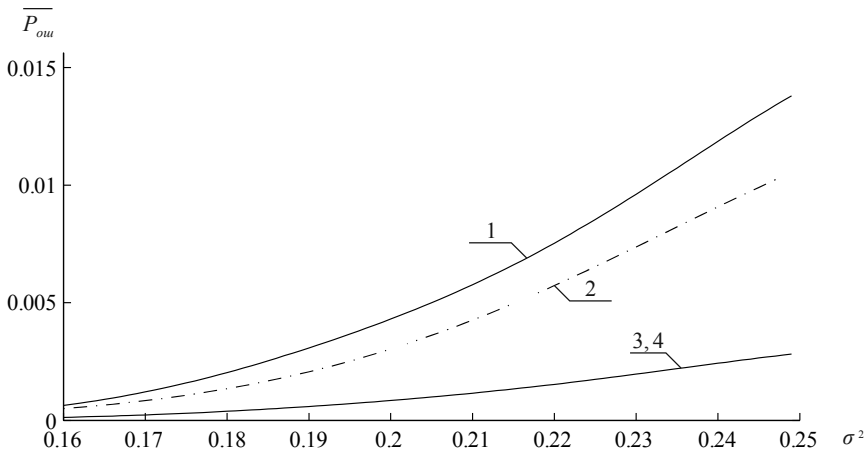


Рис. 1 – Зависимость ошибки (критерий Котельникова) от дисперсии распределений классов:

кривая 1 – область класса 0 размером 80×80 превышает размер выборки, применен метод подбора положения выборки; кривая 2 – то же, с применением совместного критерия; кривая 3 – область класса 0 размером 64×48 пикселей совпадает с выборкой; кривая 4 – то же, с применением совместного критерия

Fig. 1 – Graph of an error versus the class-distribution variance:

curve 1 – a class 0 area size of 80×80 exceeds the sample size, the sample location selection method is applied, curve 2 – the same situation with the use of the joint criterion, curve 3 – a class 0 area size of 64×48 coincides with the sample size, the sample location selection method is applied, curve 4 – the same situation with the use of the joint criterion

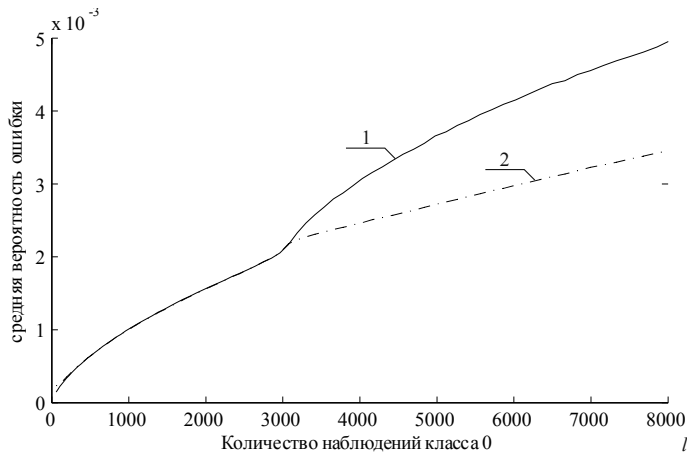


Рис. 2 – Зависимость ошибки от количества наблюдений класса 0 при дисперсии $\sigma^2 = 0,2$:

кривая 1 – метод подбора положения выборки; 2 – совместный критерий. Интервал $l > 3072$ соответствует выходу области класса 0 за границы выборки

Fig. 2 – Graph of an error versus the observation number of class 0 elements with the distribution variance $\sigma^2 = 0,2$:

curve 1 – the sample location selection method; curve 2 – the joint criterion. Interval $l > 3072$ corresponds to the class 0 area overrunning the sample bounds

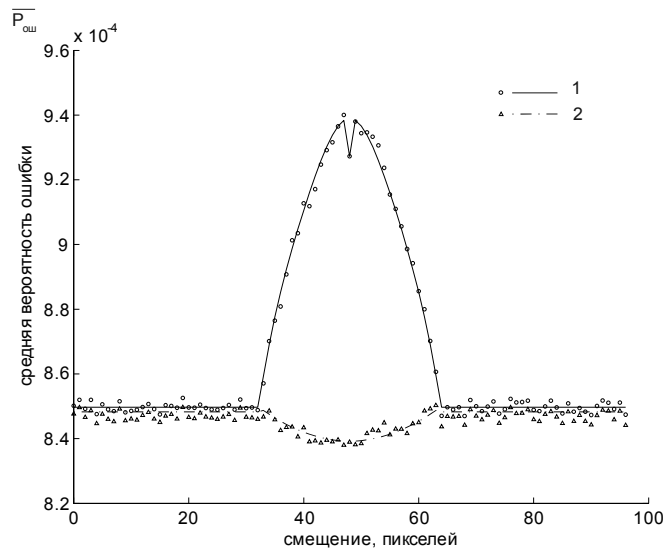


Рис. 3 – Зависимость ошибки от горизонтального смещения области класса 0 (размер области 32×24) при дисперсии $\sigma^2 = 0,2$:

кривая 1 – метод подбора положения выборки; кривая 2 – совместный критерий. Интервал $32 < x < 64$ соответствует выходу области класса 0 за границы выборки

Fig. 3 – Graph of an error versus the class 0 area horizontal offset (the area size is 32×24) with the distribution variance $\sigma^2 = 0,2$:

curve 1 – the sample location selection method; curve 2 – the joint criterion. Interval $32 < x < 64$ corresponds to class 0 area overrunning sample bounds

Выводы

1. Синтезированный многовыборочный алгоритм сегментации полутоновых изображений дает более устойчивые результаты при произвольном пространственном расположении рабочих выборок и обнаруживаемого объекта.

2. Предложен рекуррентный эффективный в вычислительном плане способ вычисления решающей статистики ранговых методов сегментации, не содержащий операцию построения вариационного ряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rosenblatt M.** Remarks on some nonparametric estimates of a density // *The Annals of Mathematical Statistics*. – 1956. – Vol. 27, N 3. – P. 832–837. – doi: 10.1214/aoms/1177728190.
2. **Parzen E.** On estimation of a probability density function and mode // *The Annals of Mathematical Statistics*. – 1962. – Vol. 33, N 3. – P. 1065–1076. – doi: 10.1214/aoms/1177704472.
3. **Cover T.M., Hart P.E.** Nearest neighbor pattern classification // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 1967. – Vol. 13, iss. 1. – P. 21–27. – doi: 10.1109/TIT.1967.1053964.
4. **Райфельд М.А.** Ранговое оценивание количества фоновых элементов на бинарных изображениях // *Радиотехника и электроника*. – 1996. – Т. 41, № 4. – С. 472–477.
5. **Райфельд М.А.** Непараметрические методы обнаружения и оценивания сигналов и изображений: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.17 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2009. – 367 с.

MULTISAMPLE RANK-BASED IMAGE SEGMENTATION

Podrezov R.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

This paper considers the image segmentation task in a prior uncertainty conditions. Image observations are assumed to be independent. The rank-based segmentation algorithms are appropriate under these conditions, but a drawback of estimating the threshold based on a single sample with a fixed position or on adjusting the sample position is high sensitivity to the position of the class area and the sample. In contrast to the existing rank methods the proposed method uses a maximum likelihood criterion which is calculated by multiple samples. An effective algorithm of calculating the decision statistics is proposed. The algorithm is to match each rank to the sample number and to use the sample number for evaluating the log-likelihood function increment. The algorithm was tested on image models with normally distributed classes. Performance characteristics are provided confirming a possibility to solve gray-level image segmentation tasks.

Keywords: image segmentation, maximum likelihood, rank statistic

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-110-116

REFERENCES

1. Rosenblatt M. Remarks on some nonparametric estimates of a density function. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1956, vol. 27, no. 3, pp. 832–837. doi: 10.1214/aoms/1177728190
2. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1962, vol. 33, no. 3, pp. 1065–1076. doi: 10.1214/aoms/1177704472
3. Cover T.M., Hart P.E. Nearest neighbor pattern classification. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1967, vol. 13, iss. 1, pp. 21–27. doi: 10.1109/TIT.1967.1053964
4. Raifel'd M.A. Rangovoe otsenivanie kolichestva fonovykh elementov na binarnykh izobrazheniyakh [Rank estimation of the background-pixel number in binary images]. *Radiotekhnika i elektronika – Journal of Communications Technology and Electronics*, 1996, vol. 41, no. 4, pp. 472–477. (In Russian)
5. Raifel'd M.A. *Neparametricheskie metody obnaruzheniya i otsenivaniya signalov i izobrazhenii*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Nonparametric detection and estimation methods of signal and images. Dr. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2009. 362 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Подрезов Роман Владимирович – родился в 1987 году, аспирант кафедры теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: статистические методы в цифровой обработке изображений. Опубликовано 4 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: podrezov-r.v@mail.ru).

Podrezov Roman Vladimirovich (b. 1987) – a postgraduate student at the Theoretical Fundamentals of Radio Engineering Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on statistical methods in digital image processing. He is author of 4 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: podrezov-r.v@mail.ru).

*Статья поступила 31 марта 2015 г.
Received March 31, 2015*

To Reference:

Podrezov R.V. Mnogovyborochnaya rangovaya segmentatsiya izobrazhenii [Multisample rank-based image segmentation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 110–116. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-110-116

УДК 519.242.5

УСТОЙЧИВОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА УСПЕВАЕМОСТИ**А.Ю. Тимофеева, Е.А. Хайленко***Новосибирский государственный технический университет*

Рассмотрена задача оценивания параметров полиномиальных структурных зависимостей. Разработаны модификации метода наименьших уравновешенных квадратов (LTS) на основе расстояний Кука, Велша–Куха, Махаланобиса и робастного расстояния для устойчивого оценивания такого рода зависимостей, с помощью вычислительных экспериментов показана работоспособность предложенных модификаций. Проведено исследование этих методов при различных условиях вычислительных экспериментов. Приведены результаты сравнения точности оценивания параметров структурного уравнения, полученных данными модификациями метода LTS, с результатами, полученными скорректированным методом наименьших квадратов (ALS) и разработанным авторами ранее методом LTS на основе метода ALS. Получено, что при появлении в выборке только горизонтальных либо только вертикальных выбросов для получения устойчивых оценок параметров полиномиальных структурных зависимостей целесообразно использовать метод LTS на основе метода ALS; при появлении в выборке как горизонтальных, так и вертикальных выбросов рекомендуемыми методами оценивания являются модификации метода LTS на основе расстояний Махаланобиса и робастного. Все модификации метода LTS применены для анализа успеваемости студентов Новосибирского государственного технического университета на примере факультета механизации и автоматизации и дисциплины «Информатика».

Ключевые слова: структурная зависимость, метод наименьших уравновешенных квадратов, метод скорректированных квадратов, расстояние Кука, расстояние Велша–Куха, расстояние Махаланобиса, робастное расстояние.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-117-127

Введение

В последнее время особое внимание начинает уделяться проблемам оценки качества образовательных услуг. Наряду с формальными показателями работы высших учебных заведений ключевой характеристикой здесь должна являться удовлетворенность основных потребителей – студентов. Одним из индикаторов, тесно связанным с удовлетворенностью, можно считать степень востребованности выпускников [1]. Однако такой индикатор отражает только конечный результат обучения и не позволяет судить об отношении к самому образовательному процессу, хотя именно это было бы наиболее ценной информацией для принятия управленческих решений руководством вуза о корректировке учебных планов, рабочих программ и других аспектов образовательной деятельности.

Некоторая обратная связь в ходе обучения все же присутствует, она выражается в основном эпизодическими жалобами неуспевающих студентов. Иногда проводятся анкетирования студентов на предмет их удовлетворенности обучением конкретным дисциплинам. Однако вся эта информация носит субъективный характер, и на ее основе сложно сделать какие-то выводы и рекомендации для

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-31171 мол_а.

© 2015 А.Ю. Тимофеева, Е.А. Хайленко

управления образовательным процессом. В целом, есть потребность в более объективном инструменте оценки и сопоставления преподаваемых дисциплин с точки зрения их сложности для студентов.

1. Методы статистического анализа успеваемости

Согласно классической теории тестирования [2], фактически наблюдаемая успешность x_i выполнения заданий i -м студентом складывается из некоторого истинного ненаблюдаемого уровня успеваемости X_i и случайной погрешности измерения δ_i . Относительно случайной ошибки предполагается равенство нулю математического ожидания, конечность дисперсии. Стандартным также является предположение об отсутствии корреляции ошибки δ_i с истинным значением X_i . Однако многие исследователи [3] не признают его обоснованность в силу того, что, например, успеваемость более сильных студентов может быть измерена более точно, если тест достаточно сложный. В то же время, в соответствии с учебной практикой, слабые студенты тоже достаточно четко выявляются, они обычно не успевают по многим дисциплинам. Следовательно, далее будет предполагаться существование зависимости между истинным уровнем успеваемости X_i и дисперсией ошибки $\sigma_{\delta_i}^2$ его измерения. При этом описывающая такую зависимость гладкая функция $\sigma_{\delta_i}^2(X_i)$ должна убывать в направлении как низких, так и высоких значений X_i , т. е. иметь максимум при среднем уровне успеваемости.

Успешность освоения Y_i отдельной дисциплины i -м студентом в общем случае является некоторой нелинейной функцией от его истинного уровня успеваемости. Степень нелинейности этой функции зависит от используемой преподавателем шкалы для перевода знаний и навыков студентов в оценки. Для иллюстрации и удобства интерпретации такую функцию берут обычно степенной [4]:

$$Y_i = X_i^a, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $X_i \in [0, 1]$, $a > 0$, n – число студентов. При $a = 1$ получаем линейную зависимость, и оценка прямо пропорциональна успеваемости студентов. В случае если $a < 1$, зависимости называются сублинейными, и дифференцирующая способность используемой преподавателем шкалы выше для слабых студентов. При $a > 1$ зависимости Y_i от X_i будут надлинейными, они повышают дифференцирующую способность шкалы для сильных студентов.

По результатам сессии истинный уровень успешности освоения Y_i отдельной дисциплины измеряется с некоторой погрешностью ε_i :

$$y_i = Y_i + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

Предположения относительно данной погрешности аналогичны введенным выше предположениям о случайной ошибке измерения уровня успеваемости.

Для представления нелинейной модели (1) предлагается использовать полиномиальную аппроксимацию:

$$y_i = \theta_1 + \theta_2(x_i - \delta_i) + \theta_3(x_i - \delta_i)^2 + \dots + \theta_m(x_i - \delta_i)^{m-1} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

В силу наличия ошибок в объясняющей переменной зависимость (2) носит название структурной [5]. Задача состоит в оценивании вектора неизвестных параметров θ .

В качестве y_i предлагается рассматривать оценки по отдельным сессиям. Всеобщее внедрение 100-балльной шкалы оценок и балльно-рейтинговой системы позволяет более четко дифференцировать уровень освоения предметов по сравнению со стандартными оценками от «неудовлетворительно» до «отлично». Однако возникает проблема определения индикатора x_i истинного уровня успеваемости студентов для сопоставления его с результатами сессии по каждой дисциплине. В качестве такого индикатора предлагается использовать суммарный (средний) балл за сессию.

Согласно рассмотренной постановке использование такого индикатора в моделях вида (2) сопряжено с проблемой наличия погрешностей в уровне успеваемости. Для анализа такого рода структурных зависимостей применяют специальные методы и алгоритмы, активно развиваемые авторами [6]. В данной работе предлагается ряд модификаций методов, направленных на повышение устойчивости результатов к наличию грубых ошибок измерения.

2. Модификации метода LTS для оценивания структурных зависимостей

Для поиска оценок параметров полиномиальных зависимостей вида (2) в [7] предлагается скорректированный метод наименьших квадратов (ALS) [7], который основан на использовании момента r -порядка величины X . В i -й точке наблюдений его значение t_i^r можно представить в виде

$$t_i^r = E(x_i - \delta_i)^r.$$

Суть данного метода состоит в следующем:

- вычисляются оценки t^r исходя из рекуррентного соотношения

$$\hat{t}_i^{r+1} = x_i \hat{t}_i^r - r \sigma_\delta^2 \hat{t}_i^{r-1}, \quad \hat{t}_i^{-1} = \hat{t}_i^0 = 1;$$

- оценивается вектор

$$\hat{R}_j = \sum_{i=1}^n \hat{t}_i^j y_i, \quad j = \overline{1, m};$$

- находится оценка матрицы

$$\hat{P}_{rs} = \sum_{i=1}^n \hat{t}_i^{r+s}, \quad r, s = \overline{1, m};$$

- вычисляется вектор неизвестных параметров

$$\hat{\theta}_{ALS} = \hat{P}^{-1} \hat{R}.$$

Как известно [6, 7], данный метод не является устойчивым к появлению грубых ошибок наблюдений (выбросов), поэтому в данной работе предлагается использовать робастный метод LTS, который основан на многократном построении оценочных подмножеств размерности h , $h \in \left[\frac{n+m+1}{2}; n \right]$ и получении оценок методом наименьших квадратов параметров регрессионных моделей по наблюде-

ниям из этих подмножеств [8]. В [9] разработаны и исследованы алгоритмы модификаций метода на основе расстояний Кука, Велша–Куха, Махаланобиса и робастного расстояния [10,11] для оценивания параметров регрессионных моделей. Использование этих расстояний при формировании оценочных подмножеств позволяет учитывать точность и разброс наблюдений, что дает возможность повысить качество оценивания в ряде случаев.

Однако метод LTS и его модификации не учитывают погрешности во входных факторах, поэтому в данной работе предлагается расширить рассмотренные методы для применения их в оценивании параметров полиномиальных структурных зависимостей. Для этого на каждой итерации метода LTS и его модификаций используется метод ALS для нахождения начального приближения и оценивания параметров по оценочным подмножествам.

3. Модельный пример

Для проверки работоспособности предложенных модификаций метода LTS для устойчивого оценивания был проведен ряд вычислительных экспериментов. В качестве исследуемой использовалась следующая модель:

$$\eta = -\xi^2 + 2\xi, \quad (3)$$

где ξ подчиняется стандартному бета-распределению с параметрами $\alpha_\xi = 3$, $\beta_\xi = 3$. Таким образом, моделировалась сублинейная зависимость результатов освоения дисциплины от уровня успеваемости, позволяющая в большей мере дифференцировать более слабых студентов.

Наблюдаемые значения объясняющей переменной моделировались как независимые случайные величины x_i , $i = \overline{1,500}$, подчиненные бета-распределению с параметрами, определяемыми реализациями X_i случайной величины ξ , и заданным уровнем дисперсии $\sigma_{x_i}^2$.

$$\sigma_{x_i}^2 = 0,05\delta_i,$$

где δ_i принимает значения 1, 5 с вероятностями $(1 - \mu_x)$ и μ_x (μ_x – доля выбросов в объясняющих переменных),

$$\alpha_{x_i} = X_i \left(\frac{1}{\sigma_{x_i}^2} - 1 \right), \quad \beta_{x_i} = \frac{1 - X_i}{X_i} a_{x_i}.$$

Параметры подобраны так, чтобы $E(x_i) = X_i$, $D(x_i) = 0,05 \cdot X_i(1 - X_i)\delta_i$. Следовательно, наибольший уровень погрешности достигается при $X_i = 0,5$, а наименьший при крайних значениях истинного уровня успеваемости.

Наблюдаемые значения отклика моделировались как независимые случайные величины y_i , $i = \overline{1,500}$, подчиненные бета-распределению с параметрами, определяемыми реализациями Y_i случайной величины η , и заданным уровнем дисперсии $\sigma_{y_i}^2$.

$$\sigma_{y_i}^2 = 0,05\varepsilon_i,$$

где ε_i принимает значения 1, 5 с вероятностями $(1-\mu_y)$ и μ_y (μ_y – доля выбросов в отклике),

$$\alpha_{y_i} = Y_i \left(\frac{1}{\sigma_{y_i}^2} - 1 \right), \quad \beta_{y_i} = \frac{1-Y_i}{Y_i} a_{y_i}.$$

Параметры подобраны так, чтобы $E(y_i) = Y_i$, $D(y_i) = 0,05Y_i(1-Y_i)$.

В качестве показателя точности оценивания параметров структурных зависимостей был взят показатель *MAD* (Mean Absolute Derivation – среднее абсолютное отклонение), который вычисляется по формуле [12]:

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|,$$

где n – количество наблюдений, в данном случае $n = 500$; \hat{y} – оцененный вектор отклика.

Проводилось по 100 вычислительных экспериментов, каждый из которых заключался в моделировании выборки исходных данных, а также ошибок в объясняющих наблюдениях и в отклике, с последующим оцениванием параметров модели (3) с использованием модификаций метода LTS для оценивания структурных зависимостей. В качестве итоговых показателей точности оценивания *MAD* использовалось усредненное значение.

4. Результаты вычислительных экспериментов

Для удобства представления результатов вычислительных экспериментов введем обозначения используемых модификаций метода LTS для оценки структурных зависимостей: LTS с использованием метода ALS – ALTS; на основе расстояния Кука – ALTS_CD; на основе расстояния Велша–Кука – ALTS_WKD, на основе расстояния Махаланобиса – ALTS_MD, на основе робастного расстояния – ALTS_RD.

Рассмотрим случай появления в выборке только вертикальных выбросов, т. е. доля выбросов в объясняющих переменных $\mu_x = 0$, доля выбросов в отклике μ_y варьировалась от 0 до 0,2. На рис. 1 представлены результаты вычислительных экспериментов.

Из рис. 1 видно, что наименее точные результаты оценивания показал метод ALS, что объясняется неустойчивостью метода к появлению в выборке грубых ошибок наблюдений. Также недостаточно точные результаты дал метод LTS для оценивания параметров структурных зависимостей на основе расстояния Кука. Причиной этого может являться способ вычисления расстояния Кука [11], поскольку при появлении ошибок в объясняющих переменных наблюдения, отстоящие от основной массы, но не являющиеся выбросом, могут не учитываться в процессе формирования оценочного подмножества. Наиболее точные результаты показали методы ALTS и модификации метода LTS на основе расстояний Махаланобиса и робастного. Такое поведение этих модификаций объясняется особенностью алгоритма формирования оценочного подмножества, где в него добавляются наблюдения с учетом их удаленности от основной массы и величины остатков.

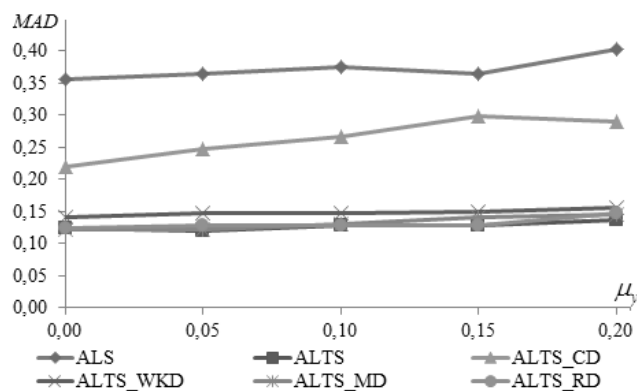


Рис. 1 – Зависимость точности оценивания от доли выбросов μ_y

Fig. 1 – Relation between estimation accuracy and proportion of outliers μ_y

Теперь рассмотрим случай появления только горизонтальных выбросов, т. е. $\mu_y = 0$, а доля выбросов в объясняющих переменных варьировалась от 0 до 0,1. В табл. 1 представлены результаты оценивания.

Таблица 1 / Table 1

Точность оценивания параметров структурных зависимостей при наличии горизонтальных выбросов
The estimation accuracy of structural model parameters, when horizontal outliers exist

μ_x	Параметры	Метод					
		ALS	ALTS	ALTS_CD	ALTS_WKD	ALTS_MD	ALTS_RD
0,00	$\hat{\theta}_1$	0,903	-0,077	0,379	-0,044	-0,035	0,039
	$\hat{\theta}_2$	0,055	2,406	1,126	2,478	2,229	1,992
	$\hat{\theta}_3$	-1,04	-1,375	-0,853	-1,740	-1,225	-1,047
	MAD	0,355	0,124	0,219	0,141	0,122	0,125
0,05	$\hat{\theta}_1$	0,825	-0,011	0,719	0,081	-0,029	0,028
	$\hat{\theta}_2$	0,301	2,183	0,061	1,975	2,278	2,051
	$\hat{\theta}_3$	-1,24	-1,182	-0,263	-1,246	-1,340	-1,129
	MAD	0,343	0,129	0,289	0,149	0,133	0,127
0,10	$\hat{\theta}_1$	0,713	-0,022	0,718	0,079	0,048	0,037
	$\hat{\theta}_2$	0,668	2,275	0,122	1,968	1,988	2,075
	$\hat{\theta}_3$	-1,57	-1,334	-0,365	-1,199	-1,071	-1,195
	MAD	0,340	0,130	0,292	0,162	0,139	0,135

Из табл. 1 видно, что при появлении горизонтальных выбросов методы ALS и LTS на основе расстояния Кука так же, как и в предыдущем случае, показали наименее точные результаты по сравнению с другими рассматриваемыми разновидностями метода LTS. Наиболее точные результаты оценивания показали методы LTS на основе расстояний Махаланобиса и робастного, а также метод ALTS.

Поскольку при появлении как только горизонтальных, так и только вертикальных выбросов методы ALS и модификация метода LTS для оценки структурных зависимостей на основе расстояния Кука показали наименее точные результаты оценивания, то в дальнейших исследованиях будем рассматривать только методы ALTS и модификации метода LTS на основе расстояний Велша–Куха, Махаланобиса и робастного.

Рассмотрим случай появления в выборке и горизонтальных, и вертикальных выбросов. На рис. 2, *а*, *б* представлены результаты оценивания, по которым видно, что при доле выбросов 5 % ($\mu_x = 0,05$) методы ALTS и LTS на основе расстояний Махаланобиса и робастного показали близкие результаты оценивания, однако первый немного превосходит по точности. При увеличении доли горизонтальных выбросов до 10 % ($\mu_x = 0,1$) оценки, получаемые модификациями метода LTS на основе расстояний Махаланобиса и робастного, являются более точными.

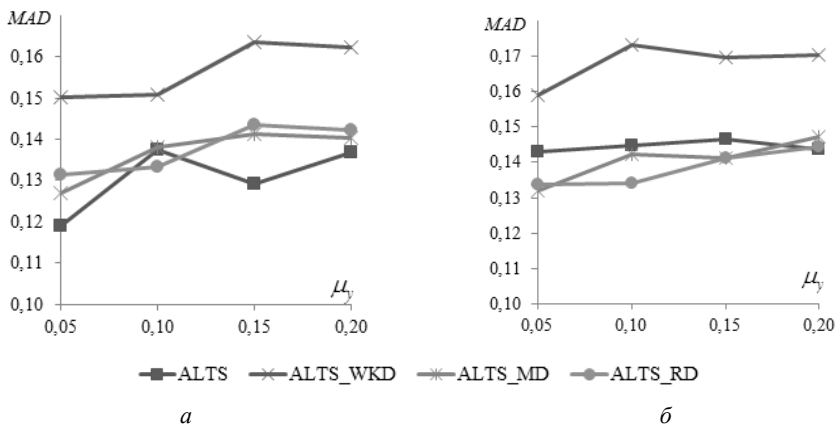


Рис. 2 – Зависимость точности оценивания от доли выбросов μ_y :

$a - \mu_x = 0,05$; $b - \mu_x = 0,1$

Fig. 2 – Relation between estimation accuracy and proportion of outliers μ_y :

$a - \mu_x = 0,05$; $b - \mu_x = 0,1$

По результатам проведенных исследований можно дать следующие рекомендации: при наличии в выборке только горизонтальных либо только вертикальных выбросов для устойчивого оценивания параметров структурных зависимостей лучше использовать метод ALTS; при наличии в выборке как вертикальных, так и горизонтальных выбросов – модификации метода LTS на основе расстояний Махаланобиса и робастного.

5. Практическое приложение

Для демонстрации применимости предложенных методов для практического анализа образовательного процесса проведено исследование успеваемости студентов Новосибирского государственного технического университета.

В качестве примера взят один из факультетов (механизации и автоматизации) и дисциплина «Информатика». Объясняющей переменной выступал средний балл студента в первую сессию. Рассматривались студенты 2011, 2012 и 2013 годов поступления. Масштаб переменных приведен к отрезку $[0,1]$. Результаты оценивания квадратичной зависимости представлены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Результаты оценивания квадратичной модели студенческой успеваемости
The estimation results of the quadratic model of student achievement

Год поступления	Метод	$\hat{\theta}_1$	$\hat{\theta}_2$	$\hat{\theta}_3$	MAD
2011	ALTS	-0,026	1,372	-0,308	0,119
	ALTS_CD	-0,325	2,531	-1,343	0,126
	ALTS_WKD	-0,506	2,377	-0,819	0,133
	ALTS_MD	-0,025	1,369	-0,306	0,119
	ALTS_RD	-0,140	1,727	-0,570	0,119
2012	ALTS	-0,953	3,790	-1,853	0,114
	ALTS_CD	-0,987	3,910	-2,017	0,112
	ALTS_WKD	-0,823	3,232	-1,378	0,114
	ALTS_MD	-0,931	3,645	-1,716	0,114
	ALTS_RD	-0,805	3,396	-1,599	0,112
2013	ALTS	-0,808	3,156	-1,238	0,109
	ALTS_CD	-1,650	5,327	-2,695	0,112
	ALTS_WKD	-2,163	7,042	-4,034	0,118
	ALTS_MD	-0,661	3,069	-1,420	0,100
	ALTS_RD	-1,528	5,268	-2,813	0,105

Для удобства интерпретации различий в освоении дисциплины по годам графически представлены расчетные кривые, полученные с помощью модификации на основе расстояний Махаланобиса (рис. 3).

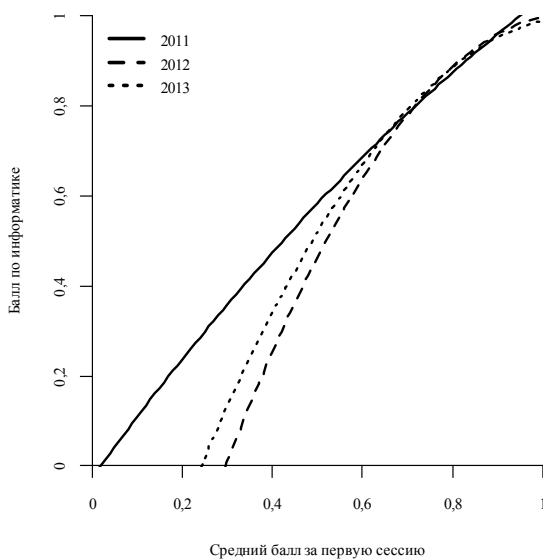


Рис. 3. Расчетные значения успешности освоения информатики в зависимости от средней успеваемости
Fig. 3 – The calculated values of the successful development of computer science depending on the average of students progress

Из рис. 3 видно, что поток студентов, поступивших в 2011 году, в целом более существенно отличается от других рассмотренных потоков. Зависимость успешности освоения дисциплины от средней успеваемости очень близка к линейной. Это свидетельствует о том, что в ходе аттестации установлена шкала оценок, прямо пропорциональная истинному уровню успеваемости студентов. Иначе обстоит дело со студентами более поздних лет поступления. Зависимости здесь носят явный сублинейный характер, поэтому по итогам сессии по дисциплине «Информатика» удастся больше дифференцировать более слабых студентов, чем более сильных. Возможно, это связано с падением общего уровня знаний поступающих в вузы в последние годы. В результате преподаватели вынуждены пересматривать систему оценивания с тем, чтобы дифференцировать слабых студентов в ущерб более сильным.

Заключение

В статье рассмотрена задача оценивания параметров полиномиальных структурных зависимостей. Предложены и исследованы устойчивые модификации метода LTS для оценки такого рода зависимостей на основе расстояний Кука, Велша–Куха, Махаланобиса и робастного расстояния. С помощью вычислительных экспериментов подтверждена работоспособность предложенных методов. На основе полученных результатов исследований даны рекомендации о применении модификаций метода LTS. Проведено исследование успеваемости студентов Новосибирского государственного технического университета на примере факультета механизации и автоматизации и дисциплины «Информатика».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Борисова А.А., Тимофеева А.Ю.** Выпускники вузов на рынке труда: индикаторы мониторинга и ограничители профильной занятости // Университетское управление: практика и анализ. – 2014. – № 1 (89). – С. 71–80.
2. **Crocker L., Algina J.** Introduction to classical and modern test theory. – New York: Harcourt Brace Jovanovich College Publishers, 1986. – 527 p.
3. **Hambleton R.K., Jones R.W.** An NCME instructional module on comparison of classical test theory and item response theory and their applications to test development // Educational Measurement: Issues and Practice. – 1993. – Vol. 12, iss. 3. – P. 38–47. – doi: 10.1111/j.1745-3992.1993.tb00543.x.
4. **Ким В.С.** Тестирование учебных достижений: монография. – Уссурийск: Изд-во УГПИ, 2007. – 214 с.
5. **Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.** Прикладная статистика. Исследование зависимостей. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 488 с.
6. Устойчивое оценивание нелинейных структурных зависимостей / В.И. Денисов, А.Ю. Тимофеева, Е.А. Хайленко, О.И. Бузмакова // Сибирский журнал промышленной математики. – 2013. – Т. 16, № 4 (56). – С. 47–60.
7. **Cheng C.-L., Schneeweiss H.** Polynomial regression with errors in the variables // Journal of the Royal Statistical Society: Series B. – 1998. – Vol. 60, iss. 1. – P. 189–199. – doi: 10.1111/1467-9868.00118.
8. **Rousseeuw P.J., Driessen K. van.** Computing LTS Regression for large data sets. Mimeo / University of Antwerpen, Department of Mathematics and Computer Science. – Antwerpen, Belgium, 1999. – 21 p.
9. **Хайленко Е.А.** Модификации метода LTS для устойчивого оценивания параметров регрессионных моделей // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – N 1 (63). – С. 75–82.
10. **Chatterjee S., Hadi A.S.** Influential observations, high leverage points, and outliers in linear regression // Statistical Science. – 1986. – Vol. 1, N 3. – P. 379–416. – doi: 10.1214/ss/1177013627.

11. Radhakrishna R.C., Toutenburg H. Linear models: least squares and alternatives. – 2nd ed. – New York: Springer-Verlag, 1999. – 428 p.
12. Робастность в статистике: подход на основе функций влияния / Ф. Хампель, Э. Ронchetti, П. Рауссеу, В. Штаэль. – М.: Мир, 1989. – 512 с.

ROBUST ESTIMATION OF STRUCTURAL MODEL PARAMETERS IN APPLICATION TO STUDENTS' PROGRESS ANALYSIS

Timofeeva A.Yu., Khailenko E.A.

Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russian Federation

The problem of estimation of structural model parameters is considered. Modifications of Least Trimmed Squares (LTS) method using Mahalanobis, robust, Cook and Welsch-Kuh distances have been proposed. The efficiency of the proposed modifications was showed using computing experiment. Results of these methods investigation in different conditions of computing experiments were conducted. Results of compare accuracy between these modifications of LTS method, the Adjusted Least Squares method (ALS) and modification of LTS method using ALS method, which was proposed by authors previously, were discussed. Recommendations to application proposed method are following: in case there are only vertical or only horizontal outliers in sample of data better to use modification of LTS method based on ALS method for estimating structural model parameters; when there are both types of outliers in sample – modification of LTS method based on Mahalanobis and robust distances. These modifications of LTS method were applied to problem of students' progress analysis.

Keywords: structural relation, the least trimmed squares method, the adjusted least squares method, Mahalanobis distance, robust distance, Cook distance, Welsch-Kuh distance.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-117-127

REFERENCES

1. Borisova A.A., Timofeeva A.Iu. Vypuskniki vuzov na rynke truda: indikatory monitoringa i ogranichiteli profil'noi zanyatosti [Graduates in the labor market: monitoring indicators and limiters of profiled employment]. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz – Journal University Management: Practice and Analysis*, 2014, no. 1 (89), pp. 71–80.
2. Crocker L., Algina J. *Introduction to classical and modern test theory*. New York, Harcourt Brace Jovanovich College Publishers, 1986. 527 p.
3. Hambleton R.K., Jones R.W. An NCME instructional module on comparison of classical test theory and item response theory and their applications to test development. *Educational Measurement: Issues and Practice*, 1993, vol. 12, iss. 3, pp. 38–47. doi: 10.1111/j.1745-3992.1993.tb00543.x
4. Kim V.S. *Testirovanie uchebnykh dostizhenii*. [Testing of educational achievements]. Ussuriisk, UGPI Publ., 2007. 214 p.
5. Aivazyan S.A., Yenyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika. Issledovanie zavisimostei* [Applied statistics: study of relationships]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1985. 488 p.
6. Denisov V.I., Timofeeva A.Yu., Khailenko E.A., Buzmakova O.I. Ustoichivoe otsenivanie nelineinykh strukturnykh zavisimostei [Robust estimation of nonlinear structural models]. *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki – Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2014, vol. 8, iss. 1, pp. 28–39. doi: 10.1134/S1990478914010049. Translated from *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki*, 2013, vol. 16, no. 4 (56), pp. 47–60.
7. Cheng C.-L., Schneeweiss H. Polynomial regression with errors in the variables. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 1998, vol. 60, iss. 1, pp. 189–199. doi: 10.1111/1467-9868.00118
8. Rousseeuw P.J., Driessen K. van. *Computing LTS regression for large data sets*. Mimeo. Antwerpen, Belgium, University of Antwerpen, Department of Mathematics and Computer Science, 1999. 21 p.

9. Hailenko E.A. Modifikatsii metoda LTS dlya ustoichivogo otsenivaniya parametrov regressionnykh modelei [Modifications of method LTS for robust estimation parameters of regression models]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 1 (63), pp. 75–82.
10. Chatterjee S., Hadi A.S. Influential observations, high leverage points, and outliers in linear regression. *Statistical Science*, 1986, vol. 1, no. 3, pp. 379–416. doi: 10.1214/ss/1177013627
11. Radhakrishna R.C., Toutenburg H. *Linear models: least squares and alternatives*. 2nd ed. New York, Springer-Verlag, 1999. 428 p.
12. Hampel F.R., Ronchetti E.M., Rousseeuw P.J., Stahel W.A. *Robust statistics. Approach based on the influence function*. New York, John Wiley and Sons, 1986. XXI. 502 p. (Russ. ed.: Khampel' F., Ronchetti E., Rausseu P., Shtael' V. *Robastnost' v statistike: podkhod na osnove funktsii vliyaniya*. Moscow, Mir Publ., 1989. 512 p.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Тимофеева Анастасия Юрьевна – родилась в 1984 году, канд. экон. наук, доцент, кафедра экономической информатики, НГТУ. Область научных интересов: развитие методов статистического анализа объектов стохастической природы, в том числе социально-экономических явлений. Опубликовано 35 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20. Email: a.timofeeva@corp.nstu.ru).

Timofeeva Anastasia Yurievna (b. 1984) – Candidate of Science (PhD) in Economics, associate professor of Computer Science in Economics Department of the Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on the development of methods for the statistical analysis of stochastic objects, including socioeconomic phenomena. She is author of 35 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: a.timofeeva@corp.nstu.ru).



Хайленко Екатерина Алексеевна – родилась в 1985 году, канд. техн. наук, научный сотрудник, кафедра теоретической и прикладной информатики, НГТУ. Область научных интересов: разработка и исследование алгоритмов устойчивого и адаптивного оценивания параметров регрессионных зависимостей и планирование эксперимента. Опубликовано 18 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20. Email: xajlenko@corp.nstu.ru).

Khailenko Ekaterina Alekseevna (b. 1985) – Candidate of Technical Sciences, research associate, Department of Theoretical and Applied Informatics, NSTU. Her research interests are currently focused on developing and investigating algorithms of robust and adaptive estimation parameters of regression models and design of experiment. He is author of 18 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: xajlenko@corp.nstu.ru).

Статья поступила 5 марта 2015 г.

Received March 5, 2015

To Reference:

Timofeeva A.Yu., Khailenko E.A. Ustoichivoe otsenivanie parametrov strukturnykh zavisimostei v zadache analiza uspevaemosti [Robust estimation of structural model parameters in application to students' progress analysis]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 117–127. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-117-127

УДК 621.391

ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОСТЕЙ ИМПУЛЬСОВ В СЕЙСМИЧЕСКОМ СИГНАЛЕ ОТ ШАГОВ ЧЕЛОВЕКА

С.Г. Филатова

Новосибирский государственный технический университет

Сейсмические системы охраны протяженных периметров функционируют, как правило, в нестационарных и неоднородных условиях. Параметры сейсмических сигналов, возбуждаемых человеком при движении по поверхности грунта, изменяются в зависимости от типа грунта, а также от сезонных природно-климатических факторов. Поэтому одной из важных задач при разработке таких систем является реализация процедур автоматической настройки алгоритмов обработки сигналов при изменении внешних условий. Реализация автоматической или полуавтоматической настройки позволит ускорить процесс развертывания системы на новых объектах, а также повысить надежность уже существующих систем. Одним из параметров сейсмического сигнала, которые зависят от свойств среды, является длительность импульса. В статье предложен алгоритм статистической оценки длительностей импульсов, основанный на анализе функций максимального правдоподобия. Его реализация позволит осуществлять обработку сигналов в режиме реального времени. Алгоритм исследован методом статистического моделирования, полученные результаты позволяют говорить о достаточно высокой точности его работы. Кроме того, проведены исследования, моделирующие работу алгоритма в условиях априорной неопределенности, даны рекомендации по выбору входных параметров алгоритма.

Ключевые слова: сейсмические системы охраны, длительность импульса, статистическая оценка

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-128-136

Введение

В условиях повышения сложности и опасности современных производств, роста международной напряженности и учащения проявлений терроризма актуальной задачей остается внедрение надежных систем предотвращения несанкционированного доступа на территории предприятий, складов, частных владений и объектов государственного значения. К таким системам относятся системы охраны, основанные на сейсмическом принципе действия. Чувствительные датчики сейсмических систем охраны (ССО) устанавливаются скрытно в грунте, что уменьшает возможность блокирования системы. Такие системы обладают высокой чувствительностью и способны обнаружить и распознать сигнал как от крупных объектов (автомобиль, самолет), так и от мелких (собака, кошка) [1–5].

Одной из сложностей, с которой сталкиваются разработчики ССО, является существенная неоднородность грунта, связанная с протяженностью сейсмической антенны, в которую объединены датчики. В зависимости от проводящих свойств грунта датчики устанавливаются на расстоянии 8–15 м друг от друга, таким образом, расстояние между датчиками в антенне может варьироваться от 8 до 300 м. Очевидно, что внешние условия для разнесенных на большое расстояние датчиков могут быть различными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по государственному заданию № 2014/138, проект № 1176.

Кроме того, свойства грунта зависят от природно-климатических факторов, а точность системы существенно зависит от того, в каких условиях функционируют датчики. В настоящее время эта проблема решается путем экспертной подстройки параметров алгоритмов. Проводится тестирование системы и, в зависимости от результатов работы системы в режиме испытания, экспертом вводятся параметры. Аналогичные процедуры осуществляются при настройке системы при установке ее на новом объекте.

Однако, поскольку сейсмические сигналы обладают высокой информативностью, существует возможность автоматической оценки определенных параметров и настройки алгоритмов. Каждый шаг человека вызывает импульсные колебания поверхности грунта и сейсмические волны, достигающие сейсмического датчика по многим путям в поверхностных слоях грунта. Соответствующие сигналы на выходе датчика имеют характер импульсов со случайными амплитудой и фазой, имеющих примерно одинаковую длительность. Частота их появления зависит от скорости движения. Амплитуда импульсов изменяется в зависимости от расстояния до датчика и определяется силой удара.

Длительность импульса τ_n является важным параметром для алгоритмов системы сейсмической охраны. При этом длительность импульса определяется свойствами грунта, которые сильно зависят от природно-климатических и сезонных факторов. Например, средняя длительность импульса в сейсмическом сигнале, записанном зимой, составляет приблизительно 50 отсч.* (рис. 1, а), а средняя длительность в сигнале, записанном летом, составляет 20 отсч. (рис. 1, б). Заметим, что анализировались записи, сделанные на одном и том же датчике системы.

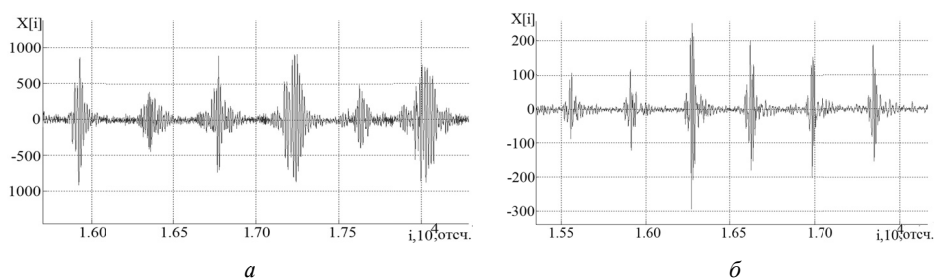


Рис. 1 – Пример сейсмического сигнала:

а – зимнего; б – летнего

Fig. 1 – An example of a seismic signal:

а – winter; б – summer

Кроме того, длительность импульса не является постоянной в пределах пачки. Это связано как с локальными неоднородностями грунта на пути прохождения сейсмической волны, так и с изменением интенсивности ударного воздействия на грунт при движении объекта. Однако натурные статистические исследования показывают, что возможно определение длительности импульса путем усреднения длительностей, измеренных по всему сигналу пачки. При этом отклонения от средней длительности в пределах пачки обычно являются незначительными.

Отметим также, что средняя длительность импульса может отличаться для разных датчиков системы из-за возможных различий свойств грунта в месте уста-

* Поскольку предварительно сейсмический сигнал дискретизируется с частотой 597 Гц, в статье для отображения сигналов и результатов статистического анализа алгоритмов используется шкала времени, переведенная в относительные единицы (отсчеты времени).

новки. Поэтому целесообразно оценивать ее для каждого датчика. Если при этом флюктуации средних длительностей незначительны, можно вычислять среднюю длительность по всем датчикам системы. Если же длительности сильно различаются, можно использовать индивидуальные настройки параметров для каждого датчика. Итак, оценка длительности импульса осуществляется при помощи двухэтапной процедуры. Сначала определяются длительности отдельных импульсов в пачке. Затем производится усреднение по всем импульсам.

1. Определение длительности сейсмического импульса

Оценка длительности k -го импульса τ_k^* в пачке находится на основе метода максимального правдоподобия. В качестве наблюдаемых на k -м шаге данных при оценке длительности используется вектор, составленный из элементов исходного наблюдения, попадающих в окрестности Δi точек i_k положения импульсов: $\bar{X}_k = \{X[i], i \in \Delta i\}$. Временные положения импульсов должны быть получены предварительно, например, при помощи марковского алгоритма [6]. Функция правдоподобия для соответствующего вектора наблюдений \bar{X}_k запишется следующим образом:

$$w(\bar{X}_k | \tau_k) = \prod_{i=i_{\min}^k}^{i_{\max}^k} w(X[i] | \tau_k), \quad (1)$$

где $[i_{\min}^k, i_{\max}^k]$ – интервал оценки для длительности k -го импульса ($i_{\min}^k = i_k - \Delta i/2$; $i_{\max}^k = i_k + \Delta i/2$), а одноэлементные функции правдоподобия $w(X[i] | \tau_k)$ имеют вид

$$w(X[i] | \tau_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(D[i, \tau_k] + D_\Phi)}} \exp\left(-\frac{X^2[i]}{2(D[i, \tau_k] + D_\Phi)}\right). \quad (2)$$

Зависимость дисперсии от времени для k -го импульса в пачке может быть представлена в виде

$$D[i, \tau_k] = D_k \exp\left(-\frac{(i - i_k)^2}{2\tau_k^2}\right),$$

здесь D_k – максимальная интенсивность k -го импульса. Если известно временное положение импульса i_k , ее можно оценить для сигнала $X[i]$ в интервале Δi , центр которого совпадает с i_k , по правилу:

$$D_k^* = \frac{1}{\Delta i} \sum_{i=i_{\min}^k}^{i_{\max}^k} X^2[i].$$

Из (1) и (2) получаем

$$w(\bar{X} | \tau_k) = \left(\prod_{i=i_{\min}^k}^{i_{\max}^k} \sqrt{2\pi(D[i, \tau_k] + D_\Phi)} \right)^{-1} \exp\left(-\sum_{i=i_{\min}^k}^{i_{\max}^k} \frac{X^2[i]}{2(D[i, \tau_k] + D_\Phi)}\right).$$

Оценка максимального правдоподобия находится из уравнения [7]

$$\frac{\partial \ln w(\bar{X} | \tau_k)}{\partial \tau_k} = 0.$$

После выполнения необходимых вычислительных процедур получаем

$$\sum_{i=i_{\min}^k}^{i_{\max}^k} \frac{D[i, \tau_k] (i - i_k)^2 \left(\frac{X^2[i]}{(D[i, \tau_k] + D_{\Phi})} - 1 \right)}{(D[i, \tau_k] + D_{\Phi})} = 0. \quad (3)$$

При помощи уравнения (3) можно оценить длительность k -го импульса в пачке. Решая уравнение (3) для всех $k = 1 \dots K$, входящих в состав наблюдаемого сигнала, можно найти множество независимых оценок $\tau_1^*, \tau_2^* \dots \tau_K^*$, усредняя которые, находим среднюю длительность импульса на данном датчике системы.

2. Исследование алгоритма оценки длительности импульса

Анализ точности алгоритма производился методом статистического моделирования. При этом предполагалось, что интенсивность D_k всех импульсов одинаковая. Путем сопоставления истинной τ_k и измеренной τ_k^* длительностей импульсов определялась ошибка измерения

$$\varepsilon_j = \tau_k - \tau_k^*,$$

по совокупности экспериментов находились смещение оценки и среднеквадратическая ошибка (СКО). На точность получения оценок влияют отношение сигнал/шум и реальная длительности импульса (3), также наблюдается зависимость от размера интервала Δi .

На рис. 2, а показана зависимость смещения оценки длительности импульса от реальной длительности при различных значениях отношения сигнал/шум (ОСШ). При увеличении реальной длительности импульса оценки становятся смещенными, однако, поскольку смещение не превышает одного отсчета, им можно пренебречь.

Графики зависимости СКО оценки длительности импульса в пачке от реальной длительности при различных значениях ОСШ приведены на рис. 2, б и свидетельствуют о незначительном влиянии реальной длительности импульса на точность получаемых оценок. При этом если абсолютная ошибка возрастает с ростом реальной длительности импульса, то относительная, напротив, уменьшается. Так при $q^2 = 10$ для $\tau = 20$ отсч. относительная ошибка измерения составляет приблизительно 10 %, а для $\tau = 80$ отсч. относительная ошибка уменьшается до 4 %.

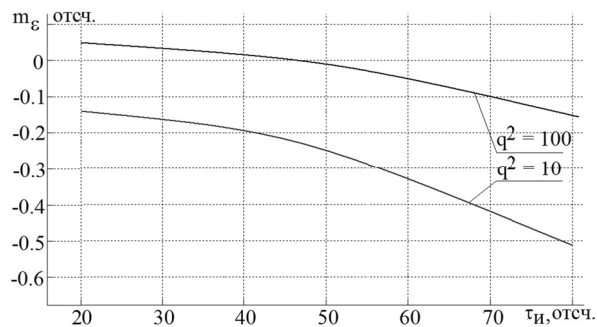
Рис. 3, а иллюстрирует зависимость смещения оценки длительности импульса в пачке от ОСШ при различных реальных длительностях импульса. При малом ОСШ наблюдается небольшое смещение оценок. Однако уже при $q^2 = 5$ модуль математического ожидания ошибки не превышает одного отсчета. Таким образом, можно считать, что оценки являются несмещенными.

Зависимость СКО оценки длительности импульса в пачке от ОСШ при различных реальных длительностях импульса приведена на рис. 3, б. Уменьшение

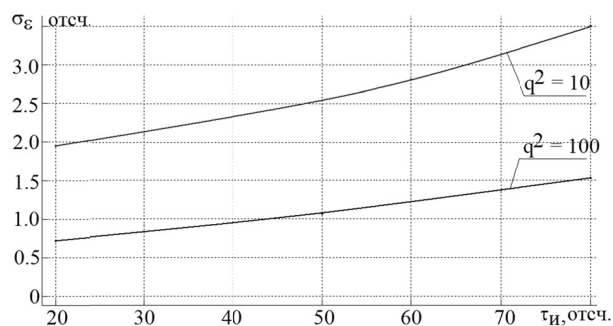
ОСШ приводит к росту СКО, который особенно заметен в области $q^2 < 10$. Однако необходимо отметить, что уже при $q^2 = 5$ относительная СКО не превышает 25 % от реальной длительности импульса. Следовательно, алгоритм работает с приемлемой точностью в присутствии сильных помех.

Важным параметром также является длительность интервала Δi , в котором производится оценка. На рис. 4 приведены зависимости смещения и СКО оценки длительности импульса от размера интервала оценки при длительности импульса, равной 20 отсч., и ОСШ, равном 100. СКО оценки значительно уменьшается с увеличением интервала наблюдения. При этом бесконечному увеличению интервала Δi препятствует квазипериодичность сейсмического сигнала шагов человека.

Необходимо отметить, что при работе предложенного алгоритма требуется знание отношения сигнал/шум, что невозможно в условиях априорной неопределенности, которая возникает как из-за постоянно меняющейся фоновой обстановки, а также из-за изменяющихся свойств грунта и отсутствия информации об удаленности траектории движения объекта от датчика. Решение этой проблемы заключается в использовании оценки ОСШ, которая может не совпадать с истинным значением.



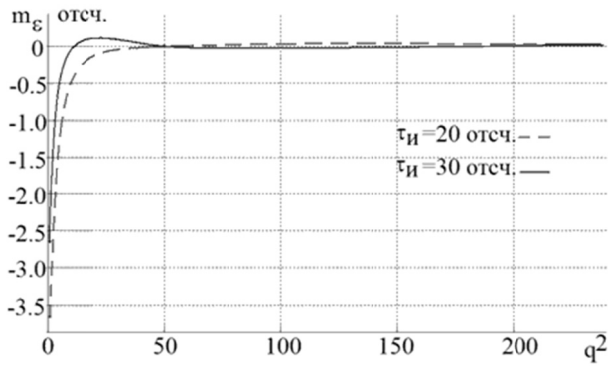
а



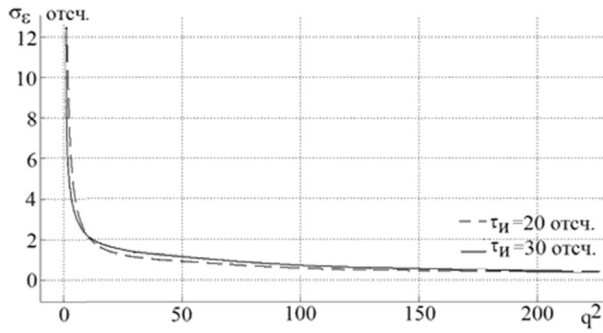
б

Рис. 2 – Зависимость смещения (а) и СКО (б) оценки $\tau_{и}$ от истинной длительности импульса

Fig. 2 – Displacement of (a) and MSE (b) evaluation $\tau_{и}$ of the true pulse duration



а



б

Рис. 3 – Зависимость смещения (а) и СКО (б) оценки $\tau_{и}$ от q^2

Fig. 3 – Displacement of (a) and RMS (b) estimation $\tau_{и}$ of q^2

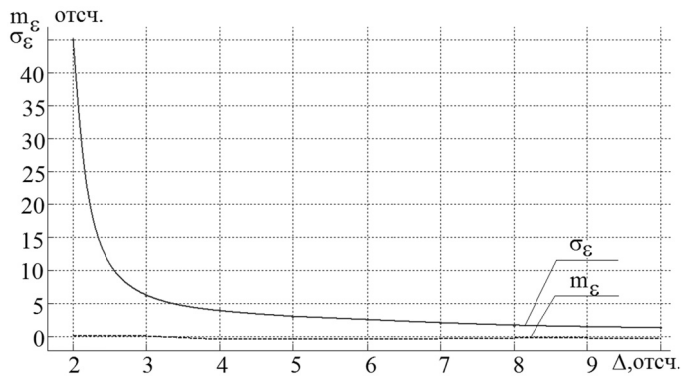


Рис. 4 – Зависимость смещения и СКО оценки $\tau_{и}$ от Δi , $\tau_{и} = 20$ отсч., $q^2 = 100$

Fig. 4 – The dependence of the bias and standard deviation estimation $\tau_{и}$ on Δi , $\tau_{и} = 20$, $q^2 = 100$

Было проанализировано влияние расстройки по ОСШ на точность получаемых оценок длительностей импульсов. Под расстройкой понимается разность между ОСШ входного сигнала $q_{\text{вх}}^2$ и ОСШ, используемого в алгоритме обработки $q_{\text{алг}}^2$: $\nu_{q^2} = q_{\text{вх}}^2 - q_{\text{алг}}^2$. При проведении экспериментов фиксировалось значение $q_{\text{алг}}^2$, изменялось значение $q_{\text{вх}}^2$. На рис. 5 представлены зависимости смещения и СКО оценки длительности импульса от расстройки по ОСШ ν_{q^2} . Длительность импульса предполагалась равной 20 отсч., а ОСШ, используемое в алгоритме обработки, было равно 100. Видно, что модуль математического ожидания и СКО минимальны при нулевой расстройке по ОСШ. Кроме того, в области положительных расстроек ($q_{\text{вх}}^2 > q_{\text{алг}}^2$) наблюдается менее резкое увеличение погрешности оценки. Это говорит о том, что при установке $q_{\text{алг}}^2$ необходимо задаваться заведомо меньшим параметром, что позволит обрабатывать сигнал с различным ОСШ достаточно точно, не прибегая при этом к адаптивной подстройке.

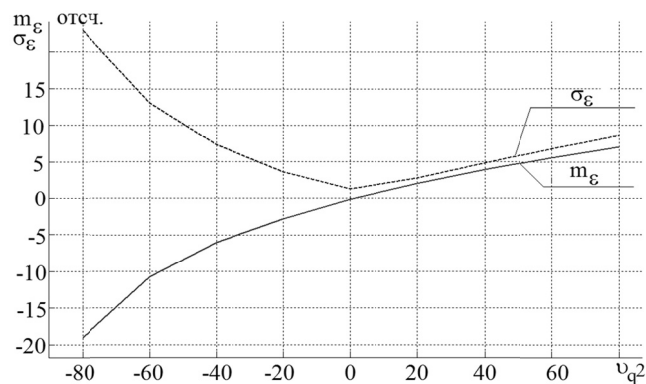


Рис. 5 – Зависимость смещения и СКО оценки τ_i от ν_{q^2}

Fig. 5 – The dependence of the bias and standard deviation estimation τ_i of ν_{q^2}

Заключение

В статье предложен алгоритм оценки длительности сейсмических импульсов, разработанный по методу максимального правдоподобия. Анализ точности проводился методом цифрового статистического моделирования. Было изучено влияние на точность оценок различных факторов: истинной длительности импульса, отношения сигнал/шум, а также длительности интервала оценки. Кроме того, была проанализирована точность работы алгоритма в случае расстройки по отношению сигнал/шум. Разработанный алгоритм обладает приемлемой для решения сейсмических задач точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филатова С.Г. Определение длительности последовательности сейсмических импульсов, возбуждаемых при движении человека по поверхности грунта // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2013. – № 1 (50). – С. 39–47.

2. **Филатова С.Г.** Точность оценки временного положения сейсмического сигнала в системах охранного наблюдения // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (51). – С. 73–80.
3. **Филатова С.Г., Спектор А.А.** Влияние параметрических расстроек на точность определения временных положений сигналов в сейсмических системах охраны // АПЭП-2012: материалы XI Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск, 2–4 октября 2012 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – Т. 4. – С. 71–73.
4. **Соколова Д.О., Спектор А.А.** Непараметрическое обнаружение сейсмоактивных объектов с импульсным воздействием на грунт // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Радиолокационная техника. – 2014. – Вып. 2. – С. 164–173.
5. **Соколова Д.О., Спектор А.А.** Классификация движущихся объектов по спектральным признакам сейсмических сигналов // Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 5. – С. 112–119.
6. **Спектор А.А., Филатова С.Г.** Оценка временного положения импульсов в сейсмических системах наблюдения на основе марковской фильтрации // Автометрия. – 2008. – № 4. – С. 68–74.
7. **Левин Б.Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

PULSE LENGTH ESTIMATION OF SEISMIC SIGNAL OF HUMAN STEPS

Filatova S.G.

Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russian Federation

Guard systems of long perimeter based on seismic principle usually work in non-stationary and inhomogeneous conditions. Parameters of seismic signals of human steps change depending on soil property and seasonal climatic factors. Therefore, the important task in the design of such systems is to implement procedures for automatic configuration of algorithms for signal processing when changing external conditions. The creation of automatic or semi-automatic configuration procedures will allow us to fast deployment at new objects as well as to improve the reliability of existing systems. One of the parameters of the seismic signal, which depend on properties of the environment, is the pulse length. In the paper the statistical estimation algorithm of pulse length based on the analysis of maximum likelihood function is suggested. Its implementation will allow to process signals in real-time. The algorithm is studied by the method of statistical modeling. The results obtained are proved quite high precision of its work. The paper will be interesting for specialists who created algorithm of signal processing for seismic guard system.

Keywords: seismic guard system, pulse length, statistical estimation

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-128-136

REFERENCES

1. Filatova S.G. Opredelenie dlitel'nosti posledovatel'nosti seismicheskikh impul'sov, vzbuzhdaemykh pri dvizhenii cheloveka po poverkhnosti grunta [Estimation of duration of seismic pulse group generated people's motion on the ground]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2013, no. 1 (50), pp. 39–47.
2. Filatova S.G. Tochnost' otsenki vremennogo polozheniya seismicheskogo signala v sistemakh okhrannogo nablyudeniya [The precision of seismic signal time position estimation in a guard system]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2013, no. 2 (51), pp. 73–80.
3. Filatova S.G., Spector A.A. [Input parameters estimation error effect on precision of signal time determination in a seismic guard system]. *Materialy XI Mezhdunarodnoi konferentsii "Aktual'nye problemy elektronnoho priborostroeniya (APEP-2012)"* [Proceedings of 11th International Conference "Actual Problems of Electronic Instrument Engineering" (APEIE-2012). In 7 vol.], Novosibirsk, Russia, 2–4 October 2012, Novosibirsk, 2012, vol. 4, pp. 71–73.
4. Sokolova D.O., Spector A.A. Neparametricheskoe obnaruzhenie seismoaktivnykh ob'ektov s impul'snym vozdeistviem na grunt [Non-parametric detection of seismic objects with pulse

- influence on soil]. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Radiolokatsionnaya tekhnika – Electronics Questions. A series of radar equipments*, 2014, no. 2, pp. 164–173.
5. Sokolova D.O., Spector A.A. Klassifikatsiia dvizhushchikhsia ob'ektov po spektral'nym priznakam seismicheskikh signalov [Classification of moving objects based on spectral features of seismic signals]. *Avtometriia – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, vol. 48, iss. 5, pp. 522–528. doi: 10.3103/S8756699012050135. Translated from *Avtometriia*, 2012, vol. 48, iss. 5, pp. 112–119.
 6. Spector A.A., Filatova S.G. Otsenka vremennogo polozheniya impul'sov v seismicheskikh sistemakh nablyudeniya na osnove Markovskoi fil'tratsii [Estimating the time position of pulses in seismic observation systems based on Markovian filtering]. *Avtometriia – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2008, vol. 44, iss. 4, pp. 337–341. doi: 10.3103/S8756699008040080. Translated from *Avtometriia*, 2008, vol. 44, iss. 4, pp. 68–74.
 7. Levin B.R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki [Theoretical foundations of statistical radio engineering]. 3rd ed., rev. and enl. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 656 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Филатова Светлана Геннадьевна – родилась в 1984 году, канд. техн. наук, доцент, научный сотрудник кафедры теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: статистическая обработка сигналов и изображений. Опубликовано 19 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: s.filatova@corp.nstu.ru).

Filatova Svetlana Gennadjevna (b. 1984) – Candidate of Technical Sciences, associate prof., researcher of Theoretical bases of radioengineering Department at the Novosibirsk state technical university. Her research interests are currently focused on statistical processing of signal and images. She is author of 19 scientific papers. (Address: 20, Karl Marks Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: s.filatova@corp.nstu.ru).

*Статья поступила 17 мая 2015 г.
Received May 17, 2015*

To Reference:

Filatova S.G. Otsenka dlitel'nostei impul'sov v seismicheskom signale ot shagov cheloveka [Pulse length estimation of seismic signal of human steps]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 128–136. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-128-136