
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

Главный редактор **В.А. Богущ**

Редакционная коллегия:

Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),
А.Н. Осипов (зам. главного редактора),
Т.В. Борботько (ответственный секретарь),
М.П. Батура, В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович, В.К. Конопелько,
А.П. Кузнецов, А.А. Кураев, В.А. Лабунов, В.В. Муравьев, М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднарь,
С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков, В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский,
А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк, В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов,
С.П. Кундас, В.А. Куренев, В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков,
Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепя, А.М. Русецкий, Н.К. Толочко,
А.А. Хмыль, В.Ю. Цветков, В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

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

Телефон редакции: +375-17-293-88-41

Web-сайт: www.doklady.bsuir.by

E-mail: doklady@bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Юрцев О.А., Шимановский Р.Ч. Влияние размеров плоскости измерения амплитудно-фазового распределения поля на ошибки восстановления диаграммы направленности антенной решетки голографическим методом	5
Конойко А.И. Снижение управляющего напряжения в амплитудном электрооптическом модуляторе при многолучевой интерференции в кольцевом резонаторе.....	14
Давыдов М.В., Белоус П.А. Автоматизированное устройство для оценки качества поверхности льда	21
Nasr S., German O.V. A searching algorithm for text with mistakes.....	29
Липкович Э.Б., Ковшик В.А., Серченя А.А. Аналитическая модель расчета помехоустойчивости систем с многопозиционными видами модуляции и кодированием по алгоритму Рида–Соломона	35
Порхун М.И., Вашкевич М.И. Метод коррекции слуха на основе психоакустически обусловленного переноса частот в речевом сигнале.....	43
Архипенков Д.В. Анализ параметров радиосигналов для идентификации источника излучения.....	52
Гревцов Н.Л., Клименко А.В., Гурбо А.Д., Бондаренко В.П. Влияние кристаллографической ориентации кремниевых пластин на механизм их анодирования.....	59

Seitkulov Y.N., Boranbayev S.N., Davydau H.V., Patapovich A.V. Ittelligibility of the Kazakh speech when it is protected with combined masking signals	67
Холов П.А., Гапоненко Н.В., Шейдакова К.В., Крымский В.И., Филипена В.А., Петлицкая Т.В., Колос В.В., Петлицкий А.Н. Конденсаторные структуры на основе пленок титаната бария, сформированных золь-гель методом	74
Соловьёв Я.А., Пилипенко В.А. Влияние температуры быстрой термической обработки на электрофизические свойства пленок никеля на кремнии	81
Абдулхад Х.ДА, Аль-Машатт Е.А.А., Бойправ О.В., Богуш В.А., Прудник А.М. Электромагнитные и звукоизоляционные свойства комбинированных конструкций экранов на основе иглопробивного материала и фрагментов алюминиевой фольги	89
Муха В.С. Статистическая обработка метеорологических данных для выводов о наличии временных трендов	96

Корректор А.В. КОНДАКОВА
Компьютерный дизайн и верстка О.В. БОЙПРАВ

Подписано в печать 28.02.2020. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 12,32. Уч.-изд. л. 11,2. Тираж 100 экз. Заказ 35.

Индекс для индивидуальной подписки 00787.

Индекс для ведомственной подписки 007872.

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

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

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

Editor-In-Chief V. A. Bogush

Address of editorial office: P. Brovka str., 6, room 326, Minsk, 220013, Belarus

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

Web-site: www.doklady.bsuir.by

E-mail: doklady@bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Yurtsev O.A., Shimanouski R.Ch. Amplitude-phase distribution measurement plane dimensions influence on the holographic method antenna array radiation pattern reconstruction errors	5
Kanojka A.I. Reduction of the control voltage in the amplitude electrooptic modulator at multiple-interference in a ring resonator	14
Davydov M.V., Belous P.A. Automated device for ice surface quality assessment	21
Nasr S., German O.V. A searching algorithm for text with mistakes	29
Lipkovich E.B., Kovshik V.A., Serchenya A.A. Analytical model of noise stability calculation of systems with multipositional modulation and coding by Reed–Solomon algorithm	35
Porhun M.I., Vashkevich M.I. Hearing correction method based on psychoacoustically motivated frequency transposition in a speech signal	43
Arkhipenkov D.V. Analysis of radio signal parameters for emission source identification ...	52
Grevtsov N.L., Klimenka A.V., Hurbo A.D., Bondarenko V.P. Influence of silicon wafer crystallographic orientation on anodization mechanism	59
Seitkulov Y.N., Boranbayev S.N., Davydau H.V., Patapovich A.V. Itelligibility of the Kazakh speech when it is protected with combined masking signals	67
Kholov P.A., Gaponenko N.V., Shaidakova K.V., Krymski V.I., Filipenya V.A., Petlitskaya T.V., Kolos V.V., Pyatlitski A.N. Condenser structures based on barium titanate films formed by sol-gel method	74

Solovjov Ja.A., Pilipenko V.A. Effect of rapid thermal treatment temperature on electrophysical properties of nickel films on silicon	81
Abdulhadi H.D.A., Almashat E.A.A., Boiprav O.V., Bogush V.A., Prudnik A.M. Electromagnetic and sound insulation properties of combined shields based on the needle-punching material and fragments of aluminum foil.....	89
Mukha V.S. Statistical processing of the meteorological data for conclusion on the presence of the time trends.....	96



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.31

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПЛОСКОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ НА ОШИБКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

ЮРЦЕВ О.А., ШИМАНОВСКИЙ Р.Ч.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 21 марта 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В статье исследуется голографический метод измерения диаграммы направленности антенн. В качестве тестируемой антенны используется плоская антенная решетка, а в качестве поверхности, на которой измеряется амплитудно-фазовое распределение в ближней зоне, использована плоская воображаемая поверхность прямоугольной формы. На примере плоской антенной решетки рассматривается влияние размера поверхности измерения амплитудно-фазового распределения поля в плоскости, ортогональной плоскости восстановления диаграммы направленности. Излучатели антенной решетки возбуждаются с комбинированным амплитудным распределением и линейным фазовым распределением. Поле в дальней зоне решетки определяется при помощи интеграла Кирхгофа. Делается оценка восстановленных диаграмм направленности при использовании амплитудно-фазового распределения на всей плоскости измерения в сравнении с диаграммой направленности решетки в дальней зоне. Также проводится численный анализ влияния на погрешности определения параметров диаграммы направленности решетки при использовании голографического метода: числа столбцов амплитудно-фазового распределения на плоскости измерения, положения этой плоскости по трем координатам относительно плоскости раскрытия решетки. Показывается, что при равенстве шага расположения точек измерения амплитудно-фазового распределения и шага решетки для восстановления диаграммы направленности голографическим методом достаточно использовать один столбец амплитудно-фазового распределения на плоскости измерения. Это существенно упрощает и удешевляет процесс измерения и необходимое оборудование. Приводятся примеры определения погрешностей измерения параметров антенной решетки при смещении плоскости измерения амплитудно-фазового распределения по трем координатам.

Ключевые слова: антенная решетка, голографический метод измерения диаграммы направленности, ошибка восстановления диаграммы направленности.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Юрцев О.А., Шимановский Р.Ч. Влияние размеров плоскости измерения амплитудно-фазового распределения поля на ошибки восстановления диаграммы направленности антенной решетки голографическим методом. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 5-13.

AMPLITUDE-PHASE DISTRIBUTION MEASUREMENT PLANE DIMENSIONS INFLUENCE ON THE HOLOGRAPHIC METHOD ANTENNA ARRAY RADIATION PATTERN RECONSTRUCTION ERRORS

OLEG A. YURTSEV, ROMAN Ch. SHIMANOUSKI

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 21 March 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The article explores the holographic method of measuring the antenna pattern. A flat antenna array is used as the antenna under test, and a planar rectangular surface is used as the surface on which the amplitude-phase distribution in the near field is measured. Using the example of a flat antenna array, we consider the influence of the size of the measurement surface of the amplitude-phase distribution of the field in a plane orthogonal to the reconstruction plane of the radiation pattern. Antenna emitters are excited with a combined amplitude distribution and linear phase distribution. The field in the longitudinal zone of the lattice is determined using the Kirchhoff integral. The reconstructed radiation patterns are estimated using the amplitude-phase distribution over the entire measurement plane in comparison with the array radiation pattern in the far zone. A numerical analysis of the influence on the errors in determining the parameters of the lattice radiation pattern using the holographic method is also carried out: the number of columns of the amplitude-phase distribution on the measurement plane, the position of this plane in three coordinates relative to the plane of the aperture of the lattice. It is shown that if the spacing of the points of measurement of the amplitude-phase distribution and the pitch of the lattice are equal, to restore the radiation pattern using the holographic method, it is sufficient to use one column of the amplitude-phase distribution on the measurement plane. This greatly simplifies and reduces the cost of the measurement process and the necessary equipment. Examples of determining errors in measuring the parameters of the antenna array when shifting the plane of measurement of the amplitude-phase distribution in three coordinates are given.

Keywords: antenna array, radiation pattern measure holographic method, radiation pattern reconstruction error.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Yurtsev O.A., Shimanouski R.Ch. Amplitude-phase distribution measurement plane dimensions influence on the holographic method antenna array radiation pattern reconstruction errors. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 5-13.

Введение

Голографический метод определения диаграммы направленности (ДН) остронаправленных антенн по результатам измерения распределения поля в ближней зоне широко используется в практике разработки крупногабаритных антенн. Анализ этого метода посвящен целый ряд публикаций в виде статей и монографий. В статье [1] со ссылкой на публикации [2–4] и в статье [5] рассмотрены возможности применения голографического метода определения ДН антенн по измеренному полю в ближней зоне с использованием оптического диапазона для обработки радиоголограммы. Разработаны математические модели метода при использовании плоскости, цилиндра, сферы в качестве поверхности для измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) поля в ближней зоне [6]. Рассмотрены требования к размерам поверхности измерения АФР и шагу расположения точек измерения АФР в плоскости восстановления ДН голографическим методом. В статье [7] определен угловой сектор, в котором необходимо измерить АФР в ближней зоне для того, чтобы восстановить ДН в заданном угловом секторе дальней зоны. В статье [8] анализируются ошибки определения параметров ДН по полю, измеренному в раскрыте линейной антенной решетки диполей. Показано, что расстояние между решеткой и плоскостью измерения целесообразно выбирать

равным $(2-4)\lambda$, где λ – длина волны, а точки измерения АФР располагать в плоскости восстановления ДН с шагом $0,5\lambda$. При таком шаге и длине антенны 150λ среднеквадратичная погрешность определения уровня первого бокового лепестка не превосходит 0,5 %. В ряде работ рассматривается влияние случайных ошибок измерения АФР в ближней зоне на точность восстановления ДН голографическим методом [9–11].

Во всех публикациях по голографическому методу иллюстрация метода, его возможностей и систематических погрешностей производится на примерах восстановления ДН линейных антенн. Не все вопросы, связанные с анализом погрешностей восстановления ДН голографическим методом, рассмотрены в литературе. К таким вопросам, в частности, относится вопрос о влиянии размеров и положения поверхности измерения АФР в плоскости, ортогональной плоскости восстановления ДН. Не рассмотрен вопрос о влиянии отношения шага расположения излучателей в тестируемой решетке и шага расположения точек измерения АФР на поверхности измерения в плоскости восстановления на погрешности определения параметров восстановленной ДН. Эти вопросы рассматриваются в настоящей статье.

Математическая модель голографического метода измерения диаграммы направленности антенной решетки

В качестве тестируемой антенны используется плоская антенная решетка, показанная на рис. 1, а в качестве поверхности, на которой измеряется АФР в ближней зоне, использована плоская воображаемая поверхность прямоугольной формы S .

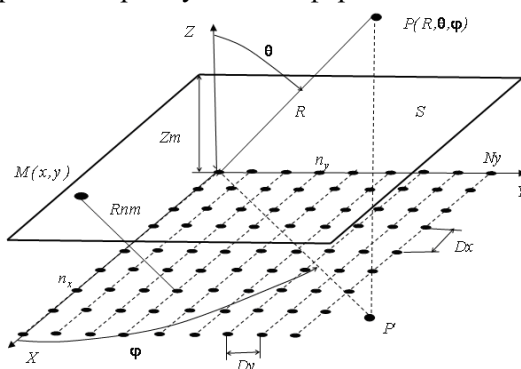


Рис. 1. Антенная решетка и плоскость измерения АФР
Fig. 1. Antenna array and plane for measuring the amplitude-phase distribution

На рис. 1 использованы следующие обозначения: S – поверхность, на которой измеряется АФР; $M(x, y)$ – точка на этой поверхности. Эта точка расположена на пересечении двух систем линий на этой поверхности с шагом расположения D_x – по оси X и D_y – по оси Y . Число линий равно: M_x – по оси X , M_y – по оси Y . Номера линий обозначены символами m_x, m_y – по осям X, Y соответственно. Число линий M_x и M_y на поверхности измерения S рассчитываются по шагу между ними D_x и D_y и размерам поверхности измерения L_x и L_y , которые, в свою очередь, определяются по заданным координатам границ этой поверхности X_{\min}, X_{\max} – по оси X и Y_{\min}, Y_{\max} – по оси Y . Значения $D_x, D_y, X_{\min}, X_{\max}, Y_{\min}, Y_{\max}$ на рис. 1 не показаны. Z_m – расстояние между раскрытием решетки и поверхностью S ; $P(R, \theta, \varphi)$ – точка наблюдения в пространстве (точка, в которой определяется поле решетки); R, θ, φ – сферические координаты точки P ; P' – проекция точки P на плоскость XY ; D_x – шаг расположения излучателей вдоль оси X (в троках решетки); излучатели обозначены черными точками; D_y – шаг расположения излучателей вдоль оси Y (в столбцах решетки); N_x, n_x – число излучателей в решетке и номер излучателя по оси X ; N_y, n_y – число излучателей в решетке и номер излучателя по оси Y ; R_{nm} – расстояние между излучателем с номером n_x, n_y и точкой $M(x, y)$. Ряды излучателей вдоль оси X – это столбцы излучателей, ряды излучателей вдоль оси Y – строки излучателей.

Размеры решетки: $Lx = Dx \cdot Nx$ – в плоскости столбцов, $Ly = Dy \cdot Ny$ – в плоскости строк. Эти размеры на рис. 1 не показаны. Излучатели антенной решетки возбуждаются с комбинированным амплитудным распределением $AR(x)$ и $AR(y)$ и линейным фазовым распределением $FR(x)$ и $FR(y)$ соответственно вдоль осей X и Y . В качестве излучателей использован гипотетический излучатель с заданной шириной главного лепестка ДН $2\theta_{0,5}^1$ – одинаковой в главных плоскостях XZ и YZ .

В соответствии с голографическим методом измерения ДН антенны [1] по параметрам решетки определяется АФР на поверхности S , а по нему – поле в точке P как функция угла θ при фиксированном угле φ .

Известные программы электродинамического моделирования *FEKO*, *CST*, *HFSS* не позволяют моделировать процесс восстановления ДН голографическим методом. Поэтому применена оригинальная программа численного моделирования *FAR_XY_X_G*. В программе использованы соотношения, следующие из выражения для интеграла Кирхгофа..

Амплитудно-фазовое распределение поля на поверхности S :

$$E(m_x, m_y) = \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{n_y=1}^{N_y} AR(n_x) \cdot AR(n_y) e^{iFR(n_x)} e^{iFR(n_y)} e^{-ikRnm(m_x, m_y)} / Rnm(m_x, m_y), \quad (1)$$

где $AR(n_x)$, $AR(n_y)$ – амплитудные распределения (АР) возбуждения излучателей по осям X, Y ; $FR(n_x)$, $FR(n_y)$ – фазовые распределения (ФР) возбуждения излучателей по осям X, Y ; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число свободного пространства; $Rnm(m_x, m_y)$ – расстояние между излучателем с номером n и точкой $M(m_x, m_y)$ на поверхности измерения S . Индекс n при суммировании в формуле (1) «пробегают» все значения n_x и n_y .

Расстояние Rnm описывается выражением:

$$Rnm(m_x, m_y) = Rnm = \sqrt{(Xn_x - Xm)^2 + (Yn_y - Ym)^2 + Zm^2}, \quad (2)$$

где Xn_x, Yn_y – координаты излучателей в решетке; Xm, Ym – координаты точки M на поверхности измерения:

$$\begin{aligned} Xm &= X_{\min} + Dlx \cdot (m_x - 1); \quad Dlx = (X_{\max} - X_{\min}) / M_x, \\ Ym &= Y_{\min} + Dly \cdot (m_y - 1); \quad Dly = (Y_{\max} - Y_{\min}) / M_y. \end{aligned} \quad (3)$$

В численной модели процесса восстановления ДН голографическим методом значения координат излучателей решетки описываются выражениями:

$$Xn_x = Dx \cdot (n_x - 1); \quad Yn_y = Dy \cdot (n_y - 1); \quad 1 \leq n_x \leq Nx; \quad 1 \leq n_y \leq Ny. \quad (4)$$

Амплитудное распределение (АР) возбуждения излучателей в решетке – комбинированное, спадающее по закону синуса в степени Px, y к краям решетки от 1 – в центре решетки до уровня Dax – по оси X (в столбце) на краях решетки и до уровня Day – по оси Y (в строке):

$$\begin{aligned} AR(n_x) &= Dax + (1 - Dax) \cdot \sin^{Px} \left(\frac{n_x - 1}{Nx - 1} \pi \right), \\ AR(n_y) &= Day + (1 - Day) \cdot \sin^{Py} \left(\frac{n_y - 1}{Ny - 1} \pi \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Фазовое распределение возбуждения излучателей по осям X, Y задается линейным для обеспечения фазового сканирования:

$$\begin{aligned} FR(n_x) &= -k \cdot Dx(n_x - 1) \sin \theta_{mx}, \\ FR(n_y) &= -k \cdot Dy(n_y - 1) \sin \theta_{my}, \end{aligned} \quad (6)$$

где θ_{mx}, θ_{my} – углы сканирования в плоскости строк и столбцов.

По полю $E(m_x, m_y)$ определяется поле $E(R, \theta, \varphi)$ в дальней зоне решетки (в точке P на рис. 1) с помощью интеграла Кирхгофа. Так как поле на поверхности S определено в дискретных точках $M(x, y)$, интеграл сводится к сумме полей, излученных элементарными излучателями Гюйгенса с координатами Xm, Ym .

$$E(R, \theta, \varphi) = F_c(\theta, \varphi) \cdot F_1(\theta), \quad (7)$$

где $F_c(\theta, \varphi)$ – множитель решетки точек $M(x, y) = M(m_x, m_y)$, $F_1(\theta)$ – ДН излучателя Гюйгенса.

Эти сомножители определяются выражениями, следующими из интеграла Кирхгофа:

$$F_c(\theta, \varphi) = \sum_{m_x=1}^{M_x} \sum_{m_y=1}^{M_y} E(m_x, m_y) e^{-ikRmp} / Rmp, \quad (8)$$

где расстояние между точкой $M(m_x, m_y)$ на поверхности S и точкой наблюдения в пространстве $P(R, \theta, \varphi)$ определяется формулой:

$$Rmp = \sqrt{(Xm - Xp)^2 + (Ym - Yp)^2 + (Zm - Zp)^2}, \quad (9)$$

где Xp, Yp, Zp – прямоугольные координаты точки наблюдения P :

$$\begin{aligned} Xp &= R \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi, \\ Yp &= R \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Zp &= R \cdot \sin \theta. \\ F_1(\theta) &= 1 + \cos \theta. \end{aligned} \quad (11)$$

Далее упомянутые выше закономерности исследуются для ДН, восстановленной в плоскости XZ (в плоскости столбцов). Далее ДН, восстановленная голографическим методом, иногда для краткости именуется голографической ДН.

Влияние геометрических параметров плоскости измерения амплитудно-фазового распределения поля антенны (плоскости S) на параметры голографической ДН в плоскости восстановления ДН (плоскости XZ)

Сделана оценка восстановленных ДН при использовании АФР на всей плоскости измерения – $F_{g\Sigma}(\theta)$ и по одному столбу на этой плоскости – $F_{g1}(\theta)$ в сравнении с ДН решетки в дальней зоне – $F_a(\theta)$. Ниже результаты оценки ДН $F_{g1}(\theta)$ иллюстрируются на примере решетки с параметрами: число излучателей в столбцах и в строках $Nx = Ny = 21$, шаг расположения излучателей в столбцах и в строках $D = 0,5\lambda = 150$ мм, расстояние между раскрывом решетки и плоскостью измерения АФР $Zm = 0,5\lambda$, АФР на решетке равномерное. Размер плоскости измерения АФР вдоль столбцов $Lx = Nx \cdot D = 3150$ мм. Размер плоскости измерения АФР в плоскости восстановления ДН взят равным $Lsx = 1,15 \cdot Lx \approx 3600$ мм

Основные результаты проведенного численного анализа.

При шаге расположения точек измерения АФР на поверхности S в плоскости столбцов, равном шагу решетки в этой плоскости ($Dsx = Dx$), и при равных размерах решетки и поверхности S в этой плоскости ($Lsy = Ly$) диаграммы направленности $F_{g1}(\theta)$ и $F_{g\Sigma}(\theta)$ совпадают и не зависят от:

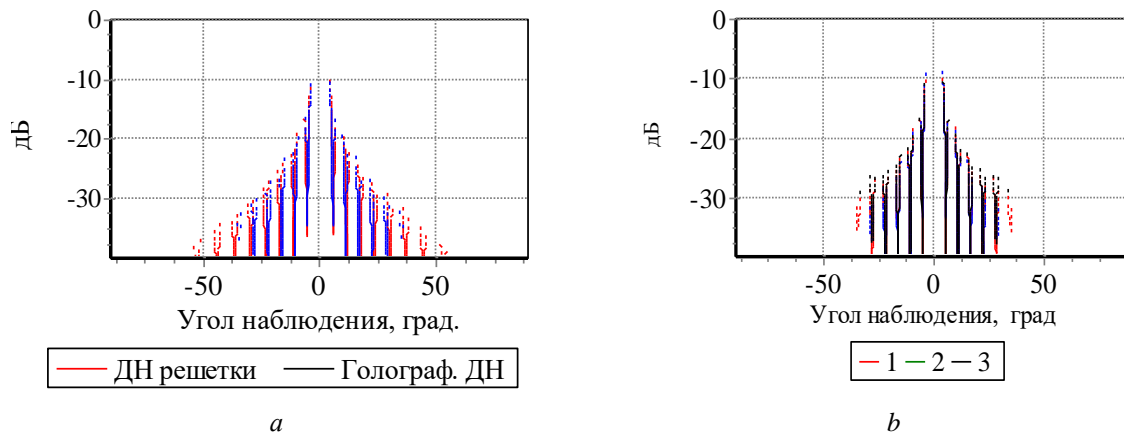
– числа столбцов АФР на плоскости S , по которым восстанавливается ДН в плоскости столбцов, и от числа строк (Ny) в решетке (этот вывод иллюстрируется рис. 2, а, на котором показаны ДН решетки в дальней зоне $F_a(\theta)$ и ДН, восстановленная по одному столбцу $F_{g1}(\theta)$; на рис. 2, а также приведены значения ошибок измерения параметров ДН голографическим методом по сравнению с параметрами ДН в дальней зоне);

– ширины главного лепестка $2\theta_{0,5}^1$ голографической ДН, рассчитанной по одному столбцу АФР на S , по отношению к ширине главного лепестка ДН решетки в дальней зоне

$$D\theta_{0,5} = \frac{2\theta_{0,5} - 2\theta_{0,5}^1}{2\theta_{0,5}} 100 \% ;$$

– уровня максимального бокового лепестка голографической ДН (F_{bm}^1) по отношению F_{bm} ДН решетки в дальней зоне $DF_{bm} = F_{bm} - F_{bm}^1$ (дБ);

– среднеквадратичного уровня боковых лепестков голографической ДН (F_{sl}^1) по отношению к значению этого параметра (F_{sl}) для ДН решетки в дальней зоне $DF_{sl} = F_{sl} - F_{sl}^1$ (дБ).



$$D\theta_{0,5} = 6,8 \% ; DF_{bm} = 0,1 \text{ дБ} ; D_{sl} = 0,08 \text{ дБ}$$

$$DF_{bm\Sigma} = -0,083 \text{ дБ} ; DF_{bm1} = 0,221 \text{ дБ} ; D_{sl\Sigma} = -2,25 \text{ дБ}$$

Рис. 2. ДН решетки в дальней зоне и ДН, восстановленные голографическим методом: a – ДН, восстановленная голографическим методом по одному столбцу при $Dsx = Dx$ и $Lsy = Ly$; b – ДН восстановленная при $Dx \neq DLx$ и $Lsy \neq Ly$; 1 – ДН решетки восстановленная по всем столбцам АФР на S ; 2 – ДН, восстановленная по столбцу АФР с номером $Jy=2$; 3 – ДН, восстановленная по столбцу с номером $Jy = 12$

Fig. 2. The radiation pattern of the array in the far zone and the radiation pattern restored by the holographic method: a – the radiation pattern restored by the holographic method in one column at $Dsx = Dx$ and $Lsy = Ly$; b – the radiation pattern restored at $Dx \neq DLx$ and $Lsy \neq Ly$; 1 – the radiation pattern of the array restored over all columns of the amplitude-phase distribution at S ; 2 – is a radiation pattern reconstructed from the amplitude-phase distribution column with number $Jy = 2$; 3 – radiation pattern restored by the column with the number $Jy = 12$

Как видно, ошибка в параметрах восстановленной ДН, особенно по уровню боковых лепестков, невелика. Описанные свойства ДН $F_{g1}(\theta)$ и $F_{g\Sigma}(\theta)$ сохраняются и при спадающем к концам решетки АФР в плоскости восстановления ДН. Причем от АР в плоскости строк решетки результат восстановления ДН в плоскости столбцов не зависит.

Использование одного столбца в АФР на плоскости измерения АФР для восстановления ДН голографическим методом существенно упрощает и удешевляет применение этого метода для измерения ДН плоской решетки с разделяющимся АФР. Полученный результат является новым и в литературе не описан.

Если не выполняется условие равенства шагов в плоскости восстановления ДН ($Dx \neq DLx$) или равенство размеров решетки и поверхности S в плоскости строк ($Lsy \neq Ly$), диаграммы направленности $F_{g1}(\theta)$ и $F_{g\Sigma}(\theta)$ различны. Причем $F_{g1}(\theta)$ зависит от номера столбца АФР на плоскости измерения S . Этот результат иллюстрируется рис. 2, b , для той же решетки с параметрами: $Nx = 21$, $Ny = 21$, $Dx = 0,5\lambda = 150$ мм. Но $DLx = 100$ мм, $Ly = 3150$ мм, $Lsy = 2400$ мм (т. е. $Dx \neq DLx$ и $Lsy \neq Ly$), число столбцов АФР на плоскости S равно

$M_y = 24$; АФР в решетке – равномерное. На рис. 2, *b* обозначено: $DF_{bm\Sigma}$ – ошибка определения максимального бокового лепестка в голографической ДН, восстановленной по АФР всех столбцов на плоскости S ; DF_{bm1} – ошибка определения максимального бокового лепестка в голографической ДН, восстановленной по АФР одного столбца на плоскости S .

Рассмотрено влияние на точность восстановления голографической ДН смещения поверхности измерения АФР по нормали в плоскости решетки (по Z) и по двум координатам в плоскости измерения АФР (координатам X, Y) по сравнению с симметричным положением относительно раскрыва решетки.

В работе [8] рекомендуется расстояние от плоскости решетки до плоскости измерения АФР (Z_m) выбирать в пределах $(1-2)\lambda$. Численное исследование зависимости ошибок определения параметров ДН, измеренной голографическим методом, от величины Z_m позволило уточнить эту рекомендацию для случая, когда восстановление ДН голографическим методом производится по одному столбцу АФР на плоскости S ($F_{g1}(\theta)$). Численное моделирование показало, что эта ДН практически не меняется при изменении Z_m в интервале $(0, 1-1)\lambda$. При изменении Z_m в интервале $(1-4)\lambda$ – изменение параметров $F_{g1}(\theta)$ незначительно.

Смещение поверхности измерения АФР вдоль столбцов решетки приводит к появлению асимметрии в столбце АР на плоскости измерения. Это, в свою очередь, приводит к известным изменениям в ДН столбца АФР на плоскости S : расширяется главный лепесток восстановленной ДН $F_{g1}(\theta)$ и растут боковые лепестки. Чем больше смещение, тем эти изменения больше. При смещении на несколько шагов решетки D погрешностью определения параметров голографической ДН можно пренебречь.

Смещение поверхности измерения АФР вдоль строк решетки ($DLsy$) независимо от величины смещения в пределах размера решетки в этой плоскости приводит к незначительному изменению параметров восстановленной ДН $F_{g1}(\theta)$, в основном, в области дальних боковых лепестков. Причем эти изменения не зависят от того, смещение кратно или не кратно шагу решетки вдоль строк. Но при этом шаг расположения точек измерения АФР на плоскости S должен быть равным шагу решетки. Так, в рассматриваемом примере решетки смещение столбца АФР на плоскости S вдоль строк решетки от нуля до максимального значения, равного половине размера плоскости вдоль строк ($0,5 \cdot Lsy$) приводит к росту среднеквадратичного уровня боковых лепестков (F_{sl}) в ДН $F_{g1}(\theta)$ на 0,13 дБ при уровне $F_{sl} = -37$ дБ.

Заключение

Проведен численный анализ влияния на погрешности определения параметров ДН решетки при использовании голографического метода: числа столбцов АФР на плоскости измерения S , положения этой плоскости по трем координатам относительно плоскости раскрыва решетки. Показано, что при равенстве шага расположения точек измерения АФР и шага решетки для восстановления ДН голографическим методом достаточно использовать один столбец АФР на S . Это существенно упрощает и удешевляет процесс измерения и необходимое оборудование. Приведены примеры определения погрешностей измерения параметров антенной решетки при смещении плоскости измерения АФР по трем координатам.

Список литературы

1. Бахрах Л.Д., Владимирова О.Н., Курочкин А.П., Соболев Г.А., Фридман Г.Х. Применение методов когерентной оптики и голографии к задачам антенной техники и обработки информации. *Антенны*. 1976;2:33-54.
2. Ingals A. Optical simulation of microwave antennas. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*. 1966;1:2-6.

3. Beste D.C. Far field simulation on antennas have complex aperture distribution functions. *IEEE Inter. Convc. Recorded.* 1966;5:133-142.
4. Бахрах Л.Д., Соболев Г.А., Фридман Г.Л. Получение голограмм трехмерных объектов. *Известия ВУЗов. Радиофизика.* 1967;10:589.
5. Бахрах Л.Д., Геруни П.М., Курочкин А.П., Арутюнян Д.С. Оптическое моделирование диаграмм направленности антенн по радиоголограмме поля в их раскрыве. *Антенны.* 1976;14:28-34.
6. Бахрах Л.Д., Колосов Ю.А., Курочкин А.П. Определение поля антенны в дальней зоне через значения поля в ближней зоне. *Антенны.* 1976;24:3-14.
7. Колосов Ю.К., Курочкин А.П. Восстановление диаграммы направленности антенн по полю, измеренному в ограниченном секторе углов в зоне Френеля. *Антенны.* 1971;16:25-37.
8. Зимин Д.В., Седенков Е.Г. Об ошибках определения характеристик антенн путем измерения распределения поля в раскрыве. *Антенны.* 1976;23:72-80.
9. Каплун И.В., Курочкин А.П. Исследование случайных погрешностей голографических методов определения характеристик направленности антенн. *Радиотехника и электроника.* 1975;10:2038-2045.
10. Турчин В.И., Фарфель В.А., Фогель А.П. Погрешности фазометрического метода восстановления ДН антенн по измерениям в ближней зоне. *Радиотехника и электроника.* 1976;1:72-82.
11. Шифрин Я.С., Усин В.А. О точности голографических методов измерения диаграмм направленности антенн. *Антенны.* 1979;27:26-38.

References

1. Bahrakh L.D., Vladimirova O.N., Kurochkin A.P., Sobolev G.A., Fridman G.Kh. [Application of coherent optics and holography methods to the tasks of antenna technology and information processing]. *Antenny = Antenny.* 1976;2:33-54. (In Russ.)
2. Ingals A. Optical simulation of microwave antennas. *IEEE Trans on Antennas and Propagation.* 1966;1:2-6.
3. Beste D.C. Far field simulation on antennas have complex aperture distribution functions. *IEEE Inter. Convc. Recorded.* 1966;5:133-142.
4. Bahrakh L.D., Sobolev G.A., Fridman G.L. Getting holograms of three-dimensional objects. *Izvestija VUZov. Radiofizika = Izvestija VUZov. Radiofizika.* 1967;10:589. (In Russ.)
5. Bahrakh L.D., Geruni P.M., Kurochkin A.P., Harutyunyan D.S. [Optical modeling of antenna patterns according to the radio hologram of the field in their aperture]. *Antenny = Antenny.* 1976;14:28-34. (In Russ.)
6. Bahrakh L.D., Kolosov Yu.A., Kurochkin A.P. [Determination of the antenna field in the far zone through the field values in the near zone]. *Antenny = Antenny.* 1976;24:3-14. (In Russ.)
7. Kolosov Yu.K., Kurochkin A.P. [Restoration of the antenna pattern along a field measured in a limited sector of angles in the Fresnel zone]. *Antenny = Antenny.* 1971;16:25-37. (In Russ.)
8. Zimin D.V., Sedenkov E.G. [Errors in determining the characteristics of antennas by measuring the field distribution in the aperture]. *Antenny = Antenny.* 1976;23:72-80. (In Russ.)
9. Kaplun I.V., Kurochkin A.P. [The study of random errors of holographic methods for determining the directivity characteristics of antennas]. *Radiotekhnika i jelektronika = Radiotekhnika i jelektronika.* 1975;10:2038-2045. (In Russ.)
10. Turchin V.I., Farfel V.A., Vogel A.P. [Errors of the phasometric method for reconstructing the antenna bottoms from measurements in the near field]. *Radiotekhnika i jelektronika = Radiotekhnika i jelektronika.* 1976;1:72-82. (In Russ.)
11. Shifrin Ya.S., Usin V.A. [On the accuracy of holographic methods for measuring antenna patterns]. *Antenny = Antenny.* 1979;27:26-38. (In Russ.)

Вклад авторов

Юрцев О.А. разработал конструкцию антенной решетки, разработал оригинальную программу для проведения численного моделирования.

Шимановский Р.Ч. выполнил моделирование решетки и голографического метода.

Authors contribution

Yurtsev O.A. developed the design of the antenna array, developed an original program for numerical simulation.

Shimanovsky R.Ch. performed a simulation of the lattice and the holographic method.

Сведения об авторах

Юрцев О.А. (1933–2019), д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники БССР.

Шимановский Р.Ч., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-27;
e-mail: halo11@mail.ru
Шимановский Роман Чеславович

Information about the authors

Yurtsev O.A. (1933–2019), D.Sci, professor, Honored worker of Science and Technology of BSSR.

Shimanouski R.Ch., PG Student of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. + 375-17-293-89-27;
e-mail: halo11@mail.ru
Shimanouski Roman Cheslavovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-14-20>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 535.5

СНИЖЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ В АМПЛИТУДНОМ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОМ МОДУЛЯТОРЕ ПРИ МНОГОЛУЧЕВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В КОЛЬЦЕВОМ РЕЗОНАТОРЕ

КОНОЙКО А.И.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 25 марта 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В настоящей работе излагается метод, позволяющий реализовать высокоэффективную амплитудную модуляцию излучения на выходе кольцевого резонатора за счет управления его искусственными световыми потерями, выводимыми из него при помощи двух Y-образных разветвителей. При этом в резонаторе обеспечивается необходимый постоянный уровень световой энергии, что, вследствие отсутствия потерь излучения при вводе его в кольцевой резонатор, позволяет достичь значительно меньшей величины требуемого управляющего электрического напряжения, чем у существующих электрооптических модуляторов, а следовательно, меньшей величины потребляемой электрической мощности и увеличения рабочего частотного диапазона модуляции оптического излучения. Возможность реализации рассматриваемого метода обеспечивается тем, что ввод световой энергии в кольцевой резонатор может осуществляться без потерь. Кроме того, одномодовые волноводы способны сохранять временную когерентность проходящего излучения, что обеспечивает реализацию многолучевой интерференции. Стабилизация оптических характеристик кольцевого резонатора, который очень чувствителен к изменению различных внешних факторов, например, температуры, давления, вибраций, может осуществляться за счет электрооптической коррекции длины оптического пути резонатора путем введения в кольцевой резонатор управляемого фазового элемента, работающего на поперечном электрооптическом эффекте, и реализации соответствующей оптоэлектронной цепи обратной связи.

Ключевые слова: многолучевая интерференция, кольцевой резонатор Фабри–Перо, электрооптический эффект, когерентность.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Конойко А.И. Снижение управляющего напряжения в амплитудном электрооптическом модуляторе при многолучевой интерференции в кольцевом резонаторе. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 14-20.

REDUCTION OF THE CONTROL VOLTAGE IN THE AMPLITUDE ELECTROOPTIC MODULATOR AT MULTIPLE-INTERFERENCE IN A RING RESONATOR

ALEXEY I. KANOJKA

*SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology” of National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Belarus)*

Submitted 25 March 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. In this paper, it's described a method that allows to implement highly efficient amplitude modulation of radiation at the output of a ring resonator by controlling its artificial light losses, which are derived from it using two Y-shaped couplers. At the same time, the necessary constant level of light energy is provided in the resonator, which, due to the absence of radiation losses when entering it into the ring resonator, allows one to achieve a significantly lower value of the required control electric voltage than existing electro-optical modulators, and, therefore, a smaller amount of consumed electric power and an increase in working frequency range of modulation of optical radiation. The possibility of implementing the method under consideration is ensured by the fact that the input of light energy into the ring resonator can be carried out without loss, in addition, single-mode waveguides are able to maintain the temporal coherence of transmitted radiation, which ensures the implementation of multipath interference. The stabilization of the optical characteristics of a ring resonator, which is very sensitive to changes in various external factors, for example, temperature, pressure, vibrations, can be achieved by electro-optical correction of the length of the optical path of the resonator by introducing a controlled phase element operating on the transverse electro-optical effect into the ring resonator and implementing corresponding optoelectronic feedback circuit.

Keywords: multipath interference, Fabry–Perot ring resonator, electro-optical effect, coherence.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Kanojka A.I. Reduction of the control voltage in the amplitude electrooptic modulator at multiple-interference in a ring resonator. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 14-20.

Введение

В настоящее время существует проблема дальнейшего увеличения рабочего частотного диапазона электрооптических модуляторов, которые могут работать до тактовых частот порядка 50 ГГц. Такое ограничение является следствием роста рассеиваемой электрической мощности [1] из-за увеличения тактовой частоты модуляторов при постоянной величине управляющего поля, что ведет к недопустимому разогреву их элементов. В результате ухудшаются как электрические, так и оптические характеристики, что особенно характерно для электрооптических модуляторов с использованием многолучевой интерференции [2, 3]. Поэтому вопрос уменьшения величины управляющего напряжения электрооптических модуляторов является весьма актуальным.

Целью настоящей работы является рассмотрение вопросов, связанных с уменьшением управляющего напряжения одномодовых амплитудных электрооптических модуляторов на многолучевой интерференции, что позволяет существенно расширить их рабочий частотный диапазон.

Сущность метода

Сущность метода заключается в реализации амплитудной модуляции излучения на одном из двух выходов кольцевого резонатора за счет управления его искусственными световыми потерями, при обеспечении в нем постоянного необходимого уровня световой энергии, что позволяет достичь значительно меньшей величины требуемого управляющего электрического напряжения, чем у существующих электрооптических модуляторов.

Оптическая схема амплитудного электрооптического модулятора на базе кольцевого резонатора представлена на рис. 1. Здесь 1, 3, 5 – первый, второй и третий Y-образные разветвители, 2 – кольцевой резонатор, 4, 6 – первый и второй электрооптические управляемые отражатели, 7 – электрооптический фазовый элемент, 8 – фотоприемник цепи обратной связи, 9 – блок управления коррекцией длины оптического пути резонатора. Первый, второй и третий Y-образные разветвители представляют собой два отрезка оптического волокна, имеющие оптический контакт [4]. В качестве первого и второго электрооптических управляемых отражателей могут быть использованы как брэгговские решетки, так и микрорезонаторы Фабри–Перо.

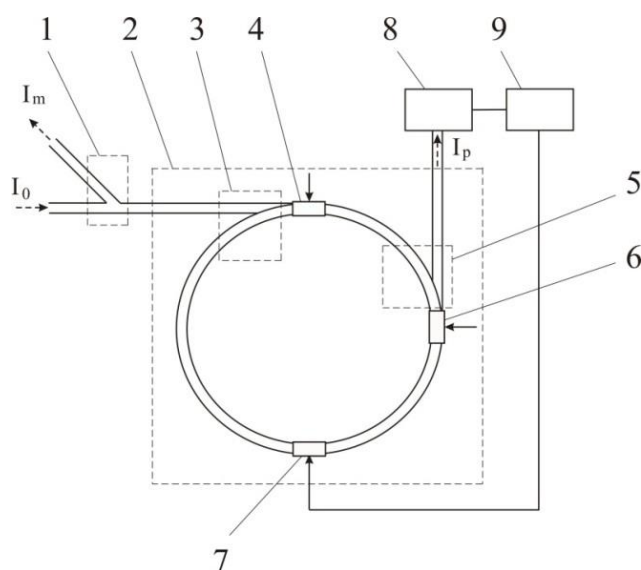


Рис. 1. Оптическая схема амплитудного электрооптического модулятора на базе кольцевого резонатора
Fig. 1. Optical design of an amplitude electro-optical modulator based on a ring resonator

Брэгговские решетки могут быть выполнены в виде отрезков электрооптического волокна с брэгговскими решетками для различных длин волн в сердцевине и наружными управляющими электродами. Спектральные характеристики коэффициентов отражения первой (кривая 1) и второй (кривая 2) брэгговских решеток (рис. 2, *a*) должны быть сдвинуты друг относительно друга на величину, равную разности ширины главного максимума спектральной характеристики и его участка, на котором коэффициент отражения растет от нуля до величины, определяемой лучевой прочностью кольцевого резонатора.

Микрорезонаторы Фабри–Перо могут быть выполнены в виде полосковых линий с наружными электродами для различных длин волн. Спектральные характеристики коэффициентов отражения первого (кривая 1) и второго (кривая 2) микрорезонаторов (рис. 2, *b*) должны быть сдвинуты друг относительно друга на величину, соответствующую коэффициенту отражения, определяемому лучевой прочностью кольцевого резонатора. Электрооптический фазовый элемент может быть выполнен как в виде отрезка электрооптического волокна, так и в виде полосковой линии из электрооптического материала с наружными управляющими электродами.

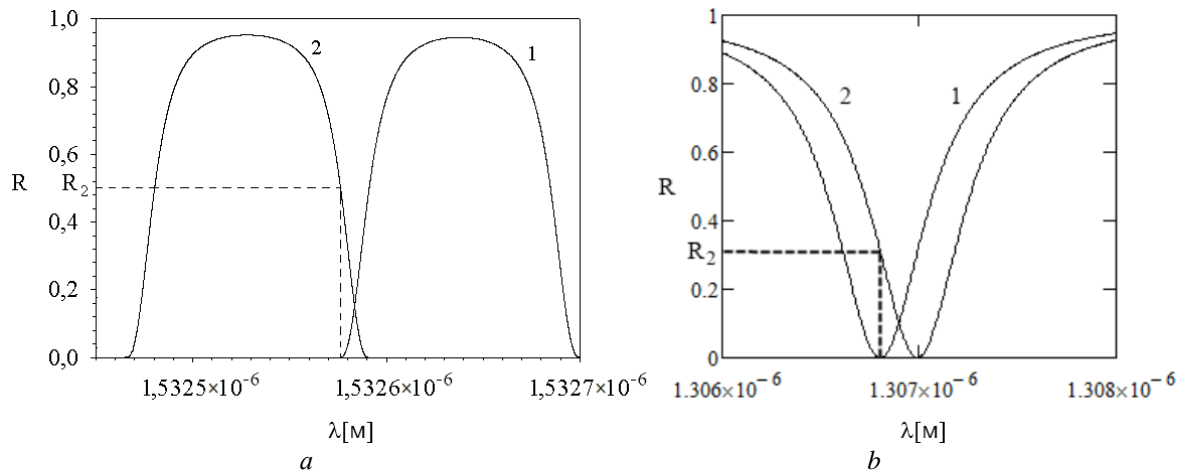


Рис. 2. Главные максимумы спектральных коэффициентов отражения: *a* – первой и второй брэгговских решеток; *b* – первого и второго резонаторов

Fig. 2. The main maxima of the spectral reflection coefficients: *a* – of the first and second Bragg gratings; *b* – of the first and second resonators

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим основные закономерности функционирования такого амплитудного модулятора. В исходном состоянии коэффициент отражения первого электрооптического управляемого отражателя минимален, то есть $R_1 = 0$, а второго – имеет значение, отличное от нуля ($R_2 \neq 0$), определяемое величиной интенсивности света I_{\max} , которую еще выдерживает резонатор.

Поэтому постоянное световое излучение с амплитудой E_0 , поступающее на вход резонатора, последовательно проходит через первый, второй Y-образные разветвители, первый электрооптический управляемый отражатель, третий Y-образный разветвитель, второй электрооптический управляемый отражатель, электрооптический фазовый элемент на следующий цикл прохождения по кольцевому резонатору и т. д. При этом в результате многолучевой интерференции в кольцевом резонаторе на выходе второго Y-образного разветвителя мы будем иметь световое поле с амплитудой электрического вектора E_k , равной:

$$E_k = \frac{E_0}{1 - \sqrt{T_k T_p} e^{i\delta}}, \quad (1)$$

где T_k – энергетический коэффициент светопропускания кольца резонатора; T_p – энергетический коэффициент суммарного светопропускания электрооптических управляемых отражателей, который в исходном состоянии равен коэффициенту пропускания второго электрооптического управляемого отражателя T_2 , то есть $T_p = T_2$; δ – разность фаз между интерферирующими в резонаторе световыми волнами.

Следовательно, интенсивность света на выходе второго Y-образного разветвителя I_k можно определить из выражения, имеющего следующий вид:

$$I_k = E_k E_k^* = \frac{I_0}{1 + T_k T_p - 2\sqrt{T_k T_p} \cos \delta}. \quad (2)$$

Так как максимальная величина интенсивности света I_k определяется величиной интенсивности света I_{\max} , которую еще выдерживает кольцевой резонатор, то, решая уравнение (2), при условии $\delta = 0$, можно определить максимальную величину коэффициента пропускания второго электрооптического управляемого отражателя T_p , которая будет определяться выражением

$$T_p = \frac{\left(1 - \sqrt{\frac{I_0}{I_{\max}}}\right)^2}{T_k}. \quad (3)$$

Выражение для определения интенсивности света на втором выходе третьего Y-образного разветвителя, отраженного от второго электрооптически управляемого отражателя I_p будет иметь следующий вид:

$$I_p = \frac{I_0 R_2}{1 + T_k T_p - 2\sqrt{T_k T_p} \cos \delta}, \quad (4)$$

где $R_2 = 1 - T_2$ – коэффициент отражения второго электрооптически управляемого отражателя 6.

Со второго выхода третьего Y-образного разветвителя отраженный световой поток падает на фотоприемник цепи обратной связи, на выходе которого появляется сигнал пропорциональный интенсивности света в кольце резонатора. Этот сигнал поступает на вход блока управления коррекцией длины оптического пути резонатора. Последний вырабатывает управляющий электрический сигнал, поступающий на электрооптический фазовый элемент, который корректирует длину оптического пути кольцевого резонатора. Эта длина должна быть кратна длине волны распространяющегося по кольцу резонатора излучения λ , что обеспечивает в резонаторе необходимый стабильный уровень световой энергии.

При одновременной подаче на управляющие электроды первого и второго электрооптически управляемых отражателей управляющих сигналов свет поступает через первый и второй Y-образные разветвители к первому электрооптически управляемому отражателю. Управляющее напряжение, подаваемое на их электроды, изменяет показатель преломления электрооптического материала по закону

$$n = n_e + \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} \frac{U}{d}, \quad (5)$$

где n_e – показатель преломления необыкновенной волны в электрооптическом материале, U – приложенное напряжение, d – расстояние между управляющими электродами (ширина волновода), r_{33} – электрооптический коэффициент. Изменение показателя преломления приводит к смещению спектральной характеристики коэффициента отражения, а следовательно, к соответствующему изменению длины световой волны λ_{p1} , при которой отражение от первого электрооптически управляемого отражателя минимально. Поэтому величина интенсивности света на выходе первого электрооптически управляемого отражателя будет падать в зависимости от величины прикладываемого управляющего напряжения. Отраженный от первого электрооптически управляемого отражателя световой поток поступает в обратном направлении через второй Y-образный разветвитель к первому, через который направляется на выход в качестве модулируемого сигнала I . Величину интенсивности этого сигнала можно определить из выражения

$$I = \frac{I_0 R_1}{1 + T_k T_p - 2\sqrt{T_k T_p} \cos \delta}, \quad (6)$$

где $R_1 = 1 - T_2$ – коэффициент отражения первого электрооптически управляемого отражателя.

Свет, прошедший через первый электрооптически управляемый отражатель, поступает через третий Y-образный разветвитель на второй электрооптически управляемый отражатель. Управляющее напряжение, подаваемое на его управляющие электроды, изменяет показатель преломления электрооптического материала по такому же закону (5), как и в первом электрооптически управляемом отражателе. Изменение показателя преломления приводит к смещению спектральной характеристики коэффициента отражения, а следовательно, к соответствующему изменению длины световой волны λ_{p2} , при которой отражение от второго электрооптически управляемого отражателя минимально. Поэтому величина интенсивности отраженного света на втором выходе второго электрооптически управляемого отражателя будет уменьшаться в зависимости от величины прикладываемого управляющего напряжения,

что обеспечивает необходимый стабильный уровень световой энергии в кольцевом резонаторе, так как на электрооптический материал электрооптических управляемых отражателей воздействует электрическое поле одной и той же величины.

Расчеты показывают, что для излучения с резонансной длиной волны существует максимум интенсивности света на выходе модулятора (рис. 3). По мере увеличения потерь в кольцевом резонаторе максимум интенсивности излучения смещается в сторону меньших значений коэффициента суммарного светопропускания электрооптических управляемых отражателей, а его величина – уменьшается.

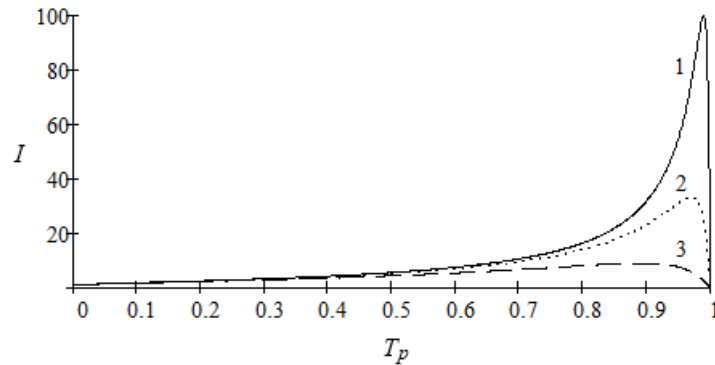


Рис. 3. Зависимость относительной интенсивности света на выходе амплитудного электрооптического модулятора на базе многолучевой интерференции от коэффициента суммарного светопропускания электрооптических управляемых отражателей при различных потерях в кольцевом резонаторе: 1 – 1 %; 2 – 3 %; 3 – 10 %

Fig. 3. The dependence of the relative light intensity at the output of the amplitude electro-optical modulator based on multipath interference on the total transmittance of electro-optical controlled reflectors at various losses in the ring resonator: 1 – 1 %; 2 – 3 %; 3 – 10 %

На рис. 4 приведена зависимость относительной интенсивности света на выходе модулятора от напряжения, приложенного к электрооптическому материалу управляемых отражателей при $T_p = 0,81$, которая имеет линейный характер.

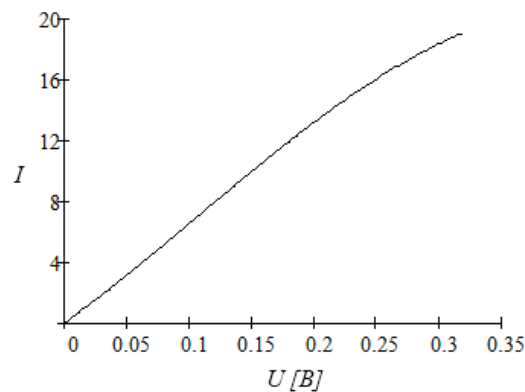


Рис. 4. Зависимость относительной интенсивности света на выходе модулятора от напряжения, приложенного к электрооптическим управляемым отражателям при $T_p = 0,81$
Fig. 4. The dependence of the relative light intensity at the output of the modulator on the voltage applied to the electro-optical controlled reflectors at $T_p = 0.81$

Заключение

Таким образом, рассмотренный метод амплитудной модуляции позволяет реализовать амплитудную модуляцию излучения на выходе кольцевого резонатора, имеющего два выхода, за счет управления его искусственными световыми потерями, при обеспечении в нем постоянного необходимого уровня световой энергии, что позволяет достичь значительно меньшей величины требуемого управляющего электрического напряжения,

чем у существующих электрооптических модуляторов. Амплитудный модулятор, реализующий этот метод, имеет линейную светомодуляционную характеристику и может обладать управляющим напряжением как минимум на один порядок меньшим, чем существующие амплитудные модуляторы любых типов. Кроме того, благодаря когерентному суммированию амплитуд интерферирующих световых волн он обладает еще усилением излучения с резонансной длиной волны. Следовательно, для такого модулятора требуемая управляемая электрическая мощность составит величину, как минимум, на один порядок меньшую, чем у существующих в настоящее время, что существенно расширяет его рабочий частотный диапазон.

Список литературы

1. Мустель Е.П., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука; 1970.
2. Нагибина И.М. Интерференция и дифракция света. Ленинград: Машиностроение, 1985.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука; 1973.
4. Миrowsкий Д.И., Будагян И.Ф. Микроволноводная оптика и голография. М.: Наука; 1983.

References

1. Mustel E.R., Parygin V.N. [*Metody moduljacji i skanirvanija sveta*]. M.: Nauka; 1970. (In Russ.)
2. Nagibina I.M. [*Interferencija i difracija sveta*]. Leningrad: Maschinostroenie, 1985. (In Russ.)
3. Born M., Wolf E. [*Osnovy optiki*]. M.: Nauka; 1973. (In Russ.)
4. Mirowicki D.I., Budagian I.F. [*Microwolnowodnaja optika i golografija*]. M.: Nauka; 1983. (In Russ.)

Сведения об авторах

Конойко А.И., к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник лаборатории фотоэлектроники ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».

Information about the authors

Kanojka A.I., PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the Photoelectronics Laboratory of SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology".

Адрес для корреспонденции

220090, Республика Беларусь,
г. Минск, Логойский тракт, д. 22,
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника
и лазерная техника»
тел. +375-44-746-63-72;
e-mail: kon54@yandex.by
Конойко Алексей Иванович

Address for correspondence

220090, Republic of Belarus,
Minsk, Logoyskiy tract, 22,
SSPA "Optics, Optoelectronics
and Laser Technology"
tel. +375-44-746-63-72;
e-mail: kon54@yandex.by
Kanojka Alexey Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-21-28>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 531.7+621.56+608.4+796.028

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЛЬДА

ДАВЫДОВ М.В.¹, БЕЛОУС П.А.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 15 апреля 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В статье представлены результаты оценки качества льда в зависимости от различных условий окружающей среды и подготовки льда. Выявлены оптимальные показатели исследуемых величин, влияющих на качество ледовой поверхности. Цель исследования – определение зависимости коэффициента трения скольжения от параметров водоподготовки, условий намораживания ледовой поверхности, ее температуры, твердости и других параметров, которые можно менять в условиях спортивной арены для конькобежного спорта и выбирать сочетание, что обеспечивает наименьший коэффициент трения скольжения. Для объективной оценки скоростных качеств льда использовали устройства, имитирующие скольжения конькобежца за счет перемещения подвижной платформы, установленной на лезвиях коньков, снабженной модулем, передающим на персональный компьютер регистрируемые значения параметров трения-скольжения коньков с ледовой поверхностью. Для измерения пройденного расстояния устройства использовался метод лазерной дальнометрии. Показана эффективность разработанного устройства и методики его применения для оценки качества льда. Рассматривается влияние температуры поверхности льда, температуры воздуха, температуры заливаемой воды, влажности воздуха на качество ледовой поверхности. Учет этих показателей при проведении соревнований позволяет создавать «быстрый» лед для демонстрации высоких спортивных результатов. Наилучшие значения дальности пробега устройства были зафиксированы при следующих параметрах: температура поверхности льда – от $-3,5$ до $-4,5$ °С, температура бетонной плиты – -6 °С, толщина льда – 27–29 мм, температура заливаемой воды – 50–55 °С, срезание верхнего слоя льда ледозаливочной машиной – 100 %. Наихудшие значения дальности пробега устройства получены при следующих параметрах: температура поверхности льда – от $-5,3$ до $-5,4$ °С, температура заливаемой воды – 30–35 °С, срезание верхнего слоя льда ледозаливочной машиной не осуществлялось.

Ключевые слова: качество льда, технологии подготовки льда, коэффициент трения скольжения, скользкость льда.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Давыдов М.В., Белоус П.А. Автоматизированное устройство для оценки качества поверхности льда. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 21-28.

AUTOMATED DEVICE FOR ICE SURFACE QUALITY ASSESSMENT

MAXIM V. DAVYDOV¹, PAVEL A. BELOUS²

¹*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

²*Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 15 April 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Results of ice quality assessment depending on various conditions of the environment and ice preparation are presented in article. The optimum indicators of the studied values influencing the ice surface quality are revealed. It is possible to estimate ice speed qualities objectively with the device, that imitates skater sliding. The purpose of the study is to determine the dependence of the sliding friction coefficient on the parameters of water treatment, the conditions for freezing the ice surface, the temperature of the ice surface, hardness and other parameters. The imitation is the movement of the mobile platform mounted on skates, supplied with the module transferring to the personal computer the values of skates sliding on the ice surface friction parameters. To measure the distance traveled by the device, the laser ranging method was used. The efficiency of the developed device and the technique of its application for assessment of ice quality on sports arenas are shown. The dependences of the quality of the ice surface on the surface temperature of the ice, air temperature, temperature of the poured water are considered. Accounting of these indicators during competitions allows to create «fast» ice for high sports results demonstration. The best values of the range of the device were recorded with the following parameters: ice surface temperature – from –3,5 to –4,5 °C, concrete slab temperature – –6 °C, ice thickness – 27–29 mm, filled water temperature – 50–55 °C, cutting the top layer of ice with an ice-filling machine – 100 %. The worst values of the range of the device were obtained with the following parameters: ice surface temperature – from –5,3 to –5,4 °C, filled water temperature – 30–35 °C, the top layer of ice was not cut by an ice-filling machine.

Keywords: ice preparation technology, ice quality, sliding friction coefficient, ice slipperiness.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Davydov M.V., Belous P.A. Automated device for ice surface quality assessment. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 21-28.

Введение

Эффективность работы спортивных комплексов сегодня во многом определяется состоянием качества льда, от которого в значительной степени зависят результаты выступлений спортсменов. В настоящее время в Республике Беларусь функционирует ряд уникальных спортивных сооружений, на которых возможно проведение крупнейших международных соревнований по всем без исключения ледовым видам спорта. Для демонстрации высоких спортивных результатов требуется очень качественный лед, обеспечить который возможно только современными технологиями подготовки ледовой поверхности.

На создание искусственного ледового покрытия толщиной 37–40 мм специалистами обычно затрачивается около 100 часов рабочего времени [1–3]. При этом качество льда зависит не только от различных специфических добавок, но и от таких параметров, как температура бетонной плиты и температура поверхности льда. На каждую дистанцию забега конькобежцев должен быть свой подбор оптимальных параметров температуры льда [4–5]. В соответствии с правилами международного союза конькобежцев установленные условия не должны меняться на протяжении тренировок и соревнований спортсменов. Состояние конькобежного льда, в отличие от хоккейного и льда для фигурного катания, оценивается результативностью спортсмена – временем прохождения дистанции.

Для демонстрации высоких спортивных результатов в скоростном беге на коньках необходимы не только технически выверенные движения, но и условия, при которых конькобежцы смогли бы превзойти свои личные и официальные рекорды. На значимых международных соревнованиях борьбу между собой ведут не только спортсмены, но и ледовые спортивные центры. У спортивных арен, так же как и спортсменов, есть свои сильные и слабые стороны, репутация и рейтинги. Каждый спортивный комплекс стремится создать качественную ледовую поверхность, которая позволит установить рекорды. В современных комплексах можно управлять температурой и влажностью воздуха, что позволяет оптимизировать скоростные свойства поверхности льда и структуру его массива. В результате этого на аренах крытых катков конькобежцы существенно улучшили свои результаты.

Для того чтобы подготовить качественный лед с заданными характеристиками, необходимо знать параметры, от которых эти характеристики зависят. Существуют исследования, в которых рассматривают, на сколько зависит трение скольжения конька от наклона плоскости лезвия, от шлифовки лезвия при одной и той же нагрузке на коньки, от заточки лезвия конька [6]. Одной из важнейших характеристик качества льда является скользкость. Известно, что скользкость льда определяют следующие параметры:

- коэффициент трения скольжения (μ);
- сила трения скольжения ($F_{\text{тр.ск}}$);
- сила сопротивления скольжению конька ($F_{\text{с.ск}}$) [7, 8].

Лед должен быть как скользким (с минимальным коэффициентом трения скольжения), так и твердым. Коэффициент трения скольжения является характеристикой процесса, поэтому его нельзя рассматривать как некоторую неизменную величину.

Также на качество льда оказывают влияние такие показатели, как: величина отклонений от плоскости ледовой поверхности; твердость льда; распределение твердости, температуры по глубине льда от поверхностного слоя до бетонной плиты; толщина льда; температура воздуха над ледовой поверхностью; влажность воздуха [9, 10].

Измерение коэффициента трения скольжения различных материалов осуществляется разными способами и приборами. Однако в случае определения коэффициента трения скольжения конька о ледовую поверхность в условиях спортивного сооружения традиционные приборы и методы измерений неприемлемы. При исследовании коэффициента трения скольжения конька о лед должны учитываться различные факторы внешней среды, влияющие на качество проводимых измерений. Это возможно при использовании специализированных аппаратно-программных средств, устанавливаемых на лезвия коньков, приводимых в движение силовым импульсом отстрелочного механизма, связанного беспроводным каналом с подвижным модулем устройства, передающим на персональный компьютер информацию, отражающую значения параметров трения скольжения коньков с ледовой поверхностью.

Методика измерений и применяемое оборудование

Состояние ледовой поверхности может существенно влиять на скорость передвижения спортсменов по дистанции. Для того чтобы не допускать ухудшения скоростных качеств льда, необходимо вести мониторинг его состояния. В этих целях авторами использовалось устройство, имитирующее скольжение конькобежца. Устройство позволяет проводить испытания с удельными нагрузками на лезвие конька, близкими к реальным нагрузкам на лед при движении спортсмена. Скользкость льда определяется на основании коэффициента трения скольжения, который рассчитывается в результате изменения дальности пробега платформы на коньках при одном и том же начальном силовом импульсе. Коэффициент трения

скольжения рассчитывался по формуле $\mu = \frac{a}{g}$, где a – среднее ускорение движения платформы

по льду; g – ускорение свободного падения, при этом ускорение a определялось по формуле

$$a = \frac{V_2 - V_1}{\Delta t}.$$

Устройство для определения скользкости льда на спортивных аренах, представленное на рис. 1, состоит из двух платформ и лазерной системы, первая платформа – неподвижная,

устанавливается на ледовую поверхность, вторая – подвижная, опирающаяся на коньки и предназначенная для движения по льду под действием импульса силы, полученного от неподвижной платформы.

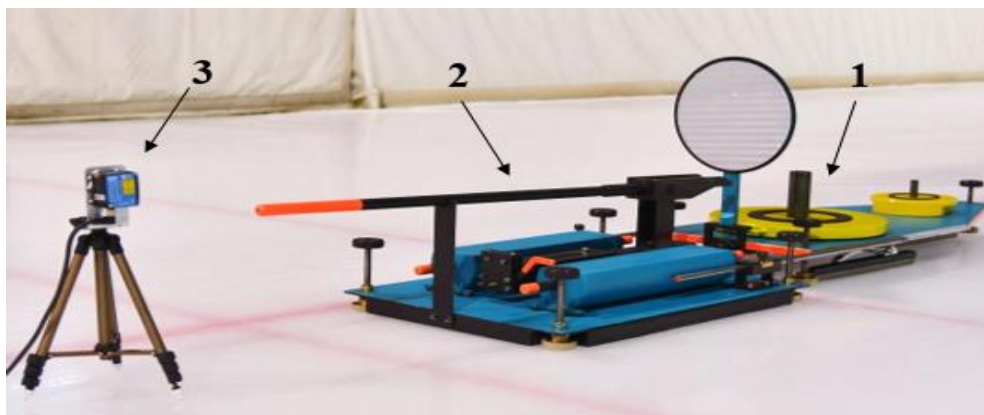


Рис. 1. Внешний вид устройства:

1 – подвижная платформа; 2 – неподвижная платформа; 3 – лазерная система

Fig. 1. – Appearance of the device:

1 – mobile the platform; 2 – fixed platform; 3 – laser system

Для того чтобы подготовить качественное ледовое поле с заданными характеристиками, необходимо знать параметры окружающей среды, при которых значения коэффициента трения скольжения будут минимальными. С этой целью проводились исследования на конькобежном стадионе МКСК «Минск-Арена» при изменяющихся условиях и технологиях подготовки льда, которые заключались в определении значимых факторов внешней среды, способных влиять на состояние ледовой поверхности. Изменяемыми факторами являлись: режимы работы заливочной машины, температура поверхности льда, температура и количество воды при заливке, освещенность ледовой арены. Неизменными факторами являлись: температура воздуха на трибунах (от 12 до 13 °), влажность воздуха (50–55 %), положение вентиляционных диффузоров системы кондиционирования воздуха (45 °).

Всего было проведено 400 измерений дальности пробега подвижной платформы скользяметра (по 15–20 отстрелов на один заливочный цикл при известных условиях окружающей среды и заданных параметрах заливки льда). Во время каждого измерения определялась температура поверхности льда. Измерения длины пробега устройства проводились через каждые 3 минуты в течение 60 минут.

Результаты и их обсуждение

При сопоставлении результатов измерений были рассчитаны средние значения дальности пробега и коэффициента трения скольжения.

Расчет коэффициента трения скольжения проводился по результатам изменения скорости движения платформы на 10-метровом отрезке пути, начиная с 5-го метра движения платформы. Выбор такого расчетного отрезка обоснован исключением влияния начального импульса силы, создаваемого отстрелочным механизмом при выталкивании подвижной платформы. После 15-го метра пути отмечалось значительное увеличение коэффициента трения скольжения, что явилось основанием для исключения из дальнейшего анализа зарегистрированных показателей движения платформы.

В табл. 1 указаны условия, при которых были зафиксированы значения наибольшей и наименьшей дальности пробега платформы устройства ($S_{\text{ср}} \pm \sigma$) за один заливочный цикл (№ усл.), соответственно наименьшие и наибольшие значения коэффициента трения скольжения ($\mu_{\text{ср.тр}} \pm \sigma$). При этом учитывались установленные параметры окружающей среды, как наиболее оптимально влияющие на качество льда: температура бетонной плиты ($t_{\text{пл}}$), температура поверхности льда при выполнении первой попытки ($t_{\text{льда}}$), толщина льда (H), температура воздуха на расстоянии 1,2 м от поверхности льда ($t_{\text{возд.}}$), освещенность (E). Устанавливались параметры подготовки ледовой поверхности: степень открытия вентиля

машины для заливки льда при подаче воды в процессе заливки (кол-во воды), степень срезания верхнего слоя льда (степень срез.), температура заливаемой воды ($t_{\text{воды}}$). Количество измерений (отстрелов) при заданных условиях (n), время после заливки (T).

Таблица 1. Параметры ледовой поверхности
Table 1. Ice surface parameters

№ усл.	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{льда}}, ^\circ\text{C}$	H , мм mm	$t_{\text{возд.}}, ^\circ\text{C}$	Кол-во воды, %	$t_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	T , мин min	Степень срез. %	E , люкс lx	n	$S_{\text{ср}} \pm \sigma$, мм mm	$\mu_{\text{ср.тр}} \pm \sigma$
Низкие значения дальности пробега устройства и высокие значения коэффициента трения скольжения The worst values of range of a run of a device and coefficient of a sliding friction												
10	-6	-5,3	28	12,8	100	30	20	0	55	15	15473±933	0,0055±0,0003
11	-6	-5,4	29	12,5	100	35	10	100	55	20	17091±527	0,0046±0,0004
Высокие значения дальности пробега скользяметра и низкие значения коэффициента трения скольжения The best values of range of a run of a device and coefficient of a sliding friction												
12	-6	-4,3	29	13,2	50	48	15	100	30	20	22279±2150	0,0033±0,0004
13	-6	-4,5	27	12,0	50	52	10	100	10	20	24195±1110	0,0027±0,0002
14	-6	-3,5	27	12,0	50	55	13	50	20	20	23293±2510	0,0031±0,0004
15	-6	-4,5	27	12,8	100	51	15	50	20	20	23713±1112	0,0030±0,0002

На рис. 2 отображены результаты изменения дальности пробега скользяметра от времени после заливки льда. Во внимание принимались показатели 15–20 измерений на один заливочный цикл.

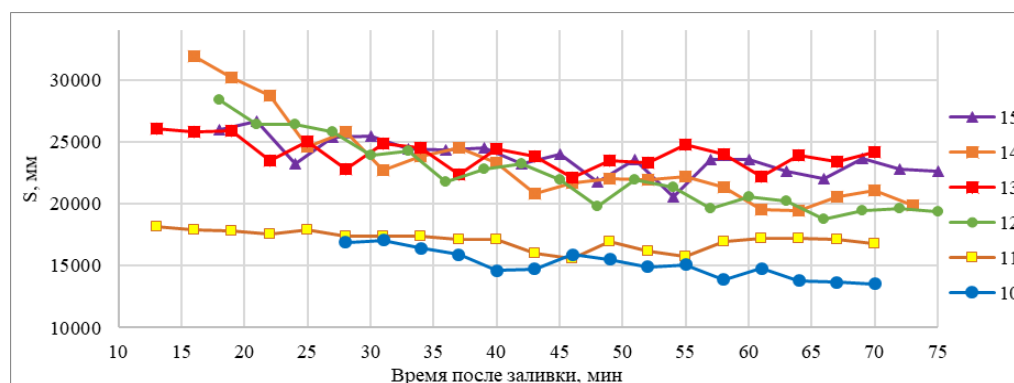


Рис. 2. Зависимость дальности пробега устройства от времени после заливки льда.

Числа 10–15 в легенде графика отражают номер технологической карты с заданными параметрами окружающей среды и параметрами заливки (№ усл. в табл. 1)

Fig. 2. Dependence of the distance covered by the device on the time elapsed after ice preparation 10–15 in the chart legend mean number of the process list with the set of the environment parameters and the ice preparation parameters (№ parameters in table 1)

Полученные данные свидетельствуют о том, что скользящие свойства льда непостоянны, причем в течение одного заливочного периода с увеличением времени после заливки льда они ухудшаются. Динамика показателей дальности пробега скользяметра при различных условиях окружающей среды и параметрах заливки представлена в виде графиков на рис. 2. Из графиков видно, что наибольшие значения дальности пробега наблюдаются в первых 3 попытках (20 минут после заливки льда), в них достигается максимум скользящих свойств. В этот момент времени уменьшается гидравлическое сопротивление жидкой пленки льда и происходит незначительное снижение интенсивности молекулярного взаимодействия между коньком и льдом. Начиная с 23-й минуты скользкость льда постепенно снижается, этому соответствует понижение температуры поверхности льда, изменение твердости верхнего слоя и увеличение коэффициента трения скольжения (рис. 3). Через 35 минут после заливки температура поверхности приближается к температуре основного ледового массива, при этом достаточно стабильно сохраняются скользящие свойства льда (рис. 4). Через 55 минут с момента последней заливки происходит ухудшение условий скольжения, уменьшается дальность пробега устройства: на поверхности льда появляется шероховатость, механические повреждения, микронеровности.

Изменение температуры заливаемой воды и глубины срезания верхнего слоя существенно повлияли на качество ледовой поверхности (№ усл. – 10, 11) (табл. 1). При этих условиях выполняли заливку поверхности льда водой с температурой от +30 до +35 °С, в результате этого на протяжении измерений дальности пробега скользяметра температура льда снижалась до –6,6 °С (рис. 4). При условиях № 10 тонкослойная подрезка верхнего слоя льда с помощью льдуборочной машины не осуществлялась. При этих параметрах заливки были зафиксированы самые худшие результаты дальности пробега, что свидетельствует об увеличении коэффициента трения скольжения (рис. 3).

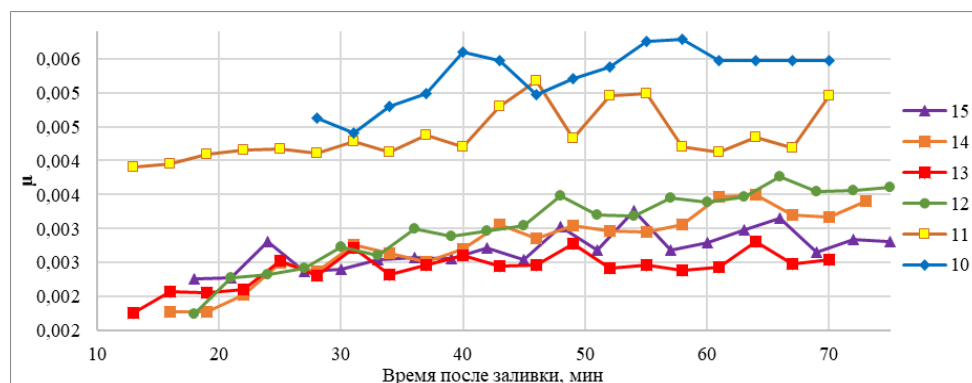


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения скольжения от времени после заливки льда
Fig. 3. Dependence of the sliding friction coefficient on the time elapsed after ice preparation

По мере снижения температуры возрастает коэффициент трения, лед при этом становится более жестким, площадь соприкосновения лезвия конька со льдом уменьшается. Скорость изменения температуры поверхности льда зависит от скорости изменения температуры хладоносителя, от толщины бетонной плиты, от толщины льда и возможностей системы кондиционирования воздуха. Изменение температуры льда от времени после заливки может существенно повлиять на время прохождения дистанции спортсменами. В пределах одного этапа соревнований (особенно на длинных дистанциях) температура поверхности льда всей беговой дорожки или ее части может изменяться от долей до единиц градуса, что, в свою очередь, может привести к значительному изменению скользкости льда.

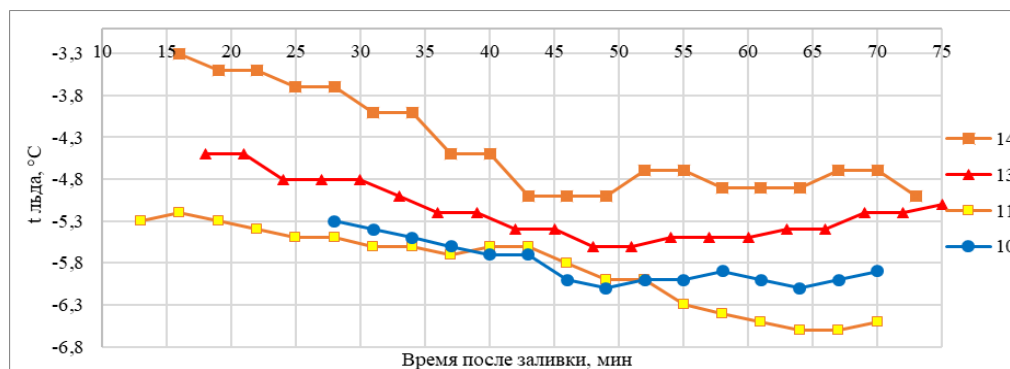


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности льда от времени после заливки
Fig. 4. Dependence of the ice surface temperature on the time elapsed after ice preparation

В результате эксперимента по определению качества льда с применением скользяметра на конькобежном стадионе МКСК «Минск-арена» были выявлены характерные величины коэффициента трения скольжения (μ) спортивного льда при разных условиях. Наименьшие значения этого коэффициента были зафиксированы при следующих параметрах: температура поверхности льда – от –3,5 до –4,5 °С, температура бетонной плиты – –6 °С, толщина льда – 27–29 мм, температура заливаемой воды – 50–55 °С, срезание верхнего слоя льда ледозаливочной машиной – 100 %. Наибольшие значения коэффициента трения скольжения получены при следующих параметрах: температура поверхности льда – от –5,3 до –5,4 °С,

температура заливаемой воды – 30–35 °С, срезание верхнего слоя льда ледозаливочной машиной не осуществлялось.

Заключение

На основании результатов исследований определены технически корректные требования к физико-механическим свойствам льда, обеспечивающим наилучшее скольжение конька по льду. Проведенные исследования с использованием разработанного устройства позволили выявить закономерности в изменении скользящих свойств от времени после заливки льда. Через некоторое время после заливки льда ухудшение его скользящих свойств происходит, вероятнее всего, из-за конденсации влаги из воздуха. Влага, выпавшая в виде инея, постепенно создает шероховатость льда. Накопление конденсации влаги напрямую зависит от температуры воздуха, льда и от влажности воздуха. Для подтверждения этого необходимо провести дополнительные исследования, связанные с изменением влажности воздуха на спортивной арене.

Успех проведения международных соревнований на ледовых спортивных аренах и уровень показанных конькобежцами результатов базируются на многих взаимосвязанных компонентах, основным из которых является качество ледовой поверхности. Поэтому применение специальных устройств для оценки скользкости льда позволит приблизиться к разработке технологий «сверхбыстрого льда», способствующих установлению рекордных результатов при проведении международных соревнований самого высокого ранга. Использование этих технологий в тренировочном процессе, в свою очередь, окажет непосредственное влияние на качество технической подготовки спортсменов в видах спорта, в которых движения осуществляются через соприкосновение коньков с ледовой поверхностью.

Список литературы

1. Гончарова Г.Ю., Кузнецов Б.А., Артемов Е.Д. Сверхбыстрый лед: от иллюзии к реальности. *Холодильный бизнес*. 2005;1:24-30.
2. Baurle L., Kaempfer T.U., Szabó D., Spencer N.D. Sliding friction of polyethylene on snow and ice. Contact Area and Modeling. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2007;47(3):276-289. DOI: 10.1016/j.coldregions.2006.10.005.
3. Шавлов А.В., Рябцева А.А., Шавлова В.А. «Сверхскользящий» лед для конькобежного спорта. *Криосфера Земли*. 2007;2:49-59.
4. Kuroiwa D. The kinetic friction on snow and ice. *Journal of Glaciology*. 1977;19(81):141-152. DOI: 10.3189/S0022143000029233.
5. Bakker F. редакторы: Gemser H., Koning J. *Handboek wedstrijd schaatsen*. 01. Leeuwarden: Eisma Businessmedia bv; 1998.
6. Kennedy F.E., Schulson E.M., Jones D.E. The friction of ice on ice at low sliding velocities. *Philos. Mag.* 2000;80(5):1093-1110. DOI: 10.1080/01418610008212103.
7. Кривошеев В.И. Определение коэффициента трения стали по льду конькобежного центра. *Теория и практика физической культуры*. 2012;5:102-104.
8. Tusima K., Kiuchi T. Development of high speed ice skating rink. *J. Jap. Soc. of Snow and Ice*. 1998;60(5):349-356. DOI: 10.5331/seppyo.60.349.
9. Liang H., Martin J.M., Mogne T.L. Experimental investigation of friction on low-temperature ice. *Acta Mater.* 2003;51:2639-2646. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00061-2.
10. Kietzig A.M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P. Physics of ice friction. *J. Appl. Phys.* 2010;107(8):2-15. DOI: 10.1063/1.3340792.

References

1. Goncharova G.U., Kuznecov B.E., Artemov E.D. [Superfast ice: from illusion to reality]. *Journal Holodil'nyj biznes= Journal Holodil'nyj biznes*. 2005;1:24-30. (In Russ.)
2. Baurle L., Kaempfer T. U., Szabó D., Spencer N.D. Sliding friction of polyethylene on snow and ice. Contact Area and Modeling. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2007;47(3):276-289. DOI: 10.1016/j.coldregions.2006.10.005.
3. Shavlov A.B., Rjabceva A.A., Shavlova V.A. [Superslippery ice for speed skating]. *Kriosfera Zemli= Kriosfera Zemli*. 2007;2:49-59. (In Russ.)

4. Kuroiwa D. The kinetic friction on snow and ice. *Journal of Glaciology*. 1977;19(81):141-152. DOI: 10.3189/S0022143000029233.
5. Bakker F. editors: Gemser H., Koning J. *Handboek wedstrijd schaatsen*. 01. Leeuwarden: Eisma Businessmedia bv; 1998.
6. Kennedy F.E., Schulson E.M., Jones D.E. The friction of ice on ice at low sliding velocities. *Philos. Mag.* 2000;80(5):1093-1110. DOI: 10.1080/01418610008212103.
7. Krivosheev V.I. [Determination of coefficient of friction became on ice of the skating center] *Teorija i praktika fizicheskoj kul'tury = Teorija i praktika fizicheskoj kul'tury*. 2012;5:102-104. (In Russ.)
8. Tusima K., Kiuchi T. Development of high speed ice skating rink. *J. Jap. Soc. of Snow and Ice*. 1998;60(5):349-356. DOI: 10.5331/seppyo.60.349.
9. Liang H., Martin J.M., Mogne T. L. Experimental investigation of friction on low-temperature ice. *Acta Mater.* 2003;51:2639-2646. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00061-2.
10. Kietzig A.M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P. Physics of ice friction. *J. Appl. Phys.* 2010;107(8):2-15. DOI: 10.1063/1.3340792.

Вклад авторов

Давыдов М.В. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, а также принимал участие в интерпретации их результатов.

Белоус П.А. разработал методику проведения исследования с применением аппаратно-программного комплекса, разработал протоколы исследования. Производил экспериментальное исследование по всем условиям созданных технологических карт. Осуществил сравнительный анализ полученных данных.

Authors contribution

Davydov M.V. has identified the tasks that needed to be solved during the research, and also participated in the interpretation of the research results.

Belous P.A. has developed a research methodology using a hardware-software complex, developed research protocols. He carried out an experimental study on all the conditions of the created technological maps. Carried out a comparative analysis of the data.

Сведения об авторах

Давыдов М.В., к.т.н, доцент, проректор по учебной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Белоус П.А., аспирант кафедры «Спортивная инженерия» спортивно-технического факультета Белорусского национального технического университета.

Information about the authors

Davydov M.V., Ph.D, Associate Professor, Vice Rector for Academic Affairs of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Belous P.A., Post-Graduate Student of Sports Engineering Department of Belarusian National Technical University.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, пр-т Независимости, д. 67, к. 206,
Белорусский национальный
технический университет
тел. +375-29-155-32-50;
e-mail: ilpavel94@gmail.com
Белоус Павел Александрович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosty av., 67, 206,
Belarusian National Technical University
tel: +375-29-155-32-50;
e-mail: ilpavel94@gmail.com
Belous Pavel Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-29-34>

Оригинальная статья
Original paper

UDC 681.142.2

A SEARCHING ALGORITHM FOR TEXT WITH MISTAKES

SARA NASR, OLEG V. GERMAN

The Belarussian State University of Informatics and RadioElectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 17 May 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The paper contains a new text searching method representing modification of the Boyer-Moore algorithm and enabling a user to find the places in the text where the given substring occurs maybe with possible errors, that is the string in text and a query may not coincide but nevertheless are identical. The idea consists in division of the searching process in two phases: at the first phase a fuzzy variant of the Boyer-Moore algorithm is performed; at the second phase the Dice metrics is used. The advantage of suggested technique in comparison with the known methods using the fixed value of the mistakes number is that it 1) does not perform precomputation of the auxiliary table of the sizes comparable to the original text sizes and 2) it more flexibly catches the semantics of the erroneous text substrings even for a big number of mistakes. This circumstance extends possibilities of the Boyer-Moore method by admitting a bigger amount of possible mistakes in text and preserving text semantics. The suggested method provides also more accurate regulation of the upper boundary for the text mistakes which differs it from the known methods with fixed value of the maximum number of mistakes not depending on the text sizes. Moreover, this upper boundary is defined as Levenshtein distance not suitable for evaluating a relevance of the founded text and a query, while the Dice metrics provides such a relevance. In fact, if maximum Levenshtein distance is 3 then how one can judge if this value is big or small to provide relevance of the search results. Consequently, the suggested method is more flexible, enables one to find relevant answers even in case of a big number of mistakes in text. The efficiency of the suggested method in the worst case is $O(nc)$ with constant c defining the biggest allowable number of mistakes.

Keywords: searching algorithm, text processing, finding text with mistakes, fuzzy Boyer-Moore method, metrics of similarity.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Nasr S., German O.V. A searching algorithm for text with mistakes. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 29-34.

Introduction

Text searching methods are widely required in modern text-based applications. Let us note CV (Curriculum Vitae) and paper abstracts processing, extracting an invention formula description from patents, e-mails filtering and so on. The problem is stated generally as answering queries to some text(s). To find an answer different text searching techniques can be applied [1, 2]. Clearly, the efficiency of a text searching technique essentially depends on the text sizes, its structure and presence of syntax mistakes. From this viewpoint, the methods based on text tagging are not suitable if text is poorly organized and unstructured. The keyword-based search methods are not

efficient in large text databases, for instance, on web-servers proposing job offers with billions of files. The regular expression based methods may be not efficient if text contains mistakes as it is difficult (if not possible) to envisage the concrete mistakes in text of different topics. So, we selected sequential text searching approach which seems to be most reasonable in the case of short, poorly organized texts with different topics and especially in case with a lot of text files to be processed. It is the Boyer–Moore method [3] we selected as a prototype in our approach. It can be efficiently used to find a substring in the text with computational complexity estimated as $O(n+m)$ where n is size of the text and m stands for a query length. However, this method presumes exact coincidence of the original substring and those which are being looked for. The methods to find substring occurrences in text with mistakes can be found in [4, 5]. They are different from the Boyer–Moore scheme though. These methods suggest that some constant $k \geq 0$ restricts the utmost mistakes amount. However, it is difficult to define the value of k a priori especially if text is unknown and overloaded with mistakes. We suggest to use two constants $k_2 > k_1 \geq 0$ and organize a fuzzy searching procedure as follows. The modified Boyer–Moore procedure continues till the number of the detected mistakes not exceeds k_2 , otherwise the right-side shift of the query is performed with computed shift value. If the number of mistakes does not exceed k_1 then the searched text word is recognized by means of the modified Boyer–Moore method. If the number of mistakes lays in the diapazone $[k_1 + 1, k_2]$ then the text word is processed with the help of fuzzy comparison based on Dice metrics [6]. If Dice metrics is greater than 0.5 then the answer is found. Otherwise the answer is not found and right-side shift is performed accordingly to the modified Boyer–Moore strategy. We consider a query string as a correct one and modify currently observed substring in the text as a copy of the query. We use Levenstein distance between the strings to estimate their similarity. It is used as a marker signalling that strings (or their parts) are equal or different. The main problem is to define the value of the shift (the number of symbols to omit) to be made if the compared substrings are different. The rest of the paper explains the details of how this and the other details are realized.

The Boyer–Moore algorithm illustration

To be more concrete let us consider the following example.

Text string: *awbsycsdesacscdssqwass*. Substring to find: *sacs*.

Let's consider an approach of Boyer-Moore [3]. First, in the substring to find one defines the number of occurrences of each symbol and their corresponding positions. Thus, with respect to our substring one has: $\langle c - 1(2); a - 1(3), s - 2(1,4) \rangle$. In the round brackets the symbol offsets from the end of the word are placed, for instance, $c - 1(2)$ means that symbol c is encountered only once in the word *sacs* and takes the second position from the right. At the second step the searching procedure starts by sequential comparison of the last symbol in *sacs* (i.e. – s) with the currently observed symbol in the Text string until the coincidence takes place. Thus, we have:

```
a w b s y d e s a c s c d s s q w a s s
s a c s
```

Now let's compare the corresponding symbols from right to left. Because $c \neq b$ the procedure stops. It is possible to shift word *sacs* to the right by 3 positions to superpose the first symbol s in *sacs* with the currently observed symbol s . Indeed, no other symbols s besides the leftmost and the rightmost ones in *sacs* are available. So the next comparison is realized as below

```
awb s y c s d e s a c s c d s s q w a s s
      s a c s
```

etc.

Mistakes in the strings and their correction

The next errors in words are possible:

- S1: a letter is wrong in the given position;
- S2: a letter is omitted;

- *S3*: extra letter is inserted;
- *S4*: two adjacent letters are interchanged

We need some criteria to reveal the above pointed states. Our consideration is restricted with these situations only.

Situation S1. To reveal this situation one needs to read the corresponding next symbols in both compared strings. If those symbols coincide then the resulting answer is YES (true) otherwise – NO (false). The NO answer is generated also if there are no next symbols (in both or some of strings).

Situation S1.

B R I D G E
B R I D D E

Situation S4.

B R I D G E
B R I G D E

Situation S2.

B R I D G E
B R I D E

Situation S3.

B R I D G E
B R I D H G E

While comparing the strings we compute the Levenstein distance between them. We use this distance to come to conclusion that two substrings are different or not. For this, we base ourselves on the experimental results [7] presented in Table 1 and giving value of k_1

Table 1. Definition of k_1

Word size	The uppermost number of text errors – k_1
≤ 3	0
4–6	1
7–8	2
9–10	3
≥ 11	4

We, however, change Table 1 to define k_2 as in Table 2.

Table 2. Definition of k_2

Scanned word size	The uppermost number of text errors – k_2
≤ 3	1
4–6	2
7–8	3
9–10	4
≥ 11	6

The text errors here correspond to situations *S1*, *S2*, *S3*, *S4* described above. The situation *S4* is considered as a single error.

Modified Boyer–Moore algorithm

The idea of method based on [4, 5] can be explained as follows. We try to simulate the Boyer-Moore algorithm comparing symbol by symbol from right to left in both strings with query under the text. The query string is supposed to be written correctly. If symbols do not coincide we admit that some mistake is encountered in the CV-text. We define a type of mistake (situations *S1*, *S2*, *S3*, *S4*). According to the Table 2 we test if the number of mistakes is still admissible, that is lies in diapason $Dp = [0, k_2]$. If the answer is positive, we make suitable shifts in both strings. In this case we replace an erroneous place in the CV-text by a supposedly correct symbol from the query. If the number of mistakes is beyond the diapason Dp we restore the corrected mistakes in the CV-text and make a right-side shift of the query. We explain how to define the shift value below by means of example.

Let us make some illustration for $k_1 = 1, k_2 = 3$.

CV-text: x x x ... x \diamond □□ \diamond □□ Θ Θ Θ Θ ... Θ
query: □□□□□□

We use the symbol □ to designate exactly coinciding symbol with the corresponding one in the query; the symbol \diamond is used to designate a mistaken symbol which was changed; Θ (x) is used to designate the rest right-side (left-side) symbols in the currently observed part of CV. We admit maximum 3 non-coincidences in both substrings. There are 3 mistakes in the example above. So we should compute the Dice distance (metrics) between two strings. Suppose, that the Dice metrics is less than 0.5. This means that we need to make a right-side shift of the query. Now let us suppose that there are no the same (repeating) symbols in the query. Our task is to define the shift value. Let us make one-symbol right-side shift of the query. The situation will change as shown below

CV-text: x x x ... x □ \diamond ? \diamond ? \diamond ? Θ Θ Θ ... Θ
query: □□□□□□

Here we use symbol ? to designate a new position of the symbol which should be tested. As one can see the number of mistakes has not reduced (there are even 4 mistakes designated as \diamond). As we admit maximum 3 mistakes a new shift is required with the following result:

CV-text: x x x ... x □□ \diamond ? \diamond ? \diamond ? \diamond ? Θ Θ ... Θ
query: □□□□□□

This time there remain 3 mistakes. One should compute the Dice metrics again in this new configuration. Suppose the Dice metrics is less than 0.5. Again one symbol right-side shift is required:

CV-text: x x x ... x □□□? \diamond ? \diamond ? \diamond ? \diamond ? Θ Θ ... Θ
query: □□□□□□

Now there are 2 mistakes remained and 5 positions marked with ? to be tested. So, verification should resume with the rightmost symbol ?. The common **rule A** to define shift value when no repeating symbols occur in the pattern can be defined as follows. Let us consider the next configuration

CV-text: x x x ...x \diamond □□ \diamond □□□ Θ Θ Θ Θ ... Θ
query: * □□□□□□

Let there are allowed two symbols \diamond in the upper string. Let * stand for the leftmost symbol in the query. The required shift value to be done defines a new position of the * where the number of \diamond in the text does not exceed the allowable value $k_2 = 2$. This position can be exactly found as it corresponds to the first symbol □ in the text such that total number of \diamond to the right of it does not exceed the allowable amount of mistakes, i.e. 2. Accordingly to this rule we get new configuration as below

CV-text: x x x ... x \diamond □□ \diamond □□ Θ Θ Θ ... Θ
query: *□□□□□□

The shift value is 5.

Suppose now that there are repeating symbols in the query. Let us illustrate the situation as follows

CV-text: x x x ... x \diamond □□ \diamond □□ Θ Θ Θ ... Θ
query: * □ \diamond □□□ \diamond □

We designated repeating symbol as \diamond . One can apply the above given technique for the non-repeating symbols. As before one should define a new position of * with two (or less) pairs \diamond – □ in both strings after *. The desired configuration is shown below

CV-text: x x x ... x \diamond □□ \diamond □□ □ Θ Θ Θ ... Θ
query: *□ \diamond □□□ \diamond □

Again it required of us to make 5 shifts. Notice that configuration preceding the previous one was that one below with 3 mistakes what exceeds the allowed number of mistakes

CV-text: x x x ... x ◊ □□◊◊□□⊖⊖⊖ ... ⊖
query: *□◆□□□□◆□

Here are 3 mistakes and one more right shift is required.

We estimate the worst case complexity of the method for the unrepeating symbols case admitting that the mean number of mistakes allowed is c .

The worst case means $c + 1$ ending miscorrespondings with only one shift to the right each time. This gives $n \cdot (c+1)$ comparisons at the worst. Suppose the query length is $k > 3$. Then at the worst we make k comparisons and 3 shifts to the right. We conclude these considerations with the worst case shown below

CV-text: x x x ... xx xxx◊◊◊⊖ ⊖⊖⊖ ... ⊖
query: □□□□□

Let us suppose that 2 mistakes are allowable and all the mistakes are forming the final subsequence. Evidently, it is possible only one right shift resulting in

CV-text: x x x ... x xx xx???? ⊖⊖⊖ ... ⊖
query: □□□□□

and so on.

Addressing the Dice metrics

Let $k_1 = 1$ and $k_2 = 2$.

1. *a s b c y esaceescdssqwass*
s a c d e

There may be at the most two mistakes. Here are 3. As no repeating symbols are contained in the query the right shift value is 1:

2. *a s b c y e s a ceescdssqwass*
s a c d e

There are 2 mistakes. Accordingly to our algorithm one should find the Dice distance between two strings: *s b c y e* and *s a c d e*. The Dice metrics is defined by the formula $P = \frac{2 \cdot |X \cap Y|}{|X| + |Y|}$,

where $|X|$ ($|Y|$) stands for the set X (Y) size. For example, for $X = s b c y e$ and $Y = s a c d e$ one has $P = 2 \cdot 3 / (5+5) = 0.6$. We adopt the rule accordingly to which two words are considered alike if the Dice measure is 0.5 or greater. From this, in the example above the words X and Y are considered to be the same.

Summarization of the searching procedure can be represented in the next form.

1. At each iteration the procedure compares symbol by symbol from right to left in both strings with query under the text (the query string is supposed to be written correctly).

2. If all symbols in the query have been compared with CV-text fragment (*cvf*) then.

2.1 If the number of mistakes encountered is in diapason $Dp = [0, k_1]$ then *cvf* is accepted as successfully recognized and searching procedure resumes from the next right symbol following *cvf* (if any, otherwise the procedure finishes).

2.2 If the number of mistakes encountered is in diapason $Dp = [k_1+1, k_2]$ then *cvf* is compared with query by means of Dice metrics. If comparison is successful the *cvf* is accepted as successfully recognized and searching procedure resumes from the next right symbol following *cvf* (if any, otherwise the procedure finishes).

2.3 Otherwise (1.1 and 1.2 failed) the algorithm restores the corrected mistakes in the CV-text and makes a right-side shift of the query with resuming searching procedure from step 5.

3. If symbols do not coincide then some mistake is encountered in the CV-text. If the number of mistakes is still admissible, that is, lies in diapason $Dp = [0, k_2]$ the algorithm produces suitable shifts in both strings and replaces an erroneous place in the CV-text by a supposedly correct symbol

from the query. Return to step 2.

4. If the number of mistakes is beyond the diapason Dp the algorithm restores the corrected mistakes in the CV-text and makes a right-side shift of the query.

5. If the rightmost symbol of the query is beyond CV-text then stop searching procedure, otherwise return to step 2.

Conclusion

The suggested method combines techniques of the fuzzy Boyer–Method with verifying string similarity on the basis of Dice metrics. This provides some important advantages in comparison with the Boyer–Moore method as it gives a possibility to increase the number of mistakes in the text and still to preserve the semantics of the original text. The other advantage of the suggested approach in comparison with the known fuzzy versions of the Boyer–Moore method consists in more sensitive regulation of the allowable upper number of errors in the word to be recognized. In existing approaches the number of mistakes is fixed and does not depend on the text length. Moreover, this number is defined in the procedure as Levenstein metrics (i.e. as absolute number of mistakes). This does not help to make a conclusion about processed text relevance to a query (on the contrary, the Dice metrics gives a clear answer). Indeed, if the Levenstein distance is equal to 3, then how one can judge if this number is big or, on the contrary, low. Therefore, the suggested method enables one to decrease k_1 and even increase k_2 to make the recognition process more efficient. The investigation of this and related questions remain the future landmarks of the suggested approach.

References

1. Manning Ch. D., Raghavan P., Schütze H. *An introduction to information retrieval*. Cambridge University Press; 2009.
2. Wu S., Manber U. Fast text searching allowing errors. *Communication of the ACM*. 2001;35:83-91.
3. Gusfield D. *Algorithms on strings, trees and sequences. Computer science and computational biology*. Cambridge university press; 1997.
4. Galil Z., Giancarlo R. Data structures and algorithms for approximate string matching. *Journal of Complexity*. 1988;4:33-72.
5. Gonnet G.H., Baeza-Yates R.A. *Handbook of algorithms and data structures*. Addison-Wesley. 1991.
6. Mandel I. [*Cluster analysis*]. M.: Finansy i statistika; 1988. (In Russ.)
7. Gourine N.I., German O.V. [Intelligent query analyzer to knowledge base of the multimedia electronic tutorial]. *Trudy BGTU=Proceedings of BSTU*. 2010;18(6):167-170. (In Russ.)

Authors contribution

Nasr S. has developed the detailed specification of the fuzzy substring searching method.
German O.V. suggested the common idea of the method.

Information about the authors

German O.V., PhD, Associate Professor of the Information Technologies in Automatized Systems Department of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Nasr S., PG student of Information Technologies in Automatized Systems Department of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220600, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str. 6,
Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics
+375-29-612-42-32;
e-mail: ovgerman@tut.by
German Oleg Vitoldovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-35-42>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 519.16

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ С МНОГОПОЗИЦИОННЫМИ ВИДАМИ МОДУЛЯЦИИ И КОДИРОВАНИЕМ ПО АЛГОРИТМУ РИДА–СОЛОМОНА

ЛИПКОВИЧ Э.Б., КОВШИК В.А., СЕРЧЕНЯ А.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 1 июля 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Целью статьи является разработка аналитических моделей расчета помехоустойчивости и эффективности цифровых систем радиосвязи, использующих многопозиционные виды модуляции (КАМ-М, ФМ-М, ЧМ-М, АМ-М) и блочное кодирование по алгоритму Рида–Соломона (РС) с жестким декодированием. В отличие от известных подходов к определению помехоустойчивости систем предлагаются расчетные модели, не требующие знания коэффициентов спектра кода, привлечения процедур компьютерного моделирования и графических построений кривых помехоустойчивости для различных видов модуляции и параметров кодирования. Приведенные в статье расчетные соотношения включают только основные показатели кода (свободное расстояние, длину кодового слова, относительную скорость кода) и вида модуляции (порядок модуляции, квадрат коэффициента помехоустойчивости). Они позволяют напрямую определять теоретически требуемые значения отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе приемных устройств по заданной вероятности ошибки на выходе декодера РС, а также проводить исследования энергетического выигрыша от кодирования (ЭВК), информационной и спектральной эффективностей систем. Базируясь на предложенных соотношениях, выполнены расчеты основных характеристик каналов радиосвязи для различных параметров кодов РС, достоверности приема, видов и порядков модуляции. Сравнение приведенных в статье результатов расчета помехоустойчивости и эффективности систем с известными аналогичными характеристиками, полученными в результате компьютерного моделирования, подтверждает правильность представленных аналитических моделей. Погрешность построенных кривых помехоустойчивости не превышает 0,1 дБ в рабочем диапазоне ОСШ. Представленные в статье материалы являются оригинальными и могут быть использованы при проектировании, расчете и разработке наземных и спутниковых систем.

Ключевые слова: вероятность ошибки, относительная скорость кода, жесткое декодирование, свободное расстояние кода, эффективность системы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Липкович Э.Б., Ковшик В.А., Серченя А.А. Аналитическая модель расчета помехоустойчивости систем с многопозиционными видами модуляции и кодированием по алгоритму Рида–Соломона. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 35-42.

ANALYTICAL MODEL OF NOISE STABILITY CALCULATION OF SYSTEMS WITH MULTIPositional MODULATION AND CODING BY REED-SOLOMON ALGORITHM

EDUARD B. LIPKOVICH, VICTORIYA A. KOVSHIK, ANNA A. SERCHENYA

*Belorussian state university of Informatics and Radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 1 July 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The aim of this article is to create analytical models that estimate the continuity and effectiveness of digital radio communication systems using multipositional types of modulation (CAM-M, PM-M, FM-M, AM-M) and block coding according to the Reed–Solomon algorithm (RS) with hard decoding. In contrast to the well-known approaches to determining the noise immunity of systems that require computation model, new estimating models are presented that do not require knowledge of the spectrum coefficients, computer simulation training methods and graphical construction of interference curves for various types of modulation and coding parameters. The calculated ratios presented in the article include only the main parameters of the code (free distance, codeword length, relative code speed) and of the modulation type (modulation order, squared noise immunity). They make it possible to directly determine the theoretically required values of signal-to-noise ratios (SNR) for input devices from given probabilistic errors based on RS signals, as well as to study the energy gain from coding (EGC), accessible and frequency-efficient systems. Based on the proposed ratios, the calculations of the main characteristics of the communication channels for various parameters of the RS codes, the reliability of reception, types and orders of modulation are performed. Comparison of the results of calculation of noise immunity and system effectiveness given in the article with known similar characteristics obtained as a result of computer modeling confirms the correctness of the presented analytical models. The error of the constructed noise immunity curves does not exceed 0.1 dB in the operating range of the SNR. The materials presented in this article are original and can be used in the design, calculation and development of terrestrial and satellite systems.

Keywords: error probability, relative code speed, hard decoding, free code distance, system efficiency.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Lipkovich E.B., Kovshik V.A., Serchenya A.A. Analytical model of noise stability calculation of systems with multipositional modulation and coding by Reed–Solomon algorithm. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 35-42.

Введение

К настоящему времени создано значительное число кодеков с различной структурой построения и способами исправления ошибок для повышения помехоустойчивости каналов наземного, спутникового и кабельного вещания, а также систем интерактивной связи и беспроводного доступа к информационным ресурсам. Однако расчет базовых характеристик этих систем (пороговая чувствительность, энергетический потенциал радиолиний, информационная эффективность, энергетический выигрыш от кодирования и др.) с учетом помехоустойчивого кодирования и многопозиционных видов модуляции является достаточно трудоемким процессом ввиду отсутствия простых и достаточно точных аналитических моделей расчета.

Коды РС относятся к подклассу двоичных блочных кодов, которые обладают максимальным достижимым расстоянием Хэмминга d_M при равной для них относительной скорости кода $R_K = k/n$. Символы кодового слова представляют собой элементы поля Галуа $GF(2^l)$, где l – степень поля Галуа или число бит в символе. Записывается код как (n, k, t) , где

$n = 2^l - 1$ – длина кодового слова; k – число информационных символов в кодовом слове; $t = (n - k) / 2$ – количество исправляемых символов. Минимальное кодовое расстояние по Хэммингу $d_M = 2t + 1$. Коды РС способны исправлять не только ошибки в символах, но и случайные однократные пакеты ошибок длиной до $l(t + 1) + 1$. При длине кодового слова $n < 2^l - 1$ коды РС считаются укороченными.

При оценке помехоустойчивости систем с кодами РС из-за сложности определения коэффициентов распределения спектра кода часто используют «оценку сверху», т. е. границу вероятности ошибки на бит информации на выходе декодера [1]

$$P_b \leq \frac{2^{l-1}}{2^l - 1} \cdot \sum_{j=t+1}^n \frac{j+t}{n} \binom{n}{j} P_S^j (1 + P_S)^{n-j}, \quad (1)$$

где P_S – вероятность ошибки на символ на входе декодера РС; $\binom{n}{j} = n! / j!(n - j)!$ – число различных способов выбора из n символов в кодовом слове j ошибочных.

Взаимосвязь между вероятностью ошибки на символ P_S и на бит P_q на входе декодера следующая:

$$P_S = 1 - (1 - P_q)^l; \quad P_q = C_i \cdot \operatorname{erfc}(Z), \quad (2)$$

где C_i – коэффициент, зависящий от вида и порядка модуляции; $\operatorname{erfc}(Z)$ – дополнительный интеграл вероятности.

В (2) вероятность ошибки P_q на входе декодера функционально связана с параметрами модуляции и демодуляции, а также с величиной ОСШ $h'_K = (E_0 / N_0)_K$, при которой должна обеспечиваться вероятность ошибки P_b на выходе декодера РС. Очевидно, что на основании (1) и (2) прямое аналитическое определение ОСШ затруднено, и поэтому обычно используют компьютерное моделирование для расчета и построения кривых помехоустойчивости $P_b = \psi(h'_K)$, по которым для заданного значения P_b на выходе декодера РС определяется требуемая величина ОСШ.

Аналитическая модель расчета характеристик системы

Для прямого определения ОСШ в функции P_b при различных видах и порядках модуляции, а также параметрах кодирования с жестким декодированием предлагается следующее исходное соотношение:

$$P_b = \frac{C_i \cdot \mu_i}{q_i} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{\mu_i \cdot h'_K}), \quad (3)$$

где μ_i – показатель эффективности процесса декодирования используемых сигналов; $q_i = d_{0i}^2 / 4E_0$ – квадрат коэффициента помехоустойчивости; d_{0i} – евклидово расстояние между ближайшими точками сигнального созвездия заданного вида модуляции; E_0 – энергия, затрачиваемая на передачу бита информации.

С учетом того, что дополнительный интеграл вероятности

$$\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_z^{\infty} \exp(-t^2) dt \cong \frac{1}{z \cdot \sqrt{\pi}} \cdot 10^{-z^2/2,3}, \quad (4)$$

то выражение (3) приводится к виду

$$P_b = \frac{C_i \cdot \sqrt{\mu_i}}{q_i \cdot \sqrt{\pi \cdot h_k}} \cdot 10^{-\mu_i \cdot h_k / 2,3}. \quad (5)$$

Применив к выражению (5) логарифмирование и метод последовательных приближений, получим в явном виде искомую зависимость ОСШ в функции P_b без необходимости привлечения процедур компьютерного моделирования:

$$h_k = 10 \cdot \lg \left[\frac{2,3(B_i - \lg \sqrt{(2,3 \cdot B_i / \mu_i)})}{\mu_i} \right], \text{ дБ}; \quad (6)$$

$$B_i = -\lg P_b - \lg(\sqrt{\pi \cdot q_i} / C_i) + \lg(\sqrt{\mu_i / q_i}); \quad (7)$$

$$\mu_i = \beta_i \cdot q_i \cdot R_k \cdot (t+1); \quad (8)$$

$$\beta_i = \left[1 - \frac{L_d}{3,5 \cdot \sqrt{P_b} \cdot L_d - \lg P_b} \right] / \left[1 + \lg \frac{(t+1)}{(1-R_k)(-\lg P_b)} \right]; \quad (9)$$

$$L_d = \lg[R_k(t+1)\sqrt{d_m \cdot q_i}], \quad (10)$$

где β – показатель взаимосвязи между параметрами кода и величиной ошибки P_b .

Для модуляций видов КАМ-М, ФМ-М, ЧМ-М и АМ-М значения коэффициентов C_i и q_i рассчитываются по формулам:

$$C_1 = 2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) / m; \quad q_1 = 3 \cdot m / 2 \cdot (M-1) \text{ – для КАМ-М с } m = 2, 4, 6 \dots; \quad (11)$$

$$C_2 = 2/m; \quad q_2 = 3 \cdot m / 2 \cdot (M-0,5) \text{ – для КАМ-М с } m = 3, 5, 7 \dots; \quad (12)$$

$$C_3 = 0,5 \text{ при } m = 1, \quad C_3 = 1/m \text{ при } m \geq 2; \quad q_3 = m \cdot \sin^2(\pi/M) \text{ – для ФМ-М с } m = 1, 2, 3 \dots; \quad (13)$$

$$C_4 = M/4; \quad q_4 = m/2 \text{ – для ЧМ-М с } m = 1, 2, 3 \dots; \quad (14)$$

$$C_5 = (M-1)/m \cdot M; \quad q_5 = 3m/(M^2-1) \text{ – для АМ-М с } m = 1, 2, 3 \dots; \quad (15)$$

где M – порядок модуляции; $m = \log_2 M$ – кратность модуляции.

Вероятность ошибки P_q на входе декодера РС и его исправляющая способность I_d для рассчитанного по (6) значению ОСШ определяются на основании соотношений:

$$P_q = \frac{C_i}{\sqrt{\pi \cdot R_k \cdot q_i \cdot h_k}} \cdot 10^{-R_k \cdot q_i \cdot h_k / 2,3}; \quad I_d = P_q / P_b. \quad (16)$$

Энергетическая эффективность от кодирования для принятых параметров модуляции, кодирования и декодирования определяется энергетическим выигрышем от кодирования ΔG . Величина ΔG характеризует меру снижения ОСШ при наличии кодирования по сравнению с режимом без кодирования для равных ошибок на выходе устройств

$$\Delta G = h_0 - h_k, \text{ дБ}, \quad (17)$$

где h_0 – ОСШ при отсутствии кодирования и декодирования.

Для многопозиционных видов модуляции при $P_b \leq 10^{-2}$ значение h_0 в отсутствие кодирования определяется по формулам:

$$h_0 = 10 \cdot \lg \left[\frac{2,3(A_i - \lg(\sqrt{2,3 \cdot A_i / q_i}))}{q_i} \right], \text{ дБ.} \quad (18)$$

$$A_i = -\lg P_b - \lg(\sqrt{\pi \cdot q_i} / C_i), \text{ дБ.} \quad (19)$$

Подставив в формулу (17) приведенные выражения для h_0 и h_k , получим

$$\Delta G = 10 \lg [R_k \cdot (t+1) \cdot \beta_i \cdot \xi_i], \text{ дБ,} \quad (20)$$

$$\xi_i = (A_i - \lg \sqrt{2,3 A_i / q_i}) / (B_i - \lg \sqrt{2,3 B_i / \mu_i}). \quad (21)$$

Из (20) и (21) следует, что если значения β_i и ξ_i стремятся к единице, то выражение (20) приводится к известному виду

$$\Delta G = 10 \lg [R_k \cdot (t+1)], \text{ дБ.} \quad (22)$$

Достоинство полученных выражений (20) и (21) состоит в том, что они позволяют напрямую определять энергетическую эффективность кода для заданного уровня ошибок и принятых параметров кодирования и модуляции. Формула (22) служит лишь оценкой асимптотического значения ЭВК.

В таблице приведены рассчитанные по полученным формулам значения ОСШ и ЭВК при использовании модуляции КАМ-4, различных параметров кода РС и вероятностях ошибок на выходе декодера 10^{-3} и 10^{-6} .

Таблица. Значения ОСШ и ЭВК для различных параметров кода РС, дБ
Table. Values of SNR and EGC for various parameters of RS code, db

Значения Value		Параметры кода РС (n, k, t) Parameters of RS code (n, k, t)						
		(7,3,2)	(15,9,3)	(31,23,4)	(31,13,9)	(255,243,6)	(255,239,8)	(255,223,16)
$P_b = 10^{-3}$	h_k , дБ	7,28	6,28	5,75	5,56	5,66	5,12	4,0
	ΔG , дБ	-0,49	0,51	1,04	1,2	1,13	1,67	2,78
$P_b = 10^{-6}$	h_k , дБ	9,87	8,42	7,72	7,26	7,50	6,67	4,72
	ΔG , дБ	0,65	2,09	2,79	3,26	3,02	3,85	5,80

Из анализа данных таблицы следует, что с ростом исправляющей способности кода t и увеличением длины кодового слова n требуемые значения ОСШ для реализации необходимой достоверности приема снижаются, увеличивается помехоустойчивость и растет энергетический выигрыш от кодирования ΔG_i . Однако с увеличением длины кодового слова повышается сложность реализации устройств. Поэтому при больших длинах кодовых слов и размеров символов используют укороченные коды и высокие значения R_{PC} . Для наглядности поведения кривых помехоустойчивости на рис. 1, 2 представлены результаты расчета зависимостей для укороченного кода РС (204, 188, $t = 8$) при использовании модуляции КАМ-М и ФМ-М. На этих же рисунках для оценки эффективности кода приведены рассчитанные по (18) и (19) зависимости в отсутствие кодирования (пунктир). Значения ЭВК, например, для $P_b = 10^{-10}$ при использовании КАМ-4 и ФМ-4 составляют 5 дБ и незначительно увеличиваются с ростом порядка модуляции.

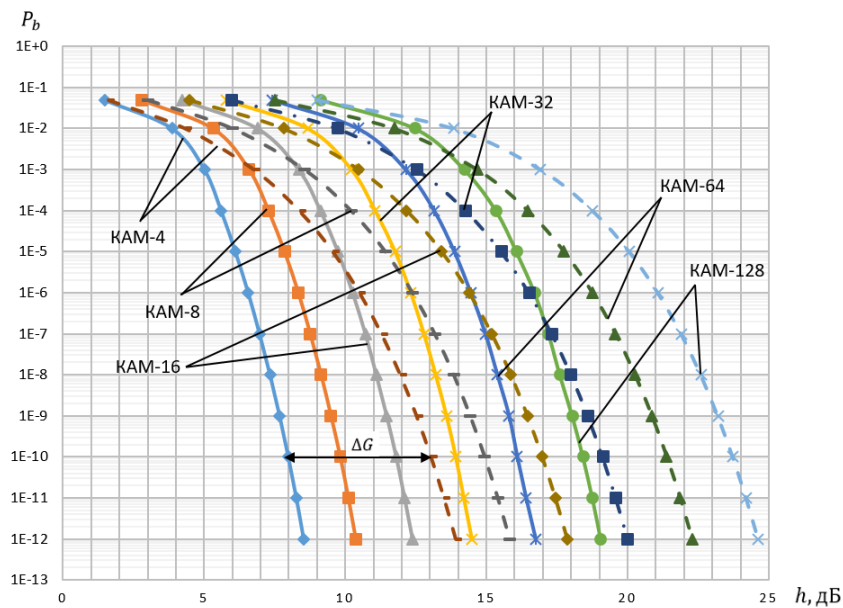


Рис. 1. Кривые помехоустойчивости для КАМ-М при использовании кодирования кодом Рида–Соломона (сплошная линия) и при его отсутствии (пунктирная линия)
Fig. 1. Noise immunity curves for KAM-M when using coding by the Reed–Solomon code (solid line) and in its absence (dashed line)

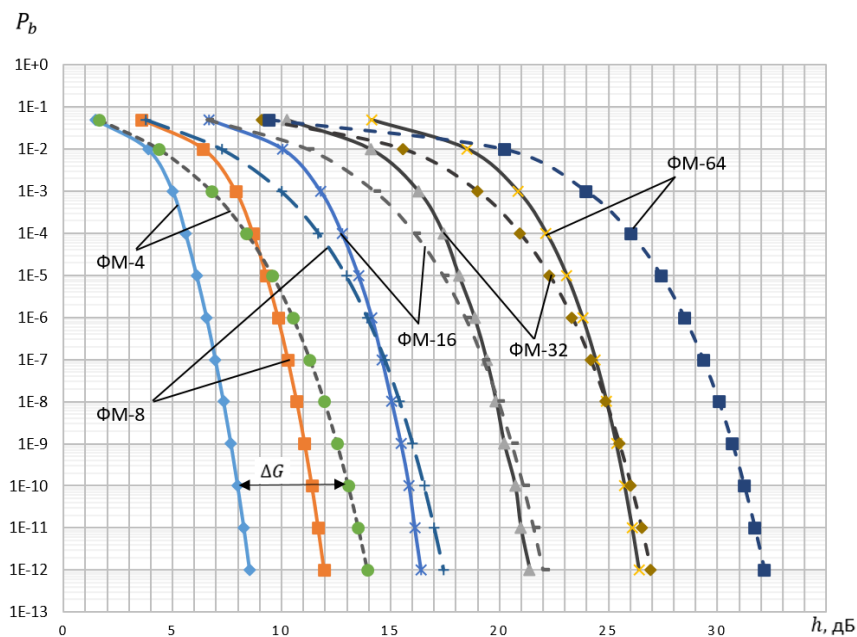


Рис. 2. Кривые помехоустойчивости для ФМ-М при использовании кодирования кодом Рида–Соломона (сплошная линия) и при его отсутствии (пунктирная линия)
Fig.2. Noise immunity curves for FM-M when using coding by the Reed–Solomon code (solid line) and in its absence (dashed line)

Базируясь на аналитической записи ОИШ, несложно рассчитать многие основные характеристики каналов связи и, в частности, информационную эффективность $\eta_{\text{инф}}$. Этот показатель устанавливает потери в информационной скорости передачи данных B_0 для реальных каналов по сравнению с пропускной способностью C по Шеннону:

$$\eta_{\text{инф}} = B_0/C = 0,3 \cdot \gamma_C / \lg(1 + \gamma_0 \cdot 10^{0,1 \cdot h_{\text{к}}}). \quad (23)$$

В формуле (23) приняты следующие обозначения: $\gamma_C = m \cdot R_K / b_p$ – спектральная эффективность, бит/с·Гц; $\gamma_0 = m \cdot R_K$ – удельная скорость, бит/симв; b_p – коэффициент потерь в использовании выделенной полосы канала связи.

Из (23) следует, что главная задача в повышении $\eta_{\text{инф}}$ состоит в выборе параметров кода и модуляции, при которых достигается наилучшее использование полосы канала и минимальное значение ОСШ для обеспечения требуемой достоверности приема. Задача по оптимизации характеристик систем может решаться отдельно путем оценки близости энергетической δh или спектральной эффективности $\delta \gamma$ к предельно возможному показателю по Шеннону:

$$\delta h = h_K - h_{\text{Ш}} = h_K - 10 \lg \left[\frac{10^{0,3 \cdot \gamma_C} - 1}{\gamma_0} \right], \text{ дБ}; \quad (24)$$

$$\delta \gamma = \gamma_M - \gamma_C = \gamma_C \left(\frac{1}{\eta_{\text{инф}}} - 1 \right), \text{ бит/с·Гц}, \quad (25)$$

где $h_{\text{Ш}}$ и $\gamma_{\text{Ш}}$ – энергетическая и спектральная эффективности каналов связи по Шеннону.

Заключение

Представлены аналитические соотношения для проведения расчетов энергетической, спектральной и информационной эффективностей при использовании многопозиционных видов модуляции (КАМ-М, ФМ-М, ЧМ-М, АМ-М) и блочного кодирования по алгоритму Рида–Соломона. Приведены формулы для оценки энергетического выигрыша от кодирования и исправляющей способности кода РС в зависимости от заданной вероятности ошибки на выходе декодера и параметров кодирования и модуляции. Рассчитаны характеристики помехоустойчивости и ЭВК в системах с кодированием для многопозиционных видов модуляции КАМ-М и ФМ-М. Сравнение расчетных материалов с известными характеристиками подтверждает правильность предложенных аналитических моделей.

Список литературы

1. Морелос-Сарагоса Р. *Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение*. Минск: Техносфера; 2005.

References

1. Morelos-Saragosa R. [The art of robust coding. Methods, Algorithms, Application]. Minsk: Technosphere; 2005. (In Russ.)

Вклад авторов

Липкович Э.Б. сформулировал задачи исследований и определил математические модели.
Ковшик В.А. выполнила расчеты по предложенным соотношениям.
Серченя А.А. выполнила анализ состояния по теме статьи и провел сопоставительный анализ рассчитанных показателей с известными результатами.

Authors contribution

Lipkovich E.B. formulated research tasks and defined mathematical models.
Kovshik V.A. performed calculations according to the proposed ratios.
Serchenya A.A. performed a state analysis on the topic of the article and conducted a comparative analysis of the calculated indicators with known results.

Сведения об авторах

Липкович Э.Б., к.т.н., доцент, доцент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ковшик В.А., ассистент кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Серченя А.А., магистрант кафедры информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
+375-44-767-61-23;
anyaharty@gmail.com
Серченя Анна Андреевна

Information about the authors

Lipkovich E.B., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kovshik V.A., assistant of Infocommunication Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Serchenya A.A., master-student of Infocommunication Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovky str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics.
+375-44-767-61-23;
anyaharty@gmail.com
Serchenya Anna Andreevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-43-51>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 534.773

МЕТОД КОРРЕКЦИИ СЛУХА НА ОСНОВЕ ПСИХОАКУСТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННОГО ПЕРЕНОСА ЧАСТОТ В РЕЧЕВОМ СИГНАЛЕ

ПОРХУН М.И., ВАШКЕВИЧ М.И.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 22 июля 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Целью работы являлась разработка метода обработки речевого сигнала для коррекции слуховых патологий на основе психоакустически обусловленного переноса высокочастотных составляющих спектра сигнала в низкочастотную область с последующим частотно-зависимым усилением. Для достижения поставленной цели были решены задачи, связанные с разработкой принципов переноса частот в речевом сигнале. Разработанный метод является адаптивным, его настройка осуществляется согласно аудиограмме тугоухого человека. Для переноса частот выбираются две частотных полосы: исходная (откуда производится перенос) и целевая (куда производится перенос). Ширина исходной частотной полосы фиксирована, а ширина целевой полосы выбирается адаптивно. Перенос спектра выполняется только для согласных звуков, восприятие которых тугоухими людьми затруднено. Классификация звуков по признаку гласный/согласный/пауза реализована на базе нейронной сети. В качестве информационных признаков выбирались: среднее число переходов через нуль, кратковременная энергия, кратковременная амплитуда, нормализованная автокорреляционная функция и первый спектральный момент. Чтобы сохранить максимально натуральное звучание переносимых звуков используется концепция равной громкости. Для компенсации ослабления восприятия звука тугоухим человеком используется частотно-зависимое усиление сигнала на основе аудиограммы. Эффективность предложенного метода проверена экспериментально с использованием моделирования эффекта потери слуха. В эксперименте участвовали 10 человек, которым давали прослушивать записи, пропущенные через модель потери слуха, а также записи, пропущенные через модель потери слуха с последующей коррекцией. Результаты показали, что применение разработанного метода коррекции слуха в среднем улучшает разборчивость речи на 6 %.

Ключевые слова: коррекция слуха, слуховые патологии, моделирование потери слуха.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Порхун М.И., Вашкевич М.И. Метод коррекции слуха на основе психоакустически обусловленного переноса частот в речевом сигнале. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 43-51.

HEARING CORRECTION METHOD BASED ON PSYCHOACOUSTICALLY MOTIVATED FREQUENCY TRANSPOSITION IN A SPEECH SIGNAL

MAXIM.I. PORHUN, MAXIM.I. VASHKEVICH

*Belarusian state university of informatics and radioelectronics
P. Brovki str., 6, Minsk, 220013, Republic of Belarus*

Submitted 22 July 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The purpose of the work was to develop a speech signal processing method for the hearing pathologies correction based on psychoacoustically motivated transposition of high-frequency components of the signal spectrum to the low-frequency region with subsequent frequency-dependent amplification. To achieve this goal, several tasks related to the development of principles of frequency transposition in a speech signal were solved. The adjustment of the method is carried out according to the audiogram of a deaf person. For frequency transposition, source and target frequency bands are selected. The width of the source frequency band is fixed, while the width of the target band is adaptive. Spectrum transposition is performed only for consonants, the perception of which is more difficult for people with hearing loss. The classification of sounds (into vowel-consonant - pause classes) is implemented using one-layer neural network. The feature vector consists of: the zero crossing rate, short-term energy, short-term magnitude, normalized autocorrelation function and the first spectral moment. To preserve the naturalness of transposed sounds, the concept of equal loudness is used. To compensate for the attenuation in the perception of sound by a deaf person, a frequency-dependent signal amplification based on an audiogram is used. The effectiveness of the proposed method was verified experimentally using hearing loss effect simulation. The experiment involved 10 people who were given to listen to the recordings passed through the hearing loss model, as well as recordings passed through the hearing loss model with subsequent correction (using proposed method). The results showed that using the proposed hearing correction method improves speech intelligibility on average by 6 %.

Keywords: hearing correction, hearing impairments, hearing loss simulation.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Porhun M.I., Vashkevich M.I. Hearing correction method based on psychoacoustically motivated frequency transposition in a speech signal. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 43-51.

Введение

По данным Всемирной организации здравоохранения, в мире происходит рост числа людей, страдающих от патологий слуха, что стимулирует разработку различных методов коррекции слуха. У большинства слабослышащих затруднено восприятие высокочастотных (ВЧ) звуков, при этом чувствительность к низкочастотным (НЧ) звукам, как правило, сохраняется. В зависимости от типа и степени тугоухости применение классических методов коррекции слуха не всегда приводит к повышению разборчивости речи [1]. Для людей с тяжелыми слуховыми патологиями и вовсе невозможно восстановить разборчивость звуков, используя только стратегию усиления, поскольку у них мертва часть волосковых клеток в ухе, отвечающих за восприятие ВЧ звуков [1–3]. Решением данной проблемы может служить метод коррекции слуха, основанный на переносе ВЧ части спектра сигнала, не воспринимаемой тугоухим человеком, в НЧ область, где он сохраняет возможность слышать.

Метод коррекции слуха на основе переноса частот

Для коррекции слуховых патологий предлагается метод, который схематично представлен на рис. 1. Входной сигнал поступает на блок переноса частот,

где из высокочастотной области в низкочастотную переносится часть спектра сигнала. Далее выполняется частотно-зависимое усиление сигнала с использованием фильтра, амплитудно-частотная характеристика которого рассчитывается исходя из аудиограммы. Для компенсации эффекта «клиппинг» используется ограничитель уровня сигнала (лимитер). Далее сигнал проходит через фильтр нижних частот (ФНЧ) с частотой среза, равной верхней границе целевой полосы, используемой при переносе частот. Последний шаг необходим для сосредоточения основной энергии сигнала в области, где тугоухий человек сохраняет возможность слышать. В результате обработки синтезируется выходной сигнал, предоставляющий тугоухому человеку возможность слышать ранее не различимые звуки.

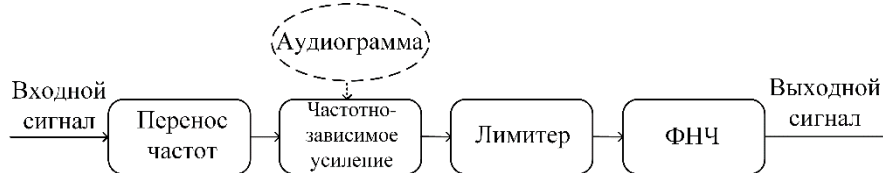


Рис. 1. Этапы обработки сигнала в методе коррекции слуха
Fig. 1. Signal processing stages in hearing correction method

Перенос частот в речевом сигнале

В большинстве случаев согласные звуки занимают высокочастотный диапазон спектра речевого сигнала, а гласные – низкочастотный. Именно поэтому тугоухие люди хуже воспринимают согласные звуки, чем гласные [4]. Для переноса ВЧ компонентов сигнала в НЧ область предлагается использовать схему, приведенную на рис. 2.

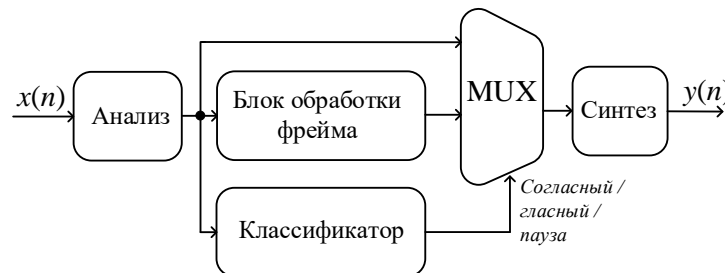


Рис. 2. Схема блока переноса частот
Fig. 2. Frequency transposition block scheme

Входной сигнал разделяется на перекрывающиеся фреймы. Каждый фрейм классифицируется как содержащий гласный/согласный звук или паузу. Фреймы, содержащие согласные звуки, обрабатываются в блоке обработки фрейма, а остальные фреймы оставляются без изменений. Синтез выходного сигнала выполняется методом суммирования с перекрытием. Схема обработки отдельного фрейма приведена на рис. 3.

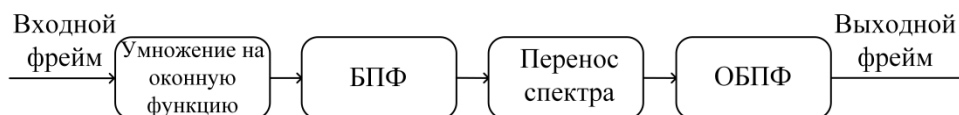


Рис. 3. Структура блока обработки фрейма
Fig. 3. Frame processing block structure

Для сглаживания уровня сигнала на концах фрейма поступающие отсчеты сигнала умножаются на оконную функцию Хэмминга и переводятся в частотную область при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ). Далее происходит перенос высоких частот в НЧ область. Полученный фрейм переводится обратно во временную область обратным БПФ (ОБПФ).

Поскольку слуховая система человека имеет разную чувствительность к звукам разной частоты [5], то прямой перенос спектра приведет к искажению уровня громкости сигнала, и, как следствие, к ухудшению разборчивости речи в целом. Чтобы уменьшить искажения,

предлагается использовать психоакустический принцип равной громкости [6], который позволит сохранить исходную громкость компонент звука при переносе в НЧ область.

Метод переноса частот (см. рис. 4) подразумевает использование двух частотных полос: исходной (откуда выполняется перенос) и целевой (куда выполняется перенос). Чтобы не повредить звуки в НЧ диапазоне и при этом отобразить ВЧ информацию на достаточно низких частотах, выбрана целевая полоса с адаптивной нижней границей f_T^L , располагающейся не ниже 750 Гц, и верхней границей f_T^U , равной 1750 Гц. Ширина исходной полосы ΔW_s составляет 1 кГц, а ее центральная частота f_c выбирается адаптивно (см. рис. 4). Нижняя граница целевой полосы f_T^L выбирается так, чтобы ширина исходной и целевой полосы в шкале барков совпадали. Такой подход позволяет согласовать психоакустический «масштаб» переносимых компонент в сигнале.

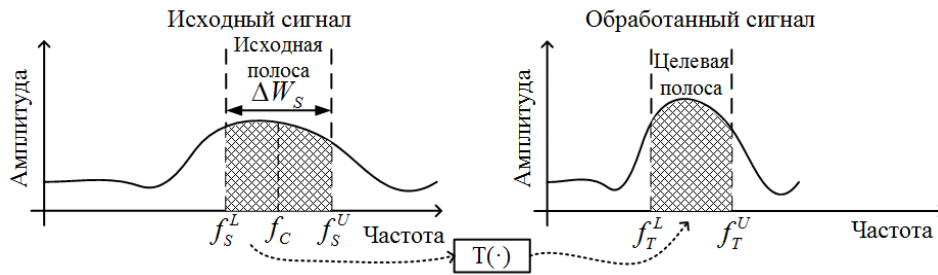


Рис. 4. Общая схема переноса частот
Fig. 4. Frequency transposition general scheme

Первый спектральный момент, представляющий собой центроид спектра, хорошо характеризует согласные звуки. Поэтому для определения исходной полосы предлагается использовать частоту, соответствующую центроиду спектра:

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^{N/2} P(i) \cdot (f_s / N)}{\sum_{i=1}^{N/2} P(i)}, \quad (1)$$

где $P(i)$ – мощность i -го частотного отсчета, f_s – частота дискретизации и N – размер БПФ.

Для согласования значений f_c , получаемых на смежных фреймах, предлагается использовать экспоненциальное усреднение:

$$f_c(i) = \alpha \cdot f_c + (1 - \alpha) \cdot f_c(i - 1), \quad (2)$$

где α – сглаживающий коэффициент, выбранный равным 0,995.

Верхняя f_s^U и нижняя f_s^L границы исходной полосы определяются как:

$$f_s^L = f_c - \Delta W_s / 2, \quad f_s^U = f_c + \Delta W_s / 2. \quad (3)$$

Как указывалось ранее, верхняя граница целевой полосы фиксирована ($f_T^U = 1750$ Гц), значит, остается определить только нижнюю границу целевой полосы. Это можно сделать исходя из принципа, что ширина исходной и целевой полосы должны совпадать в шкале барков. Таким образом, определение нижней границы целевой полосы заключается в выполнении следующих двух шагов:

1) определение ширины исходной полосы в шкале барков:

$$\Delta B_s = B(f_s^U) - B(f_s^L), \quad (4)$$

где функция B выполняет переход от частоты в Гц к шкале барков [7]:

$$B(f) = 26,81 \cdot (1 + 1960 / f)^{-1} - 0,53; \quad (5)$$

2) непосредственное вычисление нижней границы целевой полосы:

$$f_T^L = B^{-1}(B(f_T^U) - \Delta B_s), \quad (6)$$

где ΔB_T – ширина целевой полосы в барках ($\Delta B_T = \Delta B_S$).

Компенсация уровня громкости частотных компонент

В предлагаемом методе используются кривые равной громкости для определения корректирующих коэффициентов для частотных компонент, переносимых из ВЧ в НЧ область, чтобы сохранить исходную громкость [8].

Для определения корректирующих коэффициентов предлагается следующий алгоритм:

1) вычислить средние уровни сигнала L_T и L_S для целевой и исходной полосы:

$$L_T = \frac{1}{|T_{ind}|} \sum_{k \in T_{ind}} |X(k)|, \quad L_S = \frac{1}{|S_{ind}|} \sum_{k \in S_{ind}} |X(k)|, \quad (7)$$

где T_{ind} и S_{ind} – множества индексов частотных отсчетов в целевой и исходной полосе соответственно, $X(k)$ – кратковременный спектр сигнала;

2) вычислить центральные частоты F_T и F_S для целевой и исходной полос:

$$F_T = (f_T^U - f_T^L)/2, \quad F_S = (f_S^U - f_S^L)/2. \quad (8)$$

3) определить уровень громкости (в фонах) для исходной полосы $p_S = \psi_{F_S}(L_S)$, где $\psi_F(L)$ – функция, переводящая уровень сигнала L на частоте F в громкость p .

4) определить требуемый уровень сигнала \bar{L}_T для целевой частоты F_T , который соответствует громкости p_S исходной полосы: $\bar{L}_T = \psi_{F_T}^{-1}(p_S)$;

5) вычислить разницу между требуемым и текущим уровнем сигнала в целевой полосе:

$$\Delta L_T = \bar{L}_T - L_T; \quad (9)$$

6) вычислить весовой коэффициент для целевой полосы $G = 10^{\Delta L_T/20}$.

Для компенсации уровня громкости сигнала все частотные отсчеты целевой полосы умножаются на полученный весовой коэффициент G . Иллюстрация процесса компенсации уровня громкости представлена на рис. 5.

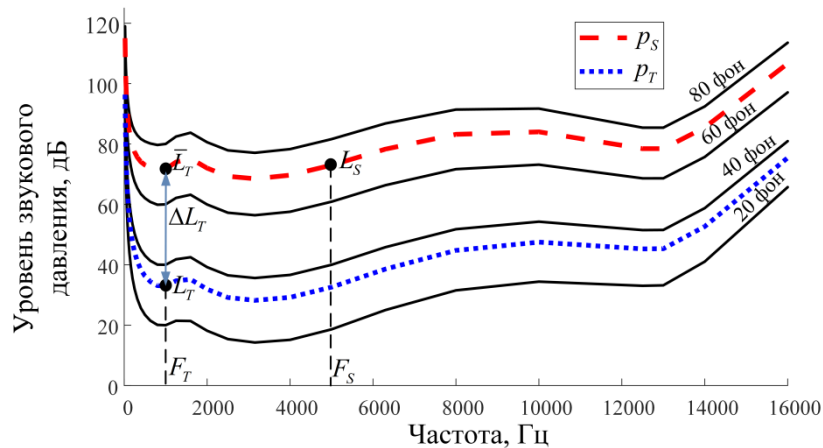


Рис. 5. Общая схема компенсации уровня громкости

Fig. 5. Loud compensation general scheme

Классификация звуков

Классификация звуков необходима для отнесения каждого фрейма к одному из классов: гласный, согласный или пауза. В качестве признаков для классификации использовались следующие параметры: среднее число переходов через нуль (ZCR), кратковременная энергия

(STE), кратковременная амплитуда (STM), нормализованная автокорреляционная функция (NC) и первый спектральный момент (SM) [8].

Для обучения классификатора использовались звуковые файлы с соответствующей разметкой на три класса (гласный/согласный/пауза). На 30 % звуковые файлы состояли из речевой базы «ТИМІТ», а остальные 70 % были записаны и размечены вручную. С целью разделения фреймов по вышеперечисленным классам построена однослойная нейронная сеть с выходной функцией активации «softmax» (рис. 6) [9].

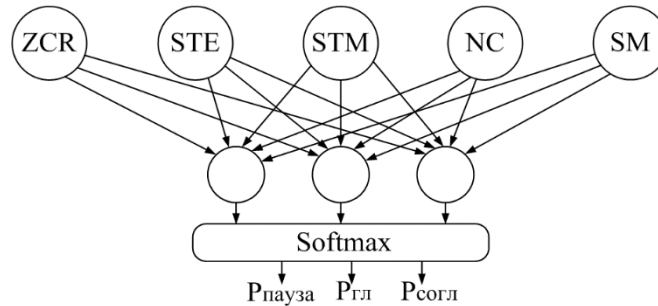


Рис. 6. Структура классификатора
Fig. 6. Classifier structure

80 % звуковых файлов использовались для обучения классификатора, оставшиеся 20 % – для тестирования. В результате тестирования обученного классификатора получена матрица неточностей (см. табл.).

Из табл. видно, что точность распознавания согласных звуков является довольно высокой (93,1 %), что является важным для решаемой задачи. Точность распознавания гласных звуков и пауз несколько ниже (79,5 и 84,1 %, соответственно).

Таблица. Матрица неточностей классификатора звуков
Table. Confusion matrix for classifier of sounds

		Предсказано как Predicted as			Точность, % Accuracy, %
		согласный consonant	гласный vowel	пауза pause	
Фреймы, содержащие Frames containing	согласные consonants	13381	900	90	93.1%
	гласные vowels	342	2138	210	79.5%
	паузы pauses	278	462	3902	84.1%

Частотно-зависимое усиление

Фильтр для коррекции огибающей спектра сигнала является известным методом компенсации ослабления восприятия звука тугоухим человеком. Для расчета фильтра-корректора существуют формулы, выбор которых выполняется самим человеком исходя из субъективных ощущений либо врачом, на основе типа патологии. Для расчета целевого усиления выбрана формула NAL-R [6], на основе которой синтезировался КИХ фильтр-корректор 128 порядка. Для сосредоточения энергии сигнала в полосе, где тугоухий человек сохраняет возможность слышать, предлагается фильтровать часть спектра, расположенную за верхней границей целевой полосы f_T^U , равной 1750 Гц. Фильтрация также необходима для исключения влияния высоких частот при экспериментальном определении эффективности метода коррекции слуха.

Проверка метода коррекции слуха

Проверка предлагаемого метода выполнена на тестовом речевом сигнале в среде MATLAB. Проведен следующий эксперимент: в первом случае тестовый сигнал обработан методом моделирования потери слуха¹, а во втором – методом коррекции слуха и затем методом моделирования потери слуха. В качестве исходных данных для обоих методов использовалась аудиограмма, соответствующая второй степени тугоухости. Результаты обработки тестового сигнала приведены на рис. 7.

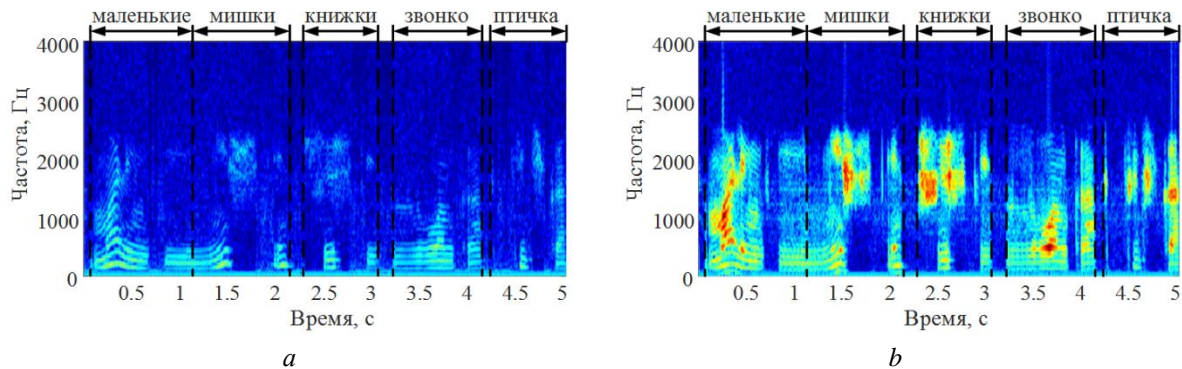


Рис. 7. Результаты экспериментов: *a* – спектрограмма сигнала без обработки методом коррекции слуха; *b* – спектрограмма сигнала, обработанного методом коррекции слуха

Fig. 7. Experimental results: *a* – spectrogram of the signal without processing by hearing correction method; *b* – spectrogram of the signal processed hearing correction method

Из полученных спектрограмм видно, что использование предлагаемого метода коррекции слуха помогает компенсировать уровень громкости сигнала, а также переместить ранее не слышимые звуки (согласные) в слышимую область, что по субъективным ощущениям помогает улучшить разборчивость речи.

Экспериментальные исследования

Одним из способов определения эффективности методов коррекции слуха является оценка посредством выявления процента разборчивости речи при помощи артикуляционных таблиц слов. Процедура состоит в прослушивании испытуемым записанных слов с последующим повторением услышанной информации, правильность которой проверяется [5].

Для тестирования отобрана группа нормально слышащих людей из 10 человек в возрасте от 20 до 66 лет. Для измерения разборчивости речи записаны два тестовых речевых сигнала на основе артикуляционных таблиц из ГОСТ 16600.

Первый тестовый сигнал, содержащий запись 50 слов, пропускался через модель потери слуха¹ и отфильтровывался ФНЧ с частотой среза f_T^U , что позволило обеспечить чистоту эксперимента. Второй тестовый сигнал состоял из 50 слов и обрабатывался методом коррекции слуха, а затем пропускался через модель потери слуха. Настройка обоих методов осуществлена по аудиограмме, соответствующей второй степени тугоухости. Каждый испытуемый прослушивал оба тестовых сигнала и повторял услышанное слово, корректность которых фиксировалась. График на рис. 8 показывает соотношение разборчивости речи у участников эксперимента с использованием метода коррекции слуха и без него. Результаты эксперимента показали, что применение метода позволило в среднем повысить разборчивость речи на 6 % и максимум – на 18 %.

Поскольку в эксперименте использовалась небольшая выборка участников, то проводилась статистическая проверка значимости результатов при помощи парного *t*-критерия. В результате уровень значимости составил $p = 0,03$, т. е. вероятность того, что

¹ Порхун М.И., Вашкевич М.И. Моделирование потери слуха. *Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды 20-й междунар. конф., Россия, Москва, 2018; Т. 1.:228-233.*

отличие среднего уровня разборчивости с применением метода коррекции и без него не являются существенным, очень мала (~3 %).

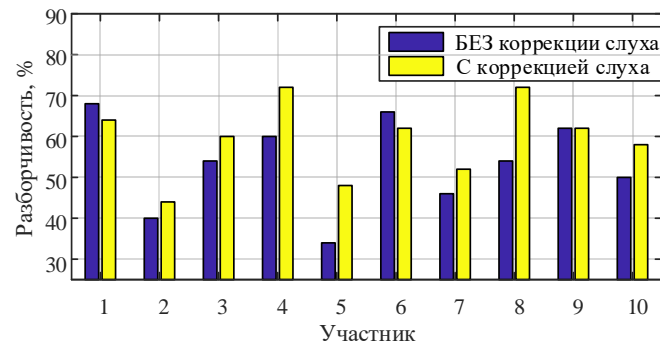


Рис. 8. Результаты эксперимента
Fig. 8. Experimental results

Заключение

В работе предложен метод коррекции слуха, основанный на переносе частотной полосы адаптивной ширины из ВЧ в НЧ область спектра речевого сигнала с последующим частотно-зависимым усилением. Работоспособность метода показана путем MATLAB-моделирования. Эффективность метода доказана экспериментально. Ключевой особенностью предложенного метода является перенос частот в соответствии с психоакустическими аспектами восприятия звука человеком.

Список литературы

1. Simpson A. Frequency-lowering devices for managing high-frequency hearing loss: a review. *Trends in amplification*. 2009;13(2):87-106. DOI: 10.1177/1084713809336421.
2. Alexander J.M. Individual variability in recognition of frequency-lowered speech. *Seminars in Hearing*. 2013;34(2):86-109. DOI: 10.1055/s-0033-1341346.
3. Robinson J.D., Baer T., Moore B. Using transposition to improve consonant discrimination and detection for listeners with severe high-frequency hearing loss. *International Journal of Audiology*. 2007;46(6):293-308. DOI: 10.1080/14992020601188591.
4. Hogan C.A., Turner C.W. High-frequency audibility: Benefits for hearing-impaired listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1998;104:432-441. DOI: 10.1121/1.423247.
5. Королёва И.В. *Введение в аудиологию и слухопротезирование*. СПб: КАРО; 2012.
6. Фонлантен А., Хорст А. *Слуховые аппараты*. Ростов н/Д.: Феникс; 2009.
7. Traunmuller H. Analytical Expressions for the tonotopic sensory scale. *Acoustical Society of America*. 1990; 88(1):97-100. DOI: 10.1121/1.399849.
8. Liu Y.-T., Chang R.Y., Tsao Y., Chang Y.-P. A new frequency lowering technique for Mandarin-speaking hearing aid users. *IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), Orlando, FL*. 2015;722-726. DOI: 10.1109/GlobalSIP.2015.7418291.
9. Николенко С.И., Архангельская Е.В., Кадурич А.А. *Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей*. СПб.: Питер; 2019.

References

1. Simpson A. Frequency-lowering devices for managing high-frequency hearing loss: a review. *Trends in amplification*. 2009;13(2):87-106. DOI: 10.1177/1084713809336421.
2. Alexander J.M. Individual variability in recognition of frequency-lowered speech. *Seminars in Hearing*. 2013;34(2):86-109. DOI: 10.1055/s-0033-1341346.
3. Robinson J.D., Baer T., Moore B. Using transposition to improve consonant discrimination and detection for listeners with severe high-frequency hearing loss. *International Journal of Audiology*. 2007;46(6):293-308. DOI: 10.1080/14992020601188591.

4. Hogan C.A., Turner C.W. High-frequency audibility: Benefits for hearing-impaired listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1998;104:432-441. DOI: 10.1121/1.423247.
5. Korolyova I.V. [Introduction to Audiology and Hearing Prosthetics]. SPb : KARO; 2012. (In Russ.)
6. Vonlanthen A., Horst A. [Hearing Aids]. Rostov n/D: Phoenix; 2009. (In Russ.)
7. Traunmuller H. Analytical Expressions for the tonotopic sensory scale. *Acoustical Society of America*. 1990; 88(1):97-100. DOI: 10.1121/1.399849.
8. Liu Y.-T., Chang R.Y., Tsao Y., Chang Y.-P. A new frequency lowering technique for Mandarin-speaking hearing aid users / *IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), Orlando, FL*. 2015;722-726. DOI: 10.1109/GlobalSIP.2015.7418291.
9. Nikolenko S.I., Arhangel'skaya E.V., Kadurin A.A. *Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neyronnyih setey*. SPb.: Piter; 2019. (in Russ.)

Вклад авторов

Порхун М.И. разработал метод коррекции слуха на основе психоакустически обусловленного переноса частот в речевом сигнале, а также провел экспериментальные исследования эффективности данного метода.

Вашкевич М.И. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, принимал участие в разработке метода коррекции слуха, участвовал в интерпретации результатов эксперимента.

Authors contribution

Porhun M.I. developed hearing correction method based on psychoacoustically motivated frequency transposition in a speech signal, and also conducted an experimental study of the effectiveness of this method.

Vashkevich M.I. identified the tasks that needed to be solved during the research, and also took part in the development of a hearing correction method, participated in the interpretation of the results of the experiment.

Сведения об авторах

Порхун М.И., ассистент кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Вашкевич М.И., к.т.н., доцент, доцент кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Porhun M.I., Assistant Lecturer of Computer Engineering Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Vashkevich M.I., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Computer Engineering Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-84-20;
e-mail: porhun@bsuir.by
Порхун Максим Игоревич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-84-20;
e-mail: porhun@bsuir.by
Porhun Maxim Igorevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-52-58>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.37

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ РАДИОСИГНАЛОВ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

АРХИПЕНКОВ Д.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 19 сентября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Целью данной статьи является необходимость создания единичного портрета источника радиоизлучения и способов идентификации. Для обнаружения, идентификации и определения местоположения источников радиоизлучения в зоне покрытия используются средства радиомониторинга. Одной из важных задач, решаемых системой радиомониторинга, является прием (перехват) передаваемых сообщений в радиоэфире и идентификация сигнала. В статье рассмотрены вопросы классификации основных параметров источников радиоизлучения, приведена классификация видов модуляции и основные параметры ее типов. Структуру сигнала позволяют определить автокорреляционный и корреляционный методы. Автокорреляция используется для определения таких параметров сигнала, как длительность посылки, длительность блока данных. Корреляция позволяет идентифицировать конкретный сигнал из имеющего набора. Для обнаружения источника радиоизлучения приведены два обобщенных алгоритма: распознавания вида источника радиоизлучения по неизвестным параметрам и алгоритм идентификации источника излучения по заданным параметрам. Представлен результат моделирования алгоритма распознавания источника радиоизлучения с заданными параметрами, в качестве заданного сигнала использовалась сигнатура с линейно-частотной модуляцией. Результатом работы алгоритма является единичный выброс при полном соответствии сигналов, при расхождении сигналов – ширина выброса увеличивается, что и свидетельствует о расхождении. Данный алгоритм можно использовать для поиска заданного вида сигнала, что позволяет увеличить скорость анализа полосы и точность обнаружения. Для увеличения точности обнаружения рекомендуется использовать комбинацию двух алгоритмов с дополнительной цифровой обработкой сигналов, что должно привести к увеличению точности определения вида сигнала и более быстрому нахождению параметров источника радиоизлучения.

Ключевые слова: модуляция, алгоритм распознавания, источник радиоизлучения, линейно-частотная модуляция.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Архипенков Д.В. Анализ параметров радиосигналов для идентификации источника излучения. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 52-58.

ANALYSIS OF RADIO SIGNAL PARAMETERS FOR EMISSION SOURCE IDENTIFICATION

DMITRY.V. ARKHIPENKOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 19 September 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The purpose of the article is the need to create a single portrait of a radioemission source and identification methods. Radiomonitoring tools are used to detect, identify and locate sources of radioemission in the coverage area. One of the important tasks solved by the radio monitoring system is the reception (interception) of transmitted messages on the air and signal identification. The article deals with the classification of the main parameters of radioemission sources, provides a classification of the modulation types and the main its parameters. The signal structure can be determined by autocorrelation and correlation methods. Autocorrelation is used to determine signal parameters such as the transmission duration, data block duration. Correlation allows to identify a specific signal from the set. To detect a radioemission source, two generalized algorithms are presented: recognition of the radioemission source type by unknown parameters and an algorithm for identifying a radiation source by given parameters. A simulation result of a radioemission source recognition algorithm with given parameters is presented; a linear frequency-modulated signature was used as a given signal. The result of the algorithm is a single outlier with full signal compliance, when the signals diverge, the outlier width increases, which indicates a discrepancy. This algorithm can be used to search for a given type of signal, which allows to increase the strip analysis speed and the detection accuracy. To increase the detection accuracy, it is recommended to use a combination of two algorithms with additional digital signal processing, which should lead to an increase in the accuracy of type of signal determining and a more rapid determination of the radiation source parameters.

Keywords: modulation, recognition algorithm, radiation source, chirp.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Arkhipenkov D.V. Analysis of radio signal parameters for emission source identification. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 52-58.

Введение

Современный радиозфир насыщен самыми разнообразными излучениями: от ручного телеграфа до сложных, меняющихся во времени радиосигналов с цифровой модуляцией и кодированием, выявить параметры которых не всегда возможно. Для обнаружения, идентификации и определения местоположения источников радиоизлучения в зоне покрытия используются средства радиомониторинга. Одной из важных задач, решаемых системой радиомониторинга, является прием (перехват) передаваемых сообщений в радиозфире. На рис. 1 показана структурная модель системы сигнатурного детектирования источников радиоизлучений (ИРИ) [1].

В настоящее время наибольшее применение в задачах радиомониторинга находят панорамные ЦРПУ (цифровые радиоприемные устройства), представляющие сочетание преобразователей радиосигналов с фиксированной промежуточной частотой и блока аналого-цифровой обработки, обеспечивающего параллельную обработку сигналов в полосе одновременного анализа с необходимым частотным разрешением [2]. В связи с этим существует необходимость в создании единичного портрета ИРИ и способов идентификации данного излучения.



Рис. 1. Структурная модель системы сигнатурного детектирования источников радиоизлучений
Fig. 1. Structural model of signature detection system of radio emission sources

Классификация основных параметров ИРИ

В общем виде любой радиосигнал, принимаемый устройством радиомониторинга, можно представить во временной области как [3]

$$u(t) = U(t) \cos(\omega(t)t + \varphi(t)) + \eta(t), \quad (1)$$

где $U(t)$, $\omega(t)$, $\varphi(t)$ – функции, определяющие закон изменения сигнала по амплитуде, частоте и фазе соответственно; $\eta(t)$ – шумовая составляющая.

В зависимости от вида модулирующего, модулируемого сигнала и модулируемых параметров можно предложить следующую классификацию:

- 1) по виду временной характеристики: непрерывный, импульсный;
- 2) по виду модуляции – табл. 1.

Таблица 1. Классификация видов модуляции
Table 1. Classification of modulation types

Тип модуляции Modulation type	Аналоговая Analog	Импульсная Pulse	Цифровая Digital
Модулирующий сигнал Modulating signal	Аналоговый	Аналоговый или дискретный	Дискретный
Несущая Carrier signal	Аналоговая	Дискретная	Аналоговая
Вид модуляции Modulation kind	АМ (амплитудная модуляция) ЧМ (частотная модуляция) ФМ (фазовая модуляция) ЛЧМ (линейно-частотная модуляция)	АИМ (амплитудно-импульсная модуляция) ШИМ (широотно-импульсная модуляция) ФИМ (фазоимпульсная модуляция)	АМн (амплитудная манипуляция) ЧМн (частотная манипуляция) ФМн (фазоманипулированная несущая) Комбинированная

Решение задачи определения модуляционной структуры сигнала является использование методов статистической теории распознавания образов. Постановка задачи распознавания предполагает выбор признаков распознавания, определение их статистических характеристик, формирование эталонных описаний распознаваемых классов, выбор решающего правила отнесения контрольной выборки и способов оценивания ошибок распознавания.

В классической постановке задача распознавания формулируется как задача отнесения некоторой контрольной выборки признаков распознавания $\{x_i\}, i = 1, \dots, N$ к одному из описываемых классов S_1, \dots, S_m . При этом известные методы распознавания отличаются в основном способами описания S_1, \dots, S_m .

В настоящее время хорошо изучена задача распознавания для полностью описанных классов, когда они однозначно определяются функциями распределения $W(x) = W(x|S_i)$, либо функциями плотности вероятности $\omega(x|S_i) = dW(x|S_i)dx$ и априорными вероятностями

их появления p_i [4]. Однако для проведения технического анализа модуляционной структуры сигналов систем радиосвязи использование классических методов оптимальной оценки параметров и статистической теории распознавания образов малоэффективно. Требование оперативности настройки обрабатывающей аппаратуры обуславливает необходимость разработки специальных методов определения модуляционных параметров по неклассифицированной выборке фиксированного объема, поэтому практический интерес представляет задача разработки более простого и эффективного метода определения модуляции.

Структуру сигнала позволяют определить автокорреляционный и корреляционный методы. В первом случае исследуемый сигнал умножается на сдвинутые по времени его копии, во втором – реализуется перемножение сигнала с рядом опорных колебаний с тем или иным видом модуляции при различных параметрах модуляции. Автокорреляция используется для определения таких параметров сигнала, как длительность посылки, длительность блока данных. Корреляция позволяет идентифицировать конкретный сигнал из имеющего набора и, в частности, определять наличие синхро- или пилот-последовательностей.

Наиболее наглядно выявление типа модуляции на основе векторного представления сигналов. Под векторным представлением понимают отображение мгновенной амплитуды и фазы сигнала на комплексной плоскости [1]. Для каждого типа модуляции (аналоговой, импульсной, цифровой) можно выделить основной ряд параметров, которые характеризуют сигналы в данном типе модуляции.

Алгоритм идентификации источника излучения по неизвестным параметрам

При идентификации сигнала с эфира можно выделить два обобщенных алгоритма распознавания неизвестного сигнала: идентификация ИРИ с неизвестными параметрами и с заданным(и) параметром(ами). На рис. 3 представлен обобщенный алгоритм идентификации ИРИ при неизвестных параметрах сигнала.

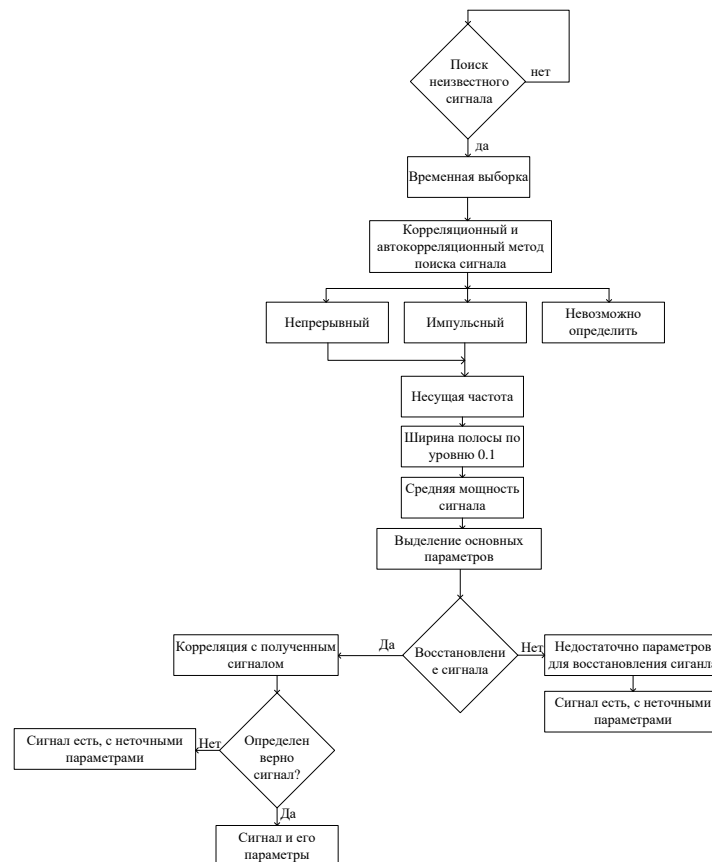


Рис. 3. Обобщенный алгоритм для идентификации источника излучения
Fig.3. Generalized algorithm for radiation emission source

В соответствии с представленным на рис. 3 алгоритмом происходит сканирование радиоэфира во всей частотной области радиоприемного устройства и производится анализ временной выборки на заданной частоте. Первоначальной задачей алгоритма является определение частоты сигнала, занимаемой полосы и вида модуляции. Предположительную структуру сигнала позволяет определить корреляционный и автокорреляционный метод. Если сигнал присутствует, то производится анализ временной выборки на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ). На основе этих данных определяются ширина полосы по уровню $0,1P_{\text{норм}}$ и средняя мощность сигнала. Далее алгоритм путем перебора определяет вид модуляции и основные параметры, после чего на основе полученных данных формируется структура с наиболее вероятным видом модуляции и параметры сигнала. На основе данной структуры алгоритм формирует сигнал, который сравнивается с принимаемым сигналом, в результате чего осуществляется вывод информации о наличии сигнала и его виде.

Алгоритм идентификации источника излучения по заданным параметрам

Представленный на рис. 3 алгоритм имеет множество недостатков, так как использует метод перебора всех видов модуляции, что может привести к ложному срабатыванию. При отсутствии знаний о параметрах искомого сигнала данный метод не способен точно найти сигнал. Поэтому предлагается алгоритм, основанный на использовании сигнатурного детектирования сигнала (рис. 4). Идея данного алгоритма заключается в том, что принимаемый сигнал сравнивается в блоке сравнения с сигнатурами, занесенными в память устройства, либо с сигналом с заданными параметрами, формируемым с помощью этого устройства его оператором. Далее решающее устройство определяет, соответствует ли сигнал сигнатуре или сигналу с заданными свойствами либо нет.

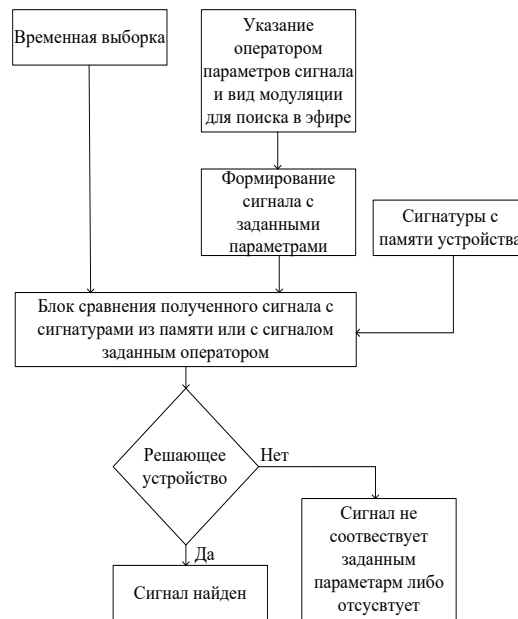


Рис. 4. Обобщенный алгоритм идентификации источника излучения по заданным параметрам
Fig. 4. Generalized algorithm for the identification of the emission source according to the specified parameters

Например, если в качестве сигнатуры использовать ЛЧМ сигнал с определенными параметрами и принимать такой же с шумом ЛЧМ сигнал, то в блоке сравнения сигналов будет иметься один узкий максимум. При изменении параметра(ов) сигнала максимум будет расширяться, что свидетельствует об отклонении параметров принимаемого ЛЧМ сигнала от параметров сигнатуры. При приеме другого вида сигнала на выходе сравнивающего блока будет шум, что свидетельствует о не совпадении сигналов (рис. 5).

Главным недостатком данного алгоритма: совершенствование базы излучаемых сигналов и сложность их кодирования, что приводит к постоянному обновлению базы данных устройства поиска сигналов.

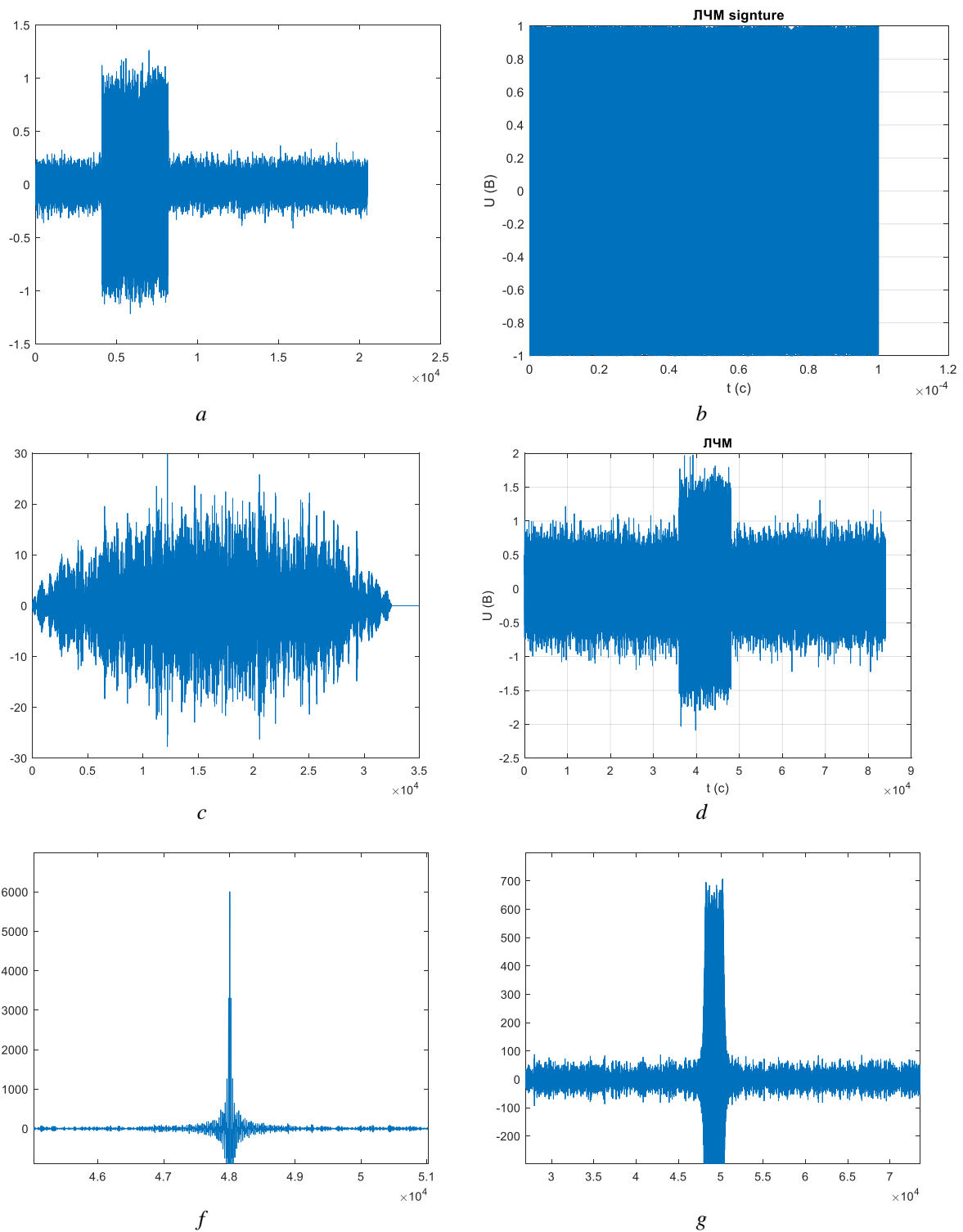


Рис. 5. Принцип работы алгоритма идентификации источника излучения по заданным параметрам: *a* – зашумленный АМ сигнал; *b* – сигнатура ЛЧМ сигнала; *c* – результат блока сравнения принятого АМ сигнала с сигнатурой ЛЧМ; *d* – зашумленный ЛЧМ сигнал с такими же параметрами как ЛЧМ-сигнатура; *e* – результат блока сравнения ЛЧМ принятого сигнала с сигнатурой ЛЧМ (при одинаковых параметрах сигнала); *f* – результат блока сравнения ЛЧМ принятого сигнала с сигнатурой ЛЧМ (при увеличении девиации частоты)

Fig. 5. The principle of operation of the radiation source identification algorithm for the specified parameters: *a* – noisy AM signal; *b* – the signature of a chirp signal; *c* – the result of a block comparison of a received AM signal with the chirp signature; *d* – noisy chirp signal with the same parameters as the chirp signature; *e* – the result of the compare unit chirp received signal with the signature chirp (with the same parameters of the signal), *f* – the result of the compare unit chirp received signal with the signature chirp (increasing frequency deviation)

Заклучение

В статье рассмотрены вопросы, связанные с определением видов и параметров модуляции. Представлены два обобщенных алгоритма распознавания сигнала. Метод с использованием сигнатур увеличивает скорость анализа сканируемой полосы радиочастот, имеет высокую точность обнаружения сигнала и малую вероятность срабатывания на ложный сигнал. Данный метод можно применять в комплексе с разведывательными устройствами для обнаружения целей с заданными параметрами. Для эффективной идентификации источника излучения рекомендуется использовать комбинацию представленных алгоритмов с дополнительной цифровой обработкой сигналов.

Список литературы

1. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. *Радиомониторинг задачи, методы, средства*. М.: Горячая линия – Телеком; 2006.
2. Ашихмин А.В., Виноградов А.Д., Рембовский А.М. *Принципы построения современных радиопеленгаторов*. М.: Ведомственные корпоративные сети и системы; 2002.
3. Онищук А. Г., Забеньков И.И., Амелин А. М. *Радиоприемные устройства*. Минск: Новое знание; 2007.
4. Фомин Я.А. *Статистическая теория распознавания образов*. М.: Радио и связь, 1986.

References

1. Rembovsky A. M., Ashihmin A.V., Kozmin V.A. [*Radiomonitoring tasks, methods*]. M.: Garachay linia – Telekom; 2006. (In Russ.)
2. Ashikhmin A.V., Vinogradov, A.D., Rembovsky A.M. [*The principles of modern finders*]. .M.: Vedomstvenie korporativnie seti i sistemi; 2002. (In Russ.)
3. Onishchuk A.G., Zabenkov I.I., Amelin A.M. [*Receivers*]. Minsk: Novie znania. 2007. (In Russ.)
4. Fomin, Ya. A. [*Statistical theory of pattern recognition*]. M.: Radio i svyaz; 1986. (In Russ.)

Сведения об авторе

Архипенков Д.В., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Arkhipkov D.V., PG student of Information Radio-technologies department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-260-74-76;
e-mail: rembolt94@gmail.com
Архипенков Дмитрий Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-260-74-76;
e-mail: rembolt94@gmail.com
Arkhipenkov Dmitry Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-59-66>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 544.653

ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН НА МЕХАНИЗМ ИХ АНОДИРОВАНИЯ

ГРЕВЦОВ Н.Л., КЛИМЕНКО А.В., ГУРБО А.Д., БОНДАРЕНКО В.П.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 26 сентября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Проведено исследование влияния кристаллографической ориентации кремниевых пластин на процесс формирования слоев пористого кремния методом электрохимического анодирования во фтористоводородной кислоте. Анализ изображений сколов образцов с различной кристаллографической ориентацией, полученных методом сканирующей электронной микроскопии, показал, что поры в пористом кремнии на пластинах с ориентацией (111) имеют более разветвленный древообразный вид и большую пористость по сравнению с таковыми на пластинах с ориентацией (100). Данная особенность объясняется различиями в строении приповерхностного слоя кристалла и количестве связей Si-Si в разных направлениях. Так, у кристалла с ориентацией (100) каждый поверхностный атом кремния имеет две связи, соединяющие его с находящимися ниже атомами, а также две поверхностные оборванные связи, способные вступать во взаимодействие с ионами фтора. При анодировании путем инжекции электронов в кремний прикладывается энергия, достаточная для разрыва нижних связей с образованием SiF комплекса. Наличие двух связанных с поверхностным атомом кремния ионов фтора приводит к ослаблению связей поверхностного атома Si с нижерасположенными, делая разрыв связей Si-Si более энергетически выгодным. Для кристалла же с ориентацией (111) у атомов кремния присутствует только одна оборванная связь на поверхности, а для разрыва связей с нижерасположенными атомами кремния требуется большая энергия активации в связи с их большим количеством (три по сравнению с двумя для (100)). Заключено, что именно по данной причине травление подложек с ориентацией (111) происходит медленнее. Полученные результаты позволяют оценить влияние кристаллической структуры на процесс травления, в частности на его скорость и направление, что является особенно важным фактором при анодировании пластин с ориентацией (111).

Ключевые слова: кремниевые наноструктуры, пористый кремний, электрохимическое травление.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гревцов Н.Л., Клименко А.В., Гурбо А.Д., Бондаренко В.П. Влияние кристаллографической ориентации кремниевых пластин на механизм их анодирования. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 59-66.

INFLUENCE OF SILICON WAFER CRYSTALLOGRAPHIC ORIENTATION ON ANODIZATION MECHANISM

NIKITA L. GREVTSOV, ARSENI V. KLIMENKA, ALIAKSANDRA. D. HURBO,
VITALY P. BONDARENKO

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 26 September 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The influence of silicon wafer crystallographic orientation on the formation of porous silicon during anodization in an HF solution is studied. Cross-section SEM image comparison of samples with different crystallographic orientations has shown that (111) Si samples exhibit a more branching, tree-like pore structure with a higher porosity value compared to (100) Si samples. This phenomenon is explained by pointing out differences in crystal structure and numbers of Si-Si chemical bonds in different crystallographic directions. Namely, in (100)-oriented silicon crystals every surface Si atom has two bonds connecting it to atoms underneath it, as well as two broken bonds able to interact with F^- ions. Through electron injection into silicon, enough energy is applied to break the underlying bonds, forming SiF as a result. The presence of two F^- ions bonded with every surface silicon atom leads to weakening the bonds of surface silicon atoms with the underlying atoms, thus making the process of breaking the Si-Si bonds more energy efficient. As for (111)-oriented crystals, silicon atoms only have one broken surface bond, and breaking backbonds with underlying silicon atoms requires a higher value of activation energy due to their larger amount (three as opposed to two for (100) silicon). It is concluded that this very reason leads to slower etching speeds of (111)-oriented silicon wafers. The results help evaluate the way the silicon crystal structure affects the etching process, including its speed and direction, which is an especially important factor to consider when forming (111)-oriented porous silicon.

Keywords: silicon nanostructures, porous silicon, electrochemical etching.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Grevtsov N.L., Klimenka A.V., Hurbo A.D., Bondarenko V.P. Influence of silicon wafer crystallographic orientation on anodization mechanism. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 59-66.

Введение

Пористый кремний (ПК), открытый в 1956 году, активно исследуется в настоящее время. Данный материал проявляет ряд характерных электрофизических и оптических свойств, позволяющих эффективно применять его в таких областях, как оптоэлектроника, микроэлектроника, фотоника, медицина, биоинженерия и др. [1–3]. В связи с этим важной задачей является разработка методики формирования слоев ПК на кремниевых пластинах с различными структурными параметрами для выполнения различных задач.

Наиболее эффективной методикой формирования слоев ПК на монокристаллических кремниевых пластинах является их анодирование в растворах фтористоводородной кислоты. В ряде опубликованных работ установлено, что скорость и направление травления кремния при формировании слоев ПК в процессе электрохимического анодирования зависят от кристаллографической ориентации обрабатываемой кремниевой пластины [1, 4, 5]. Данная зависимость обусловлена прежде всего особенностями кристаллической структуры приповерхностного слоя кремния. Целью настоящего исследования является изучение природы данной зависимости, а также установление основных закономерностей между кинетикой формирования и структурными параметрами пористого слоя и кристаллографической ориентацией используемых кремниевых пластин.

Методика проведения эксперимента

В качестве подложек для формирования ПК выбраны кремниевые пластины марки КЭС-0,01 кристаллографической ориентации (100) и (111). Пластины предварительно очищались в хромовой смеси, после чего производилось удаление с них слоя естественного окисла в растворе HF. Формирование ПК выполнялось путем анодирования в электрохимической ячейке. Использованный для травления кремния электролит представлял собой раствор, содержащий HF, воду и изопропиловый спирт в объемном соотношении 1:3:1. Процесс анодирования проводился при постоянной плотности тока.

Для изучения морфологии сформированных пористых структур использовался растровый электронный микроскоп (РЭМ) Hitachi S-4800, с помощью которого получены изображения поверхности и сколов образцов.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены РЭМ изображения сколов образцов, полученных на кремнии (100) и (111) анодированием в течение 5 мин при плотности анодного тока 40 mA/cm^2 . Изображения показывают приповерхностную область ПК, а также область, граничащую с монокристаллической подложкой.

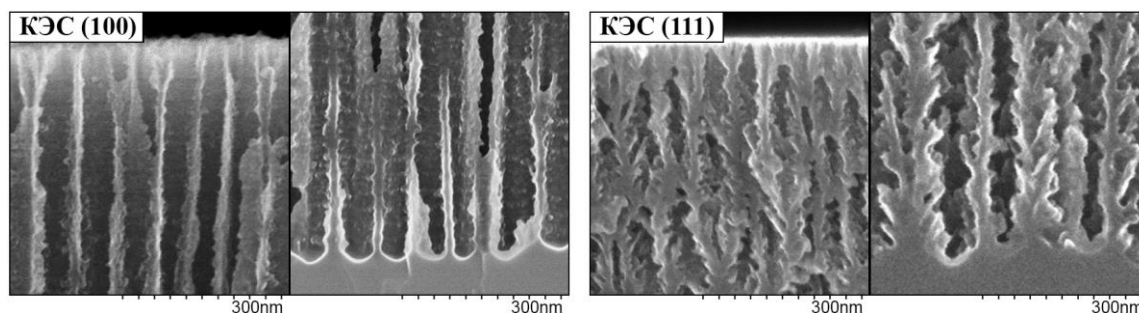


Рис. 1. Сравнение РЭМ изображений сколов образцов ПК на подложках различной кристаллографической ориентации, сформированных при плотности анодного тока 40 mA/cm^2
Fig. 1. Cross-section SEM image comparison of porous silicon samples formed at a current density of 40 mA/cm^2 on wafers with different crystallographic orientations

На границе слоя ПК и монокристалла кремния с ориентацией (100) хорошо видна цилиндрическая форма каналов пор, а диаметр пор практически соответствует таковому в середине слоя пористого материала. Это означает, что размер формируемых в процессе обработки пор практически не изменяется по мере роста толщины слоя ПК.

Размер каналов пор на глубине слоя ПК, сформированного на монокристалле кремния с ориентацией (111), существенно больше, чем в его приповерхностной области. Кроме того, отличительной особенностью пористой структуры в изучаемом образце является то, что она имеет древовидную форму с большим количеством боковых ответвлений от центральных каналов пор. На границе слоя ПК и монокристаллического кремния хорошо видна развитая форма каналов пор с большим диаметром, чем в средней части слоя. Это является следствием диффузионных ограничений на обмен реагентами между нижней частью каналов пор и объемом электролита. В результате данных ограничений размеры каналов пор увеличиваются с ростом толщины ПК, что выражается в повышении пористости более толстых слоев ПК.

На рис. 2 представлены зависимости толщины формируемого пористого слоя от продолжительности обработки кремниевых пластин, имеющих различную ориентацию. При анодировании кремния с ориентацией (100) данные зависимости имеют линейный вид. Иными словами, в процессе анодирования за одни и те же временные интервалы происходит травление одного и того же объема материала, а число и средний диаметр каналов формируемых пор, по-видимому, не меняются. При этом по углу наклона представленных зависимостей можно судить о скорости формирования пористого слоя: при более низких величинах плотности тока наблюдается меньший наклон линий, т. е. травление происходит медленнее.

Для кремниевых пластин с ориентацией (111) зависимости толщины слоев ПК от времени анодирования являются нелинейными. При этом наиболее сильно зависимость отличается от линейной для случая наименьшей плотности тока (20 mA/cm^2). Нелинейность зависимостей говорит о том, что число и размер каналов формируемых пор может изменяться в ходе анодирования. Данный фактор необходимо учитывать при формировании ПК на кремниевых подложках с ориентацией (111).

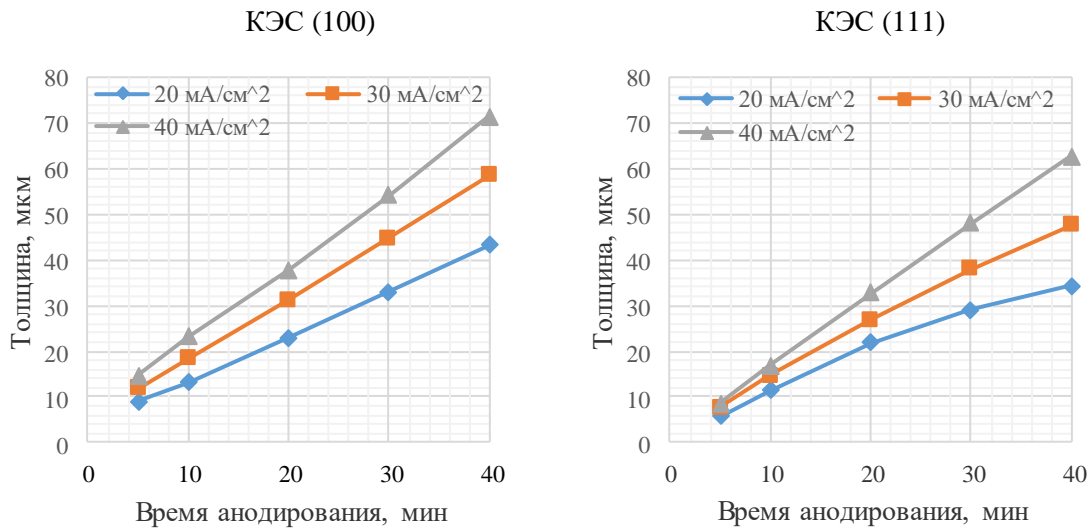


Рис. 2. Зависимость толщины пористого слоя от времени анодирования для образцов кремния различной кристаллографической ориентации
Fig. 2. Porous layer thickness dependence on anodization time for samples formed on silicon wafers with different crystallographic orientations

На рис. 3 приведены зависимости пористости образцов ПК от продолжительности обработки.

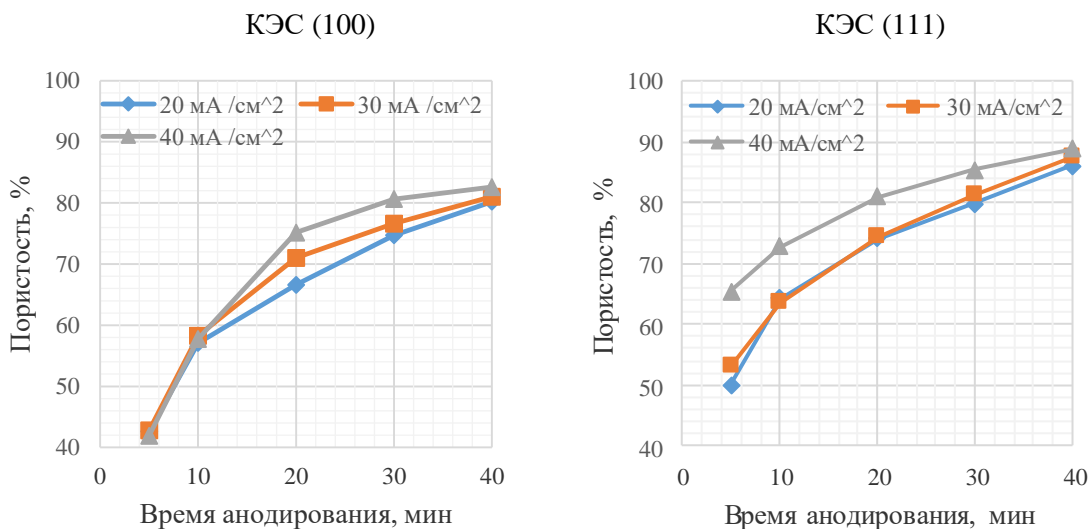


Рис. 3. Зависимость пористости от времени анодирования для образцов кремния различной кристаллографической ориентации
Fig. 3. Porosity dependence on anodization time for samples formed on silicon wafers with different crystallographic orientations

Нелинейный характер зависимостей пористости от времени анодирования подтверждает высказанное выше предположение о возможности изменения формы и размеров каналов пор на этапах процесса анодирования, когда наблюдаются отклонения от линейности

в кинетических зависимостях толщины слоя ПК при больших толщинах слоя ПК. Стоит отметить, что этот эффект проявляется сильнее при низких плотностях тока.

На рис. 4 изображены полученные зависимости пористости слоя ПК от его толщины. Для всех трех значений плотности тока пористость формируемого в процессе анодирования слоя ПК увеличивается с ростом его толщины. Данная зависимость может быть связана с изменением размеров пор в процессе их роста.

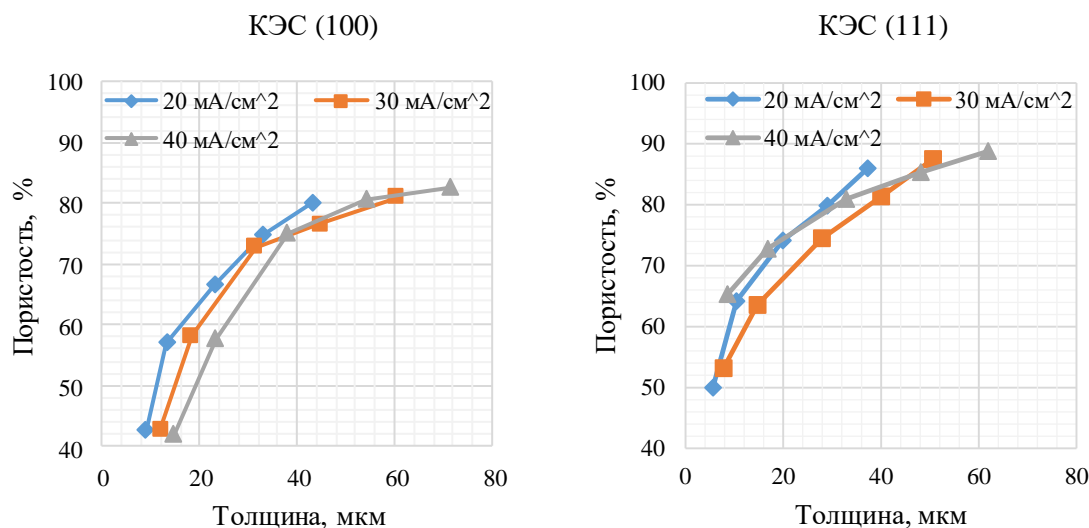


Рис. 4. Зависимость пористости от толщины пористого слоя для образцов кремния различной кристаллографической ориентации

Fig. 4. Porosity dependence on porous layer thickness for samples formed on silicon wafers with different crystallographic orientations

Как видно из полученных результатов, ПК, получаемый на кремниевых пластинах с кристаллографической ориентацией (100), обладает меньшей пористостью по сравнению с таковым на пластинах с ориентацией (111). Кроме того, важно отметить, что пористость слоев ПК на пластинах с ориентацией (111) сильно изменяется (увеличивается) по мере увеличения толщины пористого слоя. Для кремния (100) этот эффект также имеет место, однако изменение пористости с увеличением толщины пористого слоя не столь значительно.

Модель роста пор

На основании полученных результатов можно рассмотреть возможное влияние кристаллографической ориентации на механизм образования и роста пор.

Процесс роста толщины пористого слоя происходит с большей скоростью на начальных этапах анодирования за счет более простого доступа реагентов вглубь пор, причем увеличенная скорость травления на начальных этапах более ярко выражена для случая кремниевых пластин с ориентацией (100). Это может быть обусловлено меньшей плотностью упаковки атомов в направлении, в котором происходит травление [5, 6].

На находящуюся в контакте с HF поверхность кремниевой пластины происходит адсорбция водорода [7]. Иллюстрация механизма травления на примере пластины с кристаллографической ориентацией (100) приведена на рис. 5.

Первый шаг растворения кристалла в процессе травления представляет собой замещение поверхностного атома водорода ионом фтора за счет инжекции дырок (рис. 5, a) [8]. Это ведет к возникновению связи Si-F. Присоединение второго иона фтора приводит к выделению молекулы водорода (рис. 5, b).

Вторая стадия травления заключается в разрыве связи Si-Si между поверхностными и нижележащими атомами кремния (рис. 5, c). В результате формируется молекула SiF₄, а оставшиеся поверхностные атомы кремния формируют связи с атомами водорода. Молекулы SiF₄ затем вступают в реакцию с двумя молекулами HF с формированием H₂SiF₆ (рис. 5, d).

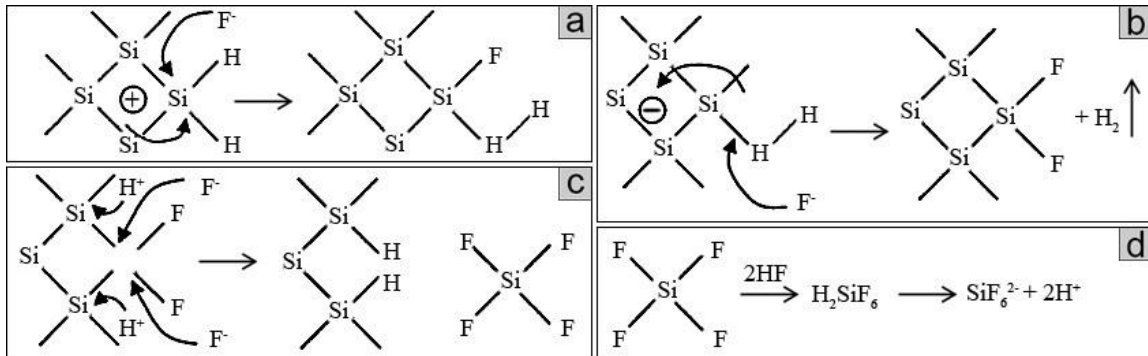


Рис. 5. Стадии процесса травления кремниевой пластины с ориентацией (100) в растворе HF
Fig. 5. Etching process stages for a (100)-oriented silicon wafer immersed in HF

Принципиальное различие механизма формирования Si-F связей для пластин с различными кристаллографическими ориентациями проиллюстрировано на рис. 6.

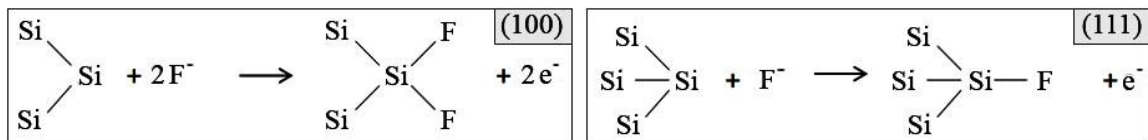


Рис. 6. Сравнение механизмов образования связи Si-F для кремниевых пластин разной кристаллографической ориентации
Fig. 6. Si-F bond formation mechanism comparison for silicon wafers with different crystallographic orientations

У кристалла с ориентацией (100) каждый поверхностный атом кремния имеет две связи, соединяющие его с находящимися ниже атомами, а также две поверхностные оборванные (либо с адсорбированными атомами водорода) связи, способные вступать во взаимодействие с ионами F^- [9]. При этом путем инжекции электронов в кремний прикладывается энергия, достаточная для разрыва нижних связей с образованием SiF комплекса по описанному механизму. Наличие двух связанных с поверхностным атомом кремния ионов F^- приводит к ослаблению связей поверхностного атома Si с нижерасположенными, делая разрыв связей Si-Si более энергетически выгодным.

Для кристалла с ориентацией (111) у атомов кремния присутствует только одна оборванная связь на поверхности, а для разрыва связей с нижерасположенными атомами кремния требуется бóльшая энергия активации в связи с их бóльшим количеством (три по сравнению с двумя для (100)). По данной причине травление подложек с ориентацией (111) происходит медленнее. Еще одной вероятной причиной является шероховатость поверхности. Поверхность кремния в направлении (111) является атомарно плоской, что ограничивает возможность зарождения пор, приводя к меньшей скорости травления [10].

Заключение

На основании полученных экспериментальных результатов сделаны предположения о механизме формирования слоев ПК в процессе анодирования кремниевых пластин различных кристаллографических ориентаций. Полученные при анодировании кремния с ориентацией (111) слои ПК имеют меньшие толщины, чем слои, полученные в тех же режимах анодирования на кремнии (100). Это говорит о меньшей скорости роста слоев ПК на кремнии с ориентацией (111).

Помимо повышенной скорости роста, ПК, получаемый на пластинах с кристаллографической ориентацией (100), обладает меньшей пористостью по сравнению с его аналогом на кремнии с ориентацией (111). Кроме того, пористость ПК на пластинах с ориентацией (111) сильно изменяется (увеличивается) по мере увеличения толщины пористого слоя. Для кремния (100) этот эффект также имеет место, однако изменение пористости с увеличением толщины пористого слоя не такое значительное.

Установлено, что при формировании слоев ПК на кремнии (100) каналы пор имеют форму, близкую к цилиндрической, и диаметр каналов пор практически не изменяется по толщине слоя ПК. При этом увеличение плотности тока анодирования приводит к увеличению диаметра каналов пор, а их количество в расчете на единицу анодируемой площади кремния практически не изменяется. Главной особенностью структур, формируемых в кремнии (111), является то, что поры имеют древовидную форму с большим количеством боковых ответвлений от центра канала.

Список литературы / References

1. Korotcenkov G. *Porous Silicon: From Formation to Application: Formation and Properties, Volume One*. New York: CRC Press; 2016.
2. Korotcenkov G., Cho B.K. Porous semiconductors: Advanced material for gas sensor applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2010;35(1):1-23. DOI: 10.1080/10408430903245369
3. Kochergin V., Föll H. *Porous Semiconductors: Optical Properties and Applications*. London: Springer; 2009.
4. Jakubowicz J. Nanoporous silicon fabricated at different illumination and electrochemical conditions. *Superlattices and Microstructures*. 2007;41(4):205-215. DOI: 10.1016/j.spmi.2006.12.003.
5. Sailor M.J. *Fundamentals of Porous Silicon Preparation*. New York: Wiley; 2012.
6. Xiao C., Guo J., Zhang P. Chen C., Chen L., Qian L. Effect of crystal plane orientation on tribochemical removal of monocrystalline silicon. *Scientific Reports*. 2017;7(40750). DOI: 10.1038/srep40750
7. Manilov A.I., Skryshevsky V.A. Hydrogen in porous silicon. *Materials Science and Engineering B*. 2013;178:942-955. DOI: 10.1016/j.mseb.2013.05.001
8. Dhanekar S, Jain S. Porous silicon biosensor: Current status. *Biosensors and Bioelectronics*. 2013;41:54-64. DOI: 10.1016/j.bios.2012.09.045
9. Monteiro T.S., Kastytis P., Goncalves L.M., Minas G., Cardoso S. Dynamic Wet Etching of Silicon through Isopropanol Alcohol Evaporation. *Micromachines*. 2015;6(10):1534-1545. DOI: 10.3390/mi6101437
10. Adams T., Layton R. *Introductory MEMS: Fabrication and Applications*. New York: Springer; 2010.

Вклад авторов

Клименко А.В. и Гурбо А.Д. подготовили необходимые образцы и выполнили первичный анализ полученных результатов.

Гревцов Н.Л. произвел окончательный анализ и систематизацию результатов и подготовил текст статьи, основываясь на выводах из результатов и теоретических исследованиях.

Бондаренко В.П. планировал и курировал работу, а также вносил правки в текст статьи.

Authors contribution

Klimenka A.V. and Hurbo A.D. prepared the required samples and conducted initial results analysis.

Grevtsov N.L. finalized the analysis and prepared the present article's manuscript based on the results and prior theoretical research.

Bondarenko V.P. planned and supervised the project, provided critical feedback to the manuscript contents.

Сведения об авторах

Гревцов Н.Л., магистрант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Клименко А.В., магистрант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гурбо А.Д., магистрант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бондаренко В.П., к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 4.3 НИЧ БГУИР.

Information about the authors

Grevtsov N.L., Master Student of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Klimenka A.V., Master Student of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Hurbo A.D., Master Student of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bondarenko V.P., PhD, Associate Professor, Head of R&D Laboratory 4.3 of BSUIR.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375 (17) 293-88-54;
e-mail: hrautsou@gmail.com
Гревцов Никита Леонидович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str. 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375 (17) 293-88-54;
e-mail: hrautsou@gmail.com
Grevtsov Nikita Leonidovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-67-73>

Оригинальная статья
Original paper

UDC [004.934+004.056.5]:811.411.21

INTELLIGIBILITY OF THE KAZAKH SPEECH WHEN IT'S PROTECTED WITH COMBINED MASKING SIGNALS

¹YERZHAN N. SEITKULOV, ¹SEILKHAN N. BORANBAYEV

²HENADZI V. DAVYDAU, ²ALEKSANDR V. PATAPOVICH

¹*L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan*

²*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus*

Submitted 3 December 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The article is devoted to assessing the intelligibility of the Kazakh speech when it's masked by combined signals, including «white» noise and speech-like signals. The phonetics features of the Kazakh language have been considered taking into account the law of syngarmonism and the spectrum differences of speech in the Kazakh language and speech in the Russian language. A technique for assessing the intelligibility of the Kazakh speech when it's masked by «white» noise and speech-like signals is proposed. The aim of the work is to analyze well-known methods for speech intelligibility assessing and applying these methods to assess speech intelligibility in the Kazakh language, taking into account masking by its combined signals. Due to the fact that the use of the articulation method of assessing intelligibility for the Kazakh speech requires a dependence of intelligibility on the articulation index for this particular language (the application for the Kazakh language has not been experimentally tested), the use of the formant approach to speech intelligibility assessing will be examined in more detail. The carried out experimental studies of the spectral density of speech in the Kazakh language made it possible to obtain it's approximate dependence on the frequency and take into account the phonetic features of the Kazakh speech when assessing the security of the speech information using the formant method.

Keywords: combined masking signal; security of voice information; «white» noise; speech-like signal.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. This work was supported by grant funding from the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, No. AP05130293.

For citation. Seitkulov Y.N., Boranbayev S.N., Davydau H.V., Patapovich A.V. Ittelligibility of the Kazakh speech when it is protected with combined masking signals. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 67-73.

Introduction

A sufficient number of methods for assessing speech intelligibility on the background of noise or masking signals have been developed. There is an International Standard. All such methods might be divided into two classes: methods based on the formant approach (formant method) [1, 2] and methods based on the using of the articulation index (articulation method) [3–5]. The formant method has been developed for the Russian language. It was primarily aimed at ensuring the quality

of the speech transmission over communication channels. The articulation method and the articulation index were developed in Bell's laboratory to ensure the quality of communication in aviation technology and was oriented to the English language. Both formant and articulation methods for assessing speech intelligibility have been developed for areas of speech intelligibility above 50 % and after significant improvements they found application for areas of speech intelligibility of several percent for solving problems of protection of the speech information.

The essence of the formant method for speech intelligibility assessing is to find the sum of speech intelligibility in each of the bands of the speech frequency range. Such an assumption is possible if the signal and the masking noise at these frequencies are independent. Formant speech intelligibility is calculated from the expression [1, 5].

$$A = \sum_{k=1}^k p_k \cdot w(E_k), \quad (1)$$

where k is frequency band number for which formant speech intelligibility is calculated; p_k is the probability of the formants location in the k^{th} frequency band; $w(E_k)$ is speech perception coefficient as a function of signal-masking noise ratio in the k^{th} frequency band; E_k is the ratio of the level of the speech signal in the k^{th} band to the level of the masking signal in this frequency band.

The probability of formants finding in the k^{th} band is calculated by the distribution function of formants in the speech frequency range and is determined from the expression [1]

$$p_k = F(f_{hk}) - F(f_{lk}), \quad (2)$$

where $F(f_{hk})$ and $F(f_{lk})$ are frequency distribution functions of formants at the highest and lowest frequencies of the k^{th} band accordingly.

The articulation method for assessing speech intelligibility is based on the calculation of the articulation index for a given frequency range.

In the works [4,] it has been proposed to evaluate the security of the speech information using indicators of intelligibility, audibility and cadence (rhythm). It has been proposed to calculate of the speech intelligibility through the SNR or SPI indicator, using signal-to-noise ratios for 16 1/3 octave frequency bands [4, 5, 7, 8]. SNR is determined from the expression

$$SNR = \sum_{f=160}^{5000} [L_{ts}(f) - L_n(f)] / 16, \text{ dB} \quad (3)$$

where $L_{ts}(f)$ is the level of the speech transmitted to the position of the disturber; $L_n(f)$ is the level of the external noises on the position of the disturber.

The sum (3) is defined for each of 1/3 octave bands with an average frequency f .

The value in square brackets of the expression (3) couldn't be less than -32 dB.

If the signal-to-noise ratio in a particular frequency band is less than -32 dB, then this value is significantly lower than the auditory threshold and such extremely low values will inappropriately exaggerate the speech confidentiality degree. Therefore, it is necessary to limit the values of the difference in signal-to-noise levels in each 1/3 octave frequency band with a value of at least -32 dB.

In this case, the transition from the values of the SNR parameter to the indicator of speech intelligibility is performed using the dependence presented in graphical form. However, this dependence is characteristic of the English speech and the application of this dependence for other languages, including Kazakh, characterized by own phonetic specificity, is very problematic.

Assessing the security of speech information by the parameter speech intelligibility for languages other than Russian and English using the considered methods could introduce a system error due to differences in the speech spectrums of for different languages. In addition, different distributions of languages phonemes on the frequency range will also impact to the speech intelligibility. The differences in the speech spectrums for 12 languages have been studied in [7]. The significant differences both at low and high frequencies have been shown.

Research and comparison of formant properties of the Ukrainian and Russian speech have been performed in [8, 9]. It was found that when signal-to-noise ratios are small and levels of sound pressure of the speech signal are high, intelligibilities of the Russian and Ukrainian speech are almost the same, but when signal-to-noise ratios are large, intelligibility of the Ukrainian speech is noticeably

lower. In this case, the formant method for speech intelligibility assessing was used. When signal-to-noise ratio is small, the same intelligibility for the Ukrainian and Russian speech is due to the influence of the factor that the speech apparatus of the speakers is formed in the conditions of bilingualism and they equally easily know each language.

If the phonetic structure and intelligibility indicators of the Ukrainian and Russian speech are close, then it is necessary to take into account the phonetic features of the Kazakh language, when assessing intelligibility of the speech in this language. In addition, the existing methods for speech intelligibility assessing, discussed above and used in voice information protection systems, are focused on the use of the masking signal – «white», «pink» or another type of noise. The use of combined masking signals in modern voice information protection systems imposes its own characteristics on the speech intelligibility assessment as an indicator of the security of speech information [10–14] and was not reflected in the publications.

Combined masking signals

Combined masking signals used for the speech information protection from leakage via technical channels usually contain a noise component in the form of «white» noise and speech-like signals formed based on the structural units of speech taking into account the probability distribution of their appearance in a given language [11–13].

Quite often, it is recommended to use «pink» noise as a noise component – it's a noise whose spectral density decreases with increasing frequency according to dependence f_0/f_c , where f_0 is low frequency value of the noise; f_c is current frequency value [15, 16].

An important requirement for masking signals is the requirement that they are generated randomly, i.e. that «white» noise is generated due to thermal noise of semiconductor devices or other nature of physical noise. This requirement is due to the need to exclude any possibility of cleaning the noise from intercepted acoustic signals.

Speech-like signals intended for masking speech information are similar in their formal properties to continuous speech, however, there are temporary sections where the speech-like signal is absent (as well as in natural speech). These sections should be filled with a noise signal to exclude gaps and cases when information signal has got empty temporary sections which are not filled with noise.

Such approach to the formation of speech masking combined signals provides higher levels of security of the speech information, as the difficulty of isolation and processing of any signal increases when interference (combined masking signals, including speech-like signals) becomes closer to the protected signal in shape and frequency. Therefore, one of the promising options for the formation of masking speech-like signals is their formation on the base of the structural units of the speech of the speakers, whose speech signals require an increased degree of protection. Moreover, the formants of the protected speech signals and the formants of the masking speech-like signals are difficult to distinguish.

The method of synthesis of speech-like signals in the Russian and Belarusian languages should be used as a base for the formation of speech-like sequences in the Kazakh language. The features of the formation of speech-like sequences in the Kazakh language are associated with the law of syngarmonism (harmony of vowels and harmony of consonants). Only hard or only soft vowels can be combined in a word of the Kazakh language. Words of foreign origin (Arabic, Persian and Russian) could contain both soft and hard vowels. A restriction on the use in one word (in the root of the word and derivative bases) of either soft or hard vowels was applied when forming speech-like sequences of the Kazakh language. Consonant assimilation is used for voicing and deafness. If the last sound of the root of the word is deaf or ends in voiced b, v, g, d , then the initial consonant sound of the affix is deaf. If the last sound of the root of the word is dull consonant q, k, p and the initial affix sound is vowel, then the deaf q, k, p go into \acute{g}, g, b . Sound a is not used in words with vowels $\acute{a}, e, i, \acute{\iota}, \acute{u}$, as well as with soft consonants g, k .

Sound g is not used at the beginning and at the end of the Kazakh language words and in combination with vowels a, o, u, y . It is not used in words and in combination with strong consonants \acute{g}, \acute{k} . L is written at the beginning of the Kazakh language words, but not pronounced,

therefore, it is not used at the beginning of the words of the speech-like sequences. The sound *o* is not used at the end of the Kazakh language words. These features of the Kazakh language have been when forming of the speech-like sequences, which were converted into acoustic speech-like signals to mask speech. Speech-like signals also could be formed as a dialogue of negotiators. At the same time, the ratio of the speech-like signal to the masking «white» noise should be –6 dB. It provide the case when the level of consonant sounds in speech-like signals exceeds the vowels sound in speech information signal.

It is difficult to evaluate analytically the intelligibility of speech masked by combined signals, as the ratio of the speech signal to the combined noise will change over time within small limits and it is necessary to take into account the probability of coincidence of the formants of the speech signal and the formants of the speech-like interference. Therefore, the most acceptable solution is to use the limit state method in calculations and to take into account the specific features of the phonetics of the language.

Method for assessing the intelligibility of Kazakh speech and experimental results

The phonetics features of the Kazakh language, which may affect the intelligibility of the speech in this language, compared to the Russian and other languages, are as follows.

The law of syngarmonism of the Kazakh language is that the vowels of the Kazakh language can be hard or soft. In one word, the vowels can be either hard or soft. Solid vowels are *a, o, u, y*. Soft vowels are *e, á, ó, ú, i*. Experimental studies have shown that the sound pressure level of the words spoken with soft vowels are lower on 1 dB than words the sound pressure level of the with hard vowels. Moreover, the number of words with hard vowels in the Kazakh language is 59 %, and the number of words with soft vowels is 41 % (data obtained from the texts analysis).

The feature of the speech signals is that they have a formant character. Formant is the area of the frequency band in which the main energy is concentrated when pronouncing a certain vowel phoneme. For each vowel phoneme, the number of formants could range from 3 to 5. If consonant sounds have an energy distribution over a frequency band, then vowel sounds are characterized by a concentration of energy in certain areas of the frequency band.

Experimental studies of the energy characteristics of vowels and consonants, deaf and voiced, hard and soft sounds has showed that the energy performance of vowels is about 70–78 dB with a rms sound pressure of 70 dB. In this case, stressed vowels are pronounced at a sound pressure of 73–78 dB. For hissing and whistling sound without clearly expressed formants in the spectrum are characteristic pressure values are 58–63 dB. Speech intelligibility is determined by the relationship between informational speech signals and the level of masking noise with speech-like signals.

The combination of vowels and consonants pronounced with an increased level of sound pressure strongly influents on the speech intelligibility. Vowel sounds are formed on the base of vibrations of the vocal cords and have a greater power than consonants, which are formed by modulating the air stream. The intelligibility of consonants is not the same. The intelligibility of sonor consonants is higher than hissing ones, and the intelligibility of solids consonants is higher than soft ones. To account for the above mentioned phonetic features of the Kazakh language, experimental speech amplitude spectra were carried out in the range from 100 to 8000 Hz, performed for a sample of 14 people. Fig. 1 shows the averaged amplitude spectra of speech in the Kazakh language (lighter dependence is for a female voice, darker dependence is for a male voice).

However, using such dependencies when performing calculations is not entirely convenient. So in [17] it's proposed to approximate the spectral density of the Russian speech in the frequency range from 200 to 5000 Hz by the dependence

$$S_{\xi}(\omega) = \frac{\rho \cdot \sigma_{\xi}^2}{\pi} \left[\frac{1}{\rho^2 + (\omega_0 - \omega)^2} + \frac{1}{\rho^2 + (\omega_0 + \omega)^2} \right], \quad (4)$$

where $\rho = 1.14 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$, $\omega_0 = 2.98 \text{ s}^{-1}$ ($f_0 = 210 \text{ Hz}$), σ_{ξ}^2 is the speech dispersion.

In this case, $\omega_0 = 2.98 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ characterizes the frequency near which the maximum of the spectral density of the sound pressure of the speaker's speech is located, and the first term, taking into account the coefficient $\rho = 1.14 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$, is the degree of the maximum manifestation.

The second term characterizes the decrease of the spectral density of the sound pressure of speech with increasing frequency. The choice of specific approximations is determined by the nature of the dependencies, which are close in appearance to the class of widely used functions. On the other hand, the approximation coefficients should have their own physical interpretation.

Comparison of this dependences with the speech spectrum presented in Fig. 1 showed that they cannot be used for the Kazakh language. In this regard, the amplitude spectra of the Kazakh language speech were averaged for 14 speakers. The averaged dependence is shown in Fig. 2.



Fig. 1. Speech spectrum of Kazakh speakers when reading a text in Kazakh

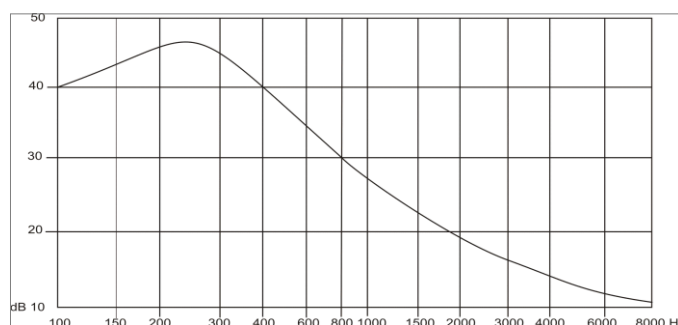


Fig. 2. Averaged amplitude spectrum of the Kazakh language speakers' speech

According to the results of the experimental studies performed for a sample of 14 people, the amplitude spectrum of the Kazakh speech, presented in Figure 2, could be approximated for the frequency range from 100 to 8000 Hz and for the integral sound pressure level from $6.3 \cdot 10^{-3}$ Pa to 0, 36 Pa (from 50 to 85 dB) in this frequency range. The approximation is realized by the expression

$$S(f) = \rho \cdot P \cdot K \left[\frac{1}{\rho + |(f_0 - f)|} + \frac{1}{\rho + (f_0 + f)} \right], \quad (5)$$

where $\rho = 100$ Hz, P is the sound pressure level of speech in the frequency band from 100 to 8000 Hz expressed in Pa, $f_0 = 225$ Hz, K is proportionality coefficient.

In this case, $f_0 = 225$ Hz characterizes the frequency near which the maximum of the spectral density of the sound pressure of the speaker's speech. Coefficient ρ is close to the value of the frequency of the fundamental tone. The proportionality coefficient has a dimension of $s^{-1/2}$ and is equaled to $0,0585 s^{-1/2}$. The first term, taking into account the coefficient $\rho = 80$ Hz, characterizes the severity of the maximum in the speech spectrum. The second term characterizes the decrease in the spectral density of the sound pressure of speech with increasing frequency.

The spectral density of the speech signal at the places of speech intelligibility assessing outside the room is determined from the expression

$$S_r(f) = \rho \cdot P \cdot K \left[\frac{1}{\rho + |(f_0 - f)|} + \frac{1}{\rho + (f_0 + f)} \right] \cdot K_r(f), \quad (6)$$

where $K_r(f)$ is speech transmission coefficient as a function of frequency (room soundproofing).

The spectral density of the combined masking signals is determined from the expression

$$S_{ms}(f) = \rho \cdot P_{sl} \cdot K \left[\frac{1}{\rho + |(f_0 - f)|} + \frac{1}{\rho + (f_0 + f)} \right] + S_{wn}, \quad (7)$$

where S_{wn} is spectral density of «white» noise in the speech frequency range (this value is constant); P_{sl} is sound pressure level of speech-like signals in the frequency band from 100 to 8000 Hz. The affiliation indexes of the spectral density of speech and speech-like signals are not used in expressions (6) and (7), as they are the same in nature depending on the frequency, but differ in amplitude due to different levels of the speech signal and the speech-like signal P and P_{sl} . The spectral density of masking noise is constant over time for the white noise component at all control points. The spectral component of the speech-like signals at the control points changes over time and is redistributed in frequency in accordance with expression (5). In this case, the amplitude of the spectral components of speech-like signals significantly exceed the amplitude of the spectral components of «white» noise (by 6–12 dB in the frequency range up to 500 Hz), but they are short-term at a given frequency. It should be noted that if the speech-like signals are formed on the base of the allophone of the speaker whose speech is necessary to protect, then the probability of overlapping of the frequency components of the information signal by the frequency components of the speech-like signal is much higher, as the formants of a certain phoneme of the information signal, for example, phonemes a , exactly coincide with the formants masking speech-like phoneme signal a , because the first and the second phonemes belong to the same speaker.

Speech intelligibility assessment for information security systems should be performed according to the limit states. It is indicated in [18] that the intelligibility limit is -18.5 dB, and to ensure complete security of speech information, the signal-to-noise ratio should be -27 dB (taking into account the burst nature of speech).

The averaged spectral components of the speech-like masking signal and the protected speech signal have approximately the same value if the sound insulation is uniform in frequency and the generated noise is close to dependence (5).

Formal speech intelligibility is determined from the expression

$$A = \sum_{k=1}^k p_k \cdot w \left(\frac{S_r}{S_{ms}} \right), \quad (8)$$

where p_k is the probability of finding formants in the k^{th} frequency band in case of band-frequency analysis; $w(S_r/S_{ms})$ is speech perception coefficient and the ratio of the speech signal and the masking signal in a given frequency band.

Verbal speech intelligibility could be determined by formant speech intelligibility using the expressions presented in [2]. In addition, as Bradley points out, when protecting voice information, it's necessary to take into account intelligibility, recognition (coding) and audibility. Recognition is the case when speech intelligibility is absent but can be determined by the speaker's timbre if the auditor is familiar with the recordings of this speaker. The auditor will hear what the preset speaker is saying, but it is not clear whether it is an information signal or a speech-like masking noise. S.J. Bradley has showed in [4] that the probability of increasing the signal-to-noise ratio depends on the level of background noise at different times of the day. Since speech and noise level vary from moment to moment, therefore, the actual intelligibility of speech will similarly change over time.

Conclusion

The carried out experimental studies of the spectral density of speech in the Kazakh language made it possible to obtain it's approximate dependence on the frequency and take into account the phonetic features of the Kazakh speech when assessing the security of the speech information using the formant method.

References

1. Pokrovsky N.B. [Calculation and measurement of speech intelligibility]. M.: Svyazizdat; 1962. (In Russ.)
2. Zheleznyak V.K., Makarov Yu.K., Horev A.A. [Some methodological approaches to assessing the effectiveness of voice information protection]. *Special Technique*. 2000;4:39-45. (In Russ.)
3. French N. Factors Governing the Intelligibility of Speech Sounds. *Acoust. Soc. Am.*;1947;19:90-119.

4. Bradley J.S. Designing and Assessing the Architectural Speech Security of Meeting Rooms and Offices. *IRC Research Report*. 2006. DOI: 10.4224/20377425
5. Didkovsky V.S., Prodeus A.N. [Comparison of formant properties of Ukrainian and Russian Speech Electronics and communications]. *Thematic «Electronics and Nanotechnology»*. 2009;2:88-94. (In Russ.)
6. Bradley S.J. [Speech Levels in Meeting Rooms and the Probability of Speech Privacy Problems]. *Acoust. Soc. Am.* 2010;127 (2):815-822. DOI: 10.1121/1.3277220.
7. Byrne D. [An international comparison of long-term average speech spectra]. *Acoust. Soc. Am.* 1994;96(4):2108-2120. DOI: 10.1121/1.410152.
8. Gavrilenko O.V., Didkovsky S.V., Prodeus A.N. [Calculation and measurement of speech intelligibility at small signal-to-noise ratios]. *Electronics and Communications, Thematic issue «Problems of Electronics»*. 2007:137-141. (In Russ.)
9. Gavrilenko O.V., Didkovsky S.V., Prodeus A.N. [Calculation and measurement of speech intelligibility at small signal-to-noise ratios]. *Electronics and Communications, Thematic issue «Problems of Electronics»*. 2007;142-147. (In Russ.)
10. Davydau H.V. [Method for protecting speech information]. *Doklady BGUIR=Doklady BSUIR*. 2015;94:107-110. (In Russ.)
11. Seitkulov Y.N., Davydov G.V., Potapovich A.V. Substantiation of the Method of Forming Combined Speech Masking Signals. *Bulletin of KazNTU*. 2014;102.
12. Seitkulov Y.N., Davydov G. V., Potapovich A. V. [The base of speech structural units of Kasakh language for the synthesis of speech-like signals]. *Proceeding of the IEEE 12th International Conference on Application of Information and Communication Technologies*. 2018. DOI: 10.1109/ICAICT.2018.8747120.
13. Seitkulov Y.N., Davydov G.V., Potapovich A.V. [Algoritym of forming speech base units using the method of dynamic programming]. *Theoretical and Applied Information Technology*. 2018;96:7928-7941. DOI: 10.1109/ICAICT.2018.8747120.
14. Davydov G.V. [Synthesis of speech-like signals in the Belarusian language]. *Doklady BGUIR=Doklady BSUIR*. 2015;90:27-32. (In Russ.)
15. Zaitsev A.P. [Technical means and methods of information protection]. M.: Publishing House Engineering, LLC; 2009. (In Russ.)
16. Khorev A.A. [Technical information protection. In 3 parts. P. 1. Technical channels of information leakage]. M.: SPC «Analytics»; 2008. (In Russ.)
17. Velichkin A.I. [Amplitude limitation of speech]. *Acoustic Journal*. 1962;8:168-174. (In Russ.)
18. Bradley S.J. [Developing a new measure for assessing architectural speech security]. *Canadian Acoustics*. 2003;31:50-51.

Authors contribution

Seitkulov Y.N. realized the selection and recording of speakers in the Kazakh language.
Boranbayev S.N. realized the selection of auditors in the Kazakh language, assessed speech intelligibility
Davydau H.V. set tasks that need to be solved in the course of the study, interpreted the results.
Patapovich A.V. realized the results processing and calculation.

Information about the authors

Seitkulov Y.N., PhD, Director of the Institute of information security and cryptology of L.N. Gumilyov Eurasian National University.
Boranbayev S.N., PhD, Professor of L.N. Gumilyov Eurasian National University
Davydau H.V., PhD, Researcher of SRL 5.3 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
Patapovich A.V., Researcher of SRL 5.3 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

20013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-670-30-40;
e-mail: nil53@bsuir.edu.by
Patapovich Aleksandr Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-74-80>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 666.3

КОНДЕНСАТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ТИТАНАТА БАРИЯ, СФОРМИРОВАННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

ХОЛОВ П.А.¹, ГАПОНЕНКО Н.В.¹, ШЕЙДАКОВА К.В.¹, КРЫМСКИЙ В.И.²,
ФИЛИПЕНЯ В.А.², ПЕТЛИЦКАЯ Т.В.², КОЛОС В.В.², ПЕТЛИЦКИЙ А.Н.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 27 декабря 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Цель работы заключалась в исследовании диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пленок BaTiO_3 в конденсаторной структуре, сформированной золь-гель методом на подложке $\text{Si/TiO}_2/\text{Pt}$. Основа данного конденсатора представляет собой четырехслойную пленку ксерогеля титаната бария толщиной около 200 нм. Пленка синтезирована золь-гель методом при температуре окончательного отжига 750 °С. Были решены задачи, связанные с разработкой методики формирования многослойных конденсаторных структур, исследованием морфологического и фазового состава пленки BaTiO_3 , а также с измерением значений вольт-фарадных характеристик в диапазоне частот 10 кГц – 2 МГц. Морфология полученной конденсаторной структуры исследовалась методом растровой электронной микроскопии на установке HITACHI S-4800. Рентгенодифракционные исследования проводились на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 с использованием монохроматического $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Вольт-фарадные характеристики получены с помощью анализатора полупроводниковых приборов В1500А. Значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, вычисленные для результатов измерений емкости, изменяются следующим образом: при напряжении смещения $U = 0$ В изменение ϵ составляет 232–214, и $\text{tg}\delta$ – 0,022–0,16, а при напряжении смещения $U = 10$ В изменение ϵ происходит в диапазоне 135–124 и $\text{tg}\delta$ от 0,02 до 0,1. Полученные частотные зависимости диэлектрической проницаемости пленок BaTiO_3 показывают снижение диэлектрической проницаемости в интервале 10 кГц – 2 МГц. Обнаружено, что при толщине пленки BaTiO_3 менее 100 нм тонкопленочный конденсатор с нижним электродом из платины не всегда формируется, что предположительно вызвано шунтированием структуры.

Ключевые слова: золь-гель метод, титанат бария, конденсатор.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность С.М. Завадскому и Д.А. Голосову за формирование контактов из никеля.

Для цитирования. Холов П.А., Гапоненко Н.В., Шейдакова К.В., Крымский В.И., Филипья В.А., Петлицкая Т.В., Колос В.В., Петлицкий А.Н. Конденсаторные структуры на основе пленок титаната бария, сформированных золь-гель методом. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 74-80.

CONDENSER STRUCTURES BASED ON BARIUM TITANATE FILMS FORMED BY SOL-GEL METHOD

PAYRAV A. KHOLOV¹, NIKOLAI V. GAPONENKO¹, KSENIYA V. SHAIKAKOVA¹,
VLADIMIR I. KRYMSKI², VICTOR A. FILIPENYA², TATIANA V. PETLITSKAYA²,
VLADIMIR V. KOLOS², ALEKSANDR N. PYATLITSKI²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 27 December 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The objective of the work is investigation the dielectric permittivity and dielectric loss tangent of BaTiO₃ films in a capacitor structure formed by sol – gel method on a Si/TiO_x/Pt substrate. The basis of this capacitor is a four-layer film of barium titanate xerogel with a thickness of about 200 nm. The film was synthesized by sol-gel method at a final annealing temperature 750 °C. The problems related to the development of method of forming multilayer capacitor structures, the analysis of the morphology and phase composition of BaTiO₃ film, and also the measurement of the capacitance-voltage characteristics in the frequency range 10 kHz – 2 MHz have been solved. Morphology of the films was analyzed using a Hitachi S-4800 scanning electron microscope. X-ray diffraction spectra was recorded using a DRON-3 automated diffractometer, using monochromatic CuK α radiation. Capacitance-voltage characteristics were obtained using a B1500A semiconductor analyzer. Dielectric constant and dielectric loss tangent, calculated for capacitance measurements, are changed as follows: for a bias voltage of $U = 0$ V, the change in ϵ is 232–214, and $\tan\delta$ 0.022–0.16, and for a bias voltage of $U = 10$ V, ϵ occurs in the range 135–124 and $\tan\delta$ from 0.02 to 0.1. The obtained frequency dependences of the dielectric constant of BaTiO₃ films show a decrease in the dielectric constant in the range of 10 kHz – 2 MHz. It was found that, with a BaTiO₃ film thickness of less than 100 nm, a thin-film capacitor with a lower platinum electrode is not always formed, which is probably caused by shunting of the structure.

Keywords: sol-gel method, barium titanate, capacitor.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors are grateful to S.M. Zavadsky and D.A. Golosov for the formation of nickel contacts.

For citation. Kholov P.A., Gaponenko N.V., Shaidakova K.V., Krymski V.I., Filipenya V.A., Petlitskaya T.V., Kolos V.V., Pyatlitski A.N. Condenser structures based on barium titanate films formed by sol-gel method. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 74-80.

Введение

Титанат бария (BaTiO₃) представляет научно-технический интерес как материал с высокой диэлектрической проницаемостью, высоким показателем преломления в оптическом диапазоне и как сегнетоэлектрик. Пленки титаната бария получают лазерной абляцией [1], ионно-лучевым испарением [2], золь-гель синтезом [3, 4] и др. Среди различных методов получения пленок титаната бария выгодно выделяется золь-гель технология, которая обеспечивает стехиометрический контроль, что позволяет изменять свойства пленок, сравнительно невысокую температуру синтеза, возможность формирования покрытий на большой площади. Развиваются технологии формирования пленок титаната бария для брэгговских зеркал, микрорезонаторов и фильтров ослабления ИК излучения [4–9].

В данной работе исследованы фазовый состав, морфология тонких пленок BaTiO₃, полученных золь-гель методом на структуре Si/TiO_x/Pt, измерены значения диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ конденсатора, сформированного на основе пленок BaTiO₃, в диапазоне частот 10 кГц – 2 МГц в зависимости от изменения напряжения смещения до 10 В.

Методика проведения эксперимента

Для формирования пленок BaTiO_3 были приготовлены золи с концентрацией 60 мг/мл. В раствор изопропоксида титана и уксусной кислоты добавили ацетат бария, после полного растворения которого был получен устойчивый пленкообразующий золь. Далее методом центрифугирования (скорость 2700 об/мин, время 30 с) золь наносился на подложки $\text{Si}/\text{TiO}_x/\text{Pt}$, затем каждый слой подвергался сушке (температура 200 °С, время 10 мин) и отжигу (температура 750 °С, время 60 мин). Для получения конденсаторной структуры были нанесены верхние электроды из никеля, диаметр которых составил 322 мкм.

Морфология полученной конденсаторной структуры исследовалась методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на установке HITACHI S-4800. Рентгенодифракционные исследования проводились на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 с использованием монохроматического $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Вольт-фарадные характеристики получены с помощью анализатора полупроводниковых приборов В1500А.

Результаты и их обсуждение

РЭМ-изображение сформированной конденсаторной структуры показано на рис. 1. Толщина пленок титаната бария после термообработки составляет приблизительно 200 нм.

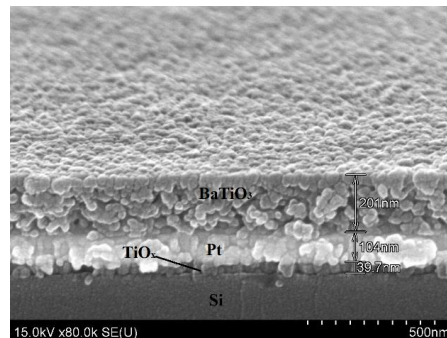


Рис. 1. РЭМ-изображение конденсаторной структуры с четырехслойной пленкой BaTiO_3 на подложке $\text{Si}/\text{TiO}_x/\text{Pt}$
Fig. 1. SEM image of a capacitor structure with a BaTiO_3 four-layer film on a $\text{Si}/\text{TiO}_x/\text{Pt}$ substrate

РЭМ-изображение пленки титаната бария с электродами из Ni, диаметр которых составил 322 мкм, представлено на рис. 2, *a*. Электроды были сформированы методом ионно-лучевого испарения через маску. Для измерений использовались пары контактов меньший электрод/большой электрод (рис. 2, *b*).

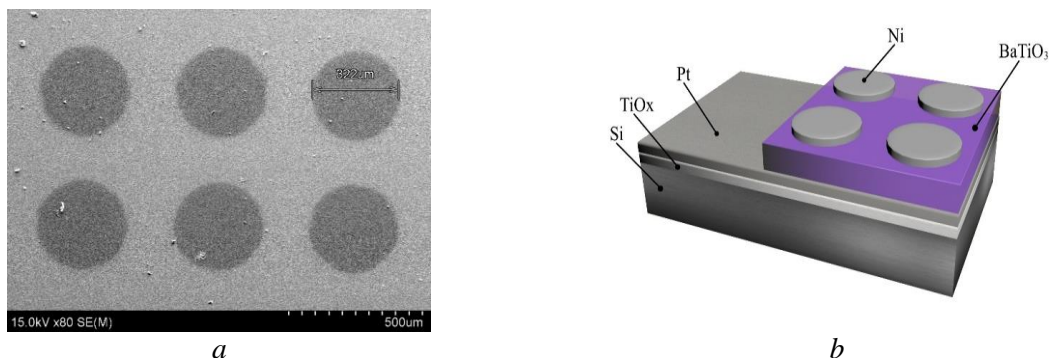


Рис. 2. РЭМ-изображение контактов из никеля на пленке титаната бария (*a*)
и схематичное изображение структуры $\text{Si}/\text{TiO}_2/\text{Pt}/\text{BaTiO}_3/\text{Ni}$ (*b*)
Fig. 2. SEM image of Ni contacts on a barium titanate film (*a*) and schematic image of a $\text{Si}/\text{TiO}_2/\text{Pt}/\text{BaTiO}_3/\text{Ni}$ structure (*b*)

На рис. 3 представлена дифрактограмма четырехслойной пленки титаната бария, сформированной на подложке $\text{Si}/\text{TiO}_x/\text{Pt}$ при температуре отжига 750 °С в течение 60 мин. Данная дифрактограмма иллюстрирует наличие фазы BaTiO_3 .

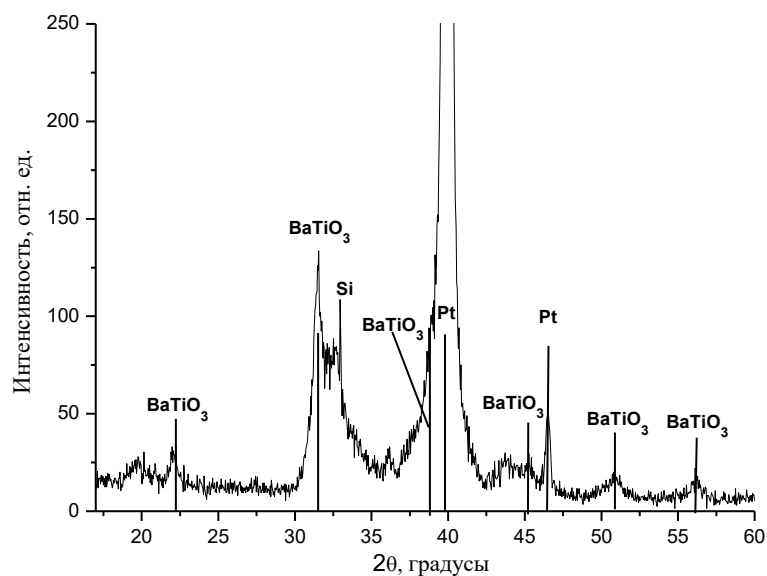


Рис. 3. Дифрактограмма четырехслойной структуры BaTiO_3 на подложке $\text{Si}/\text{TiO}_x/\text{Pt}$ из золя с концентрацией 60 мг/мл после окончательного отжига при температуре 750°C в течение 60 мин

Fig. 3. X-ray diffraction pattern of a four-layer BaTiO_3 film on a silicon/titanium/platinum structure from sol with a concentration of 60 mg/ml after the final heat treatment at a temperature of 750°C for 60 min

На рис. 4 представлены вольт-фарадные характеристики конденсаторной структуры с температурой синтеза 750°C , полученные при различных частотах измерительного напряжения. Напряжение подавалось на верхний и нижний электроды и изменялось в диапазоне 0–10 В с шагом 100 мВ. Уровень измерительного сигнала 24 мВ. Измерения проводились на частотах 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 кГц. Из графиков видно, что с ростом частоты емкость пленок титаната бария уменьшается во всем интервале напряжения смещения.

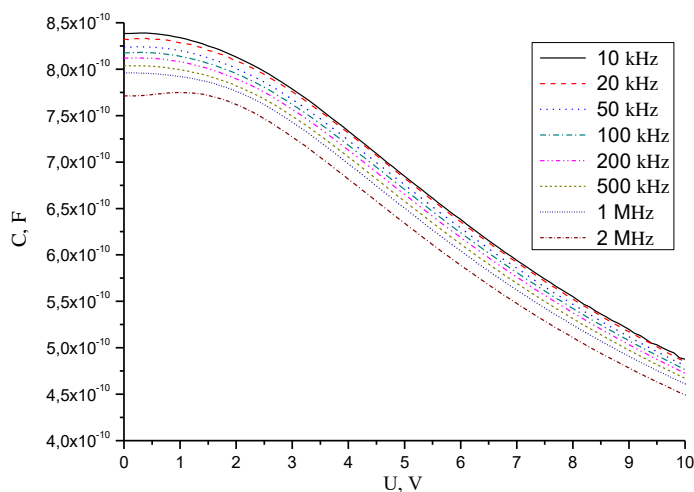


Рис. 4. Зависимость емкости BaTiO_3 в конденсаторной структуре от напряжения для частот от 10 кГц до 2 МГц

Fig. 4. The dependence of the capacity of BaTiO_3 in the capacitor structure on voltage for frequencies from 10 kHz to 2 MHz

Результаты измерений емкости полученных конденсаторных структур и вычисленные соответственно значения диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Параметры полученной конденсаторной структуры при напряжении смещения $U = 0$
Table 1. The parameters of the obtained capacitor structure at a bias voltage of $U = 0$

Частота, кГц Frequency, kHz	Емкость, $\times 10^2$ пФ Capacity, $\times 10^2$ pF	Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$ Dielectric loss tangent, $\tan \delta$	Диэлектрическая проницаемость, ϵ The dielectric constant, ϵ
10	8,38	0,022	232
20	8,32	0,022	231
50	8,23	0,024	228
100	8,17	0,027	227
200	8,12	0,034	225
500	8,03	0,055	223
1000	7,96	0,09	221
2000	7,71	0,16	214

Таблица 2. Параметры полученной конденсаторной структуры при напряжении смещения $U = 10$ В
Table 2. The parameters of the obtained capacitor structure at a bias voltage of $U = 10$ V

Частота, кГц Frequency, kHz	Емкость, $\times 10^2$ пФ Capacity, $\times 10^2$ pF	Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$ Dielectric loss tangent, $\tan \delta$	Диэлектрическая проницаемость, ϵ The dielectric constant, ϵ
10	4,87	0,02	135
20	4,84	0,023	134
50	4,80	0,021	133
100	4,76	0,021	132
200	4,72	0,025	131
500	4,67	0,038	129
1000	4,61	0,059	128
2000	4,49	0,1	124

Значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, измеренные в диапазоне 10 кГц – 2 МГц, изменяются следующим образом: при напряжении смещения $U = 0$ В изменение ϵ составляет 232–214, $\text{tg}\delta$ – 0,022–0,16, а при напряжении смещения $U = 10$ В изменение диэлектрической проницаемости происходит в диапазоне 135–124, $\text{tg}\delta$ – от 0,02 до 0,1. Полученные частотные зависимости диэлектрической проницаемости пленок BaTiO_3 показывают снижение диэлектрической проницаемости в интервале 10 кГц – 2 МГц. Обнаружено, что при толщине пленки BaTiO_3 менее 100 нм тонкопленочный конденсатор с нижним электродом из платины не всегда формируется, что предположительно вызвано шунтированием структуры.

Заключение

Таким образом, была сформирована многослойная структура, содержащая 4 слоя ксерогеля титаната бария толщиной 200 нм, полученная последовательным нанесением слоев центрифугированием с термообработкой каждого слоя при температуре 750 °С, имеющая поликристаллическую структуру с диэлектрической проницаемостью около 120–230 для диапазона частот 10 кГц – 2 МГц и напряжения смещения от 0 до 10 В.

Список литературы

1. Grant Norton M., Cracknell K.P.B., Barry Carter C. Pulsed-Laser Deposition of Barium Titanate Thin Films. *Journal of the American Ceramic Society*. 1992;75:1999. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1992.tb07234.x
2. Li G.Q., Lai P.T., Zeng S.H., Huang M.Q., Liu B.Y. Effects of chemical composition on humidity sensitivity of Al/BaTiO₃/Si structure. *Applied Physics Letters*. 1995;66:2436. DOI: 10.1063/1.113965
3. Kamalasanan M.N., Deepak Kumar N., Chandra S. Dielectric and ferroelectric properties of BaTiO₃ thin films grown by the sol-gel process. *Journal of Applied Physics*. 1993;74:5679. DOI: 10.1063/1.354183
4. Холов П.А., Руденко М.В., Гапоненко Н.В. Золь-гель синтез и перспективы применения пленок титаната бария. *Доклады БГУИР*. 2017;4(106):32-36.

5. Gaponenko N.V., Kholov P.A., Sukalin K.S., Raichenok T.F., Tikhomirov S.A., Subasri R., Soma Raju K.R.C., Mudryi A.V. Optical properties of multilayer BaTiO₃/SiO₂ film structures formed by the sol-gel method. *Physics of the Solid State*. 2019;61(3):397-401. DOI: 10.1134/S1063783419030120
6. Karnilava Yu.D., Kholov P.A., Gaponenko N.V., Raichenok T.F., Tikhomirov S.A., Martynov I.L., Osipov E.V., Chistyakov A.A., Kargin N.I. Sol-Gel Fabrication and luminescence properties of multilayer Eu-doped BaTiO₃/SiO₂ xerogel nanostructures. *International Journal of Nanoscience*. 2019; 18(3-4):1940044. DOI: 10.1142/S0219581X19400441
7. Subasri R., Reddy D.S., Soma Raju K.R.C., Rao K.S., Kholov P., Gaponenko N. Sol-gel derived Ba/SrTiO₃-MgF₂ solar control coating stack on glass for architectural and automobile applications. *Research on Chemical Intermediates*. 2019;45(8):4179-4191. DOI: 10.1007/s11164-019-03899-w
8. Gaponenko N.V., Kholov P.A., Raichenok T.F., Prislowski S.Ya. Enhanced Luminescence of Europium in Sol-Gel Derived BaTiO₃/SiO₂ Multilayer Cavity Structure. *Optical Materials*. 2019;96C:109265. DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109265
9. Парафинюк Д.А., Гапоненко Н.В., Райченко Т.Ф. Оптические свойства многослойных периодических структур BaTiO₃: Eu/SiO₂. *Доклады БГУИР*. 2019;7(125):95-100. DOI:10.35596/1729-7648-2019-125-7-95-100

References

1. Grant Norton M., Cracknell K.P.B., Barry Carter C. Pulsed-Laser Deposition of Barium Titanate Thin Films. *Journal of the American Ceramic Society*. 1992;75:1999. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1992.tb07234.x
2. Li G.Q., Lai P.T., Zeng S.H., Huang M.Q., Liu B.Y. Effects of chemical composition on humidity sensitivity of Al/BaTiO₃/Si structure. *Applied Physics Letters*. 1995;66:2436. DOI: 10.1063/1.113965
3. Kamalasanan M.N., Deepak Kumar N., Chandra S. Dielectric and ferroelectric properties of BaTiO₃ thin films grown by the sol-gel process *Journal of Applied Physics*. 1993;74:5679. DOI: 10.1063/1.354183
4. Kholov P.A., Rudenko M.V., Gaponenko N.V. [Sol-gel synthesis of barium titanate films and perspectives of their application]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017;(4):32-36. (In Russ.)
5. Gaponenko N.V., Kholov P.A., Sukalin K.S., Raichenok T.F., Tikhomirov S.A., Subasri R., Soma Raju K.R.C., Mudryi A.V. Optical properties of multilayer BaTiO₃/SiO₂ film structures formed by the sol-gel method. *Physics of the Solid State*. 2019;61(3):397-401. DOI: 10.1134/S1063783419030120
6. Karnilava Yu.D., Kholov P.A., Gaponenko N.V., Raichenok T.F., Tikhomirov S.A., Martynov I.L., Osipov E.V., Chistyakov A.A., Kargin N.I. Sol-Gel Fabrication and luminescence properties of multilayer Eu-doped BaTiO₃/SiO₂ xerogel nanostructures. *International Journal of Nanoscience*. 2019;18(3-4):1940044. DOI: 10.1142/S0219581X19400441
7. Subasri R., Reddy D.S., Soma Raju K.R.C., Rao K.S., Kholov P., Gaponenko N. Sol-gel derived Ba/SrTiO₃-MgF₂ solar control coating stack on glass for architectural and automobile applications. *Research on Chemical Intermediates*. 2019;45(8): 4179-4191. DOI: 10.1007/s11164-019-03899-w
8. Gaponenko N.V., Kholov P.A., Raichenok T.F., Prislowski S.Ya. Enhanced Luminescence of Europium in Sol-Gel Derived BaTiO₃/SiO₂ Multilayer Cavity Structure. *Optical Materials*. 2019;96C:109265. DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109265
9. Парафинюк Д.А., Гапоненко Н.В., Райченко Т.Ф. [The optical properties of multilayer periodic structures BaTiO₃: Eu/SiO₂]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;7(125):95-100. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-125-7-95-100 (In Russ.)

Вклад авторов

Холов П.А. отработал методику формирования пленкообразующих золь и пленок ксерогелей титаната бария, а также обработал полученные результаты.

Гапоненко Н.В. определил цели и задачи исследования, принял участие в обработке и интерпретации результатов исследований образцов.

Шейдакова К.В. приняла участие в формировании пленок ксерогелей титаната бария.

Крымский В.И. принял участие в отработке методики формирования пленок титаната бария.

Филипеня В.А. принял участие в измерении емкости конденсаторной структуры.

Петлицкая Т.В. приняла участие в измерении емкости конденсаторной структуры.

Колос В.В. принял участие в разработке методики формирования металлических электродов конденсаторной структуры.

Петлицкий А.Н. принял участие в исследовании морфологии многослойной конденсаторной структуры и интерпретации данных электрофизических измерений.

Authors contribution

Kholov P.A. worked out the method of forming the coatable sols and films of barium titanate xerogels, and also performed analysis of the obtained results.

Gaponenko N.V. defined the objectives of the research, took part in the processing and interpretation of research results.

Shaidakova K.V. took part in the formation of barium titanate xerogel films.

Krymski V.I. took part in the development the method of fabrication barium titanate films.

Filipenya V.A. took part in measuring the capacitance of the researching structure.

Petlitskaya T.V. took part in measuring the capacitance of the researching structure.

Kolos V.V. took part in the development of formation method for metal electrodes of a capacitor structure.

Pyatlitski A.N. took part in the morphology analysis of multilayer capacitor structure and in the interpretation of electrophysical measurements.

Сведения об авторах

Холов П.А., м.н.с НИЛ 4.5 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гапоненко Н.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий НИЛ 4.5 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шейдакова К.В., инженер НИЛ 4.5 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Крымский В.И., инженер-технолог ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Филипеня В.А., ведущий инженер ГЦ БМА ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Петлицкая Т.В., начальник сектора ГЦ БМА ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Колос В.В., к.ф.-м.н., ведущий технолог ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Петлицкий А.Н., директор ГЦ БМА ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Information about the authors

Kholov P.A., junior researcher of SRL 4.5 of R&D department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Gaponenko N.V., D. Sci, Professor, Head of SRL 4.5 of R&D Department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Shaidakova K.V., Engineer of SRL 4.5 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Krymski V.I., Process Engineer of JSC “INTEGRAL” – Holding Managing Company “INTEGRAL”.

Filipenya V.A., Leading Engineer of SC BMA of JSC “INTEGRAL” – Holding Managing Company “INTEGRAL”.

Petlitskaya T.V., Head of Sector of SC BMA of JSC “INTEGRAL” – Holding Managing Company “INTEGRAL”.

Kolos V.V., PhD, Leading Engineer of JSC “INTEGRAL” – Holding Managing Company “INTEGRAL”.

Pyatlitski A.N., Director of SC BMA of JSC “INTEGRAL” – Holding Managing Company “INTEGRAL”.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь, г.
Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-75;
e-mail: nik@nano.bsuir.edu.by
Гапоненко Николай Васильевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-88-75;
e-mail: nik@nano.bsuir.edu.by
Gaponenko Nikolai Vasil'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-81-88>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 544.654.2

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК НИКЕЛЯ НА КРЕМНИИ

СОЛОВЬЁВ Я.А., ПИЛИПЕНКО В.А.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 9 января 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Работа посвящена установлению закономерности изменения удельного сопротивления и высоты барьера Шоттки пленок никеля на кремнии *n*-типа (111) при их быстрой термообработке в диапазоне температур от 200 до 550 °С. Пленки никеля толщиной порядка 60 нм наносили магнетронным распылением на кремниевые подложки с удельным сопротивлением 0,58–0,53 Ом×см. Быструю термообработку проводили в интервале от 200 до 550°С в режиме теплового баланса облучением обратной стороны подложек некогерентным световым потоком в среде азота в течение 7 с. Толщину пленок никеля определяли растровой электронной микроскопией. Поверхностное сопротивление образцов измеряли четырехзондовым методом. Высоту барьера Шоттки определяли методом вольтамперных характеристик. Показано, что при температурах быстрой термообработки Ni/n-Si (111) 200–250 °С Ni преобразуется в Ni₂Si, увеличиваясь в толщине в 1,15–1,33 раза, удельное сопротивление увеличивается до 26–30 мкОм×см, а высота барьера Шоттки уменьшается с 0,66 до 0,6 В. При температуре быстрой термообработки 300 °С толщина исходной пленки никеля увеличивается в 1,93 раза, удельное сопротивление и высота барьера Шоттки снижаются до 26–30 мкОм×см и 0,59 В, соответственно, что обусловлено преобразованием Ni₂Si в NiSi и фиксацией высоты барьера поверхностными состояниями на границе раздела силицида с кремнием. Быстрая термообработка при температурах 350–550 °С переводит исходную пленку никеля в NiSi, увеличивает ее толщину в 2,26–2,67 раза, уменьшает ее удельное сопротивление до 15–18 мкОм×см, и увеличивает высоту барьера Шоттки до 0,62–0,64 В. Наименьшей дефектностью и лучшей воспроизводимостью электрофизических свойств характеризуются пленки NiSi, сформированные быстрой термообработкой пленок никеля на кремнии при температуре 400–450°С. Полученные результаты могут быть использованы в технологии создания изделий интегральной электроники с выпрямляющими контактами.

Ключевые слова: никель, силицид никеля, быстрая термообработка, удельное сопротивление, высота барьера.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Соловьёв Я.А., Пилипенко В.А. Влияние температуры быстрой термической обработки на электрофизические свойства пленок никеля на кремнии. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 81-88.

EFFECT OF RAPID THERMAL TREATMENT TEMPERATURE ON ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF NICKEL FILMS ON SILICON

JAROSLAV A. SOLOVJOV, VLADIMIR A. PILIPENKO

JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 9 January 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Present work is devoted to determination the regularity of change of specific resistance and Schottky barrier height of nickel films on n-type silicon (111) at their rapid thermal treatment in the temperatures range from 200 to 550 °C. Nickel films of about 60 nm thickness were deposited by magnetron sputtering onto the silicon substrates having a resistivity of 0.58 to 0.53 Ohm×cm. The rapid thermal treatment was carried out in the range of 200 to 550 °C under heat balance mode by irradiating the backside of the substrates with non-coherent light flux in nitrogen ambient for 7 seconds. The thickness of the nickel films was determined by scanning electron microscopy. The sheet resistance of the samples was measured by a four-probe method. The Schottky barrier height was determined from I-V plots. It is shown that at a temperature of rapid thermal treatment of Ni/n-Si (111) 200–250 °C nickel will be transformed to Ni₂Si, increasing in thickness by 1.15–1.33 times, specific resistance increases to 26–30 μOhm×cm, and Schottky barrier height decreases from 0.66 to 0.6 V. At a rapid thermal treatment temperature of 300°C the initial nickel film thickness increases by 1.93 times, the resistivity and Schottky barrier height decrease to 26–30 μOhm×cm and 0.59 V respectively due to the conversion of the Ni₂Si into NiSi and the fixation of the barrier height by surface states at the silicide-silicon interface. Rapid thermal treatment of 350–550 °C transforms the original nickel film into NiSi, increases its thickness by 2.26–2.67 times, reduces its resistivity to 15–18 μOhm×cm and increases the Schottky barrier height to 0.62–0.64 V. The minimum defects and better reproducibility of electrophysical properties are characterized by NiSi films formed by rapid thermal treatment of nickel films on n-type silicon at a temperature of 400–450 °C. The results obtained can be used in the technology of integrated electronics products containing rectifying contacts.

Keywords: nickel, nickel silicide, rapid thermal treatment, specific resistance, barrier height.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Solovjov Ja.A., Pilipenko V.A. Effect of rapid thermal treatment temperature on electrophysical properties of nickel films on silicon. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 81-88.

Введение

Тонкие слои силицида никеля нашли широкое применение в технологии изделий интегральной электроники в качестве материалов полицидных затворов и контактов к истокам-стокам транзисторов в КМОП – технологии с проектными нормами менее 90 нм благодаря своим низким значениям удельного и контактного сопротивления [1]. Кроме того, низкое контактное сопротивление делает данный материал перспективным для применений в качестве контактных структур в силовой электронике и солнечных элементах [2, 3], а величина барьера Шоттки на кремнии n-типа порядка 0,63–0,65 В позволяет им находить применение в качестве материала выпрямляющего контакта в силовых диодах Шоттки [4]. Наиболее широко распространенным методом получения слоев силицида никеля является их диффузионный синтез путем последовательного нанесения на кремниевую подложку тонкой металлической пленки и температурной обработки для формирования слоя силицида твердофазной реакцией с кремнием [5]. Учитывая тот факт, что в изделиях силовой электроники требуется получать однородные и бездефектные слои силицидов большой площади, то наиболее подходящим для данных целей методом нагрева при их диффузионном синтезе является быстрая термическая обработка (БТО) [6].

Диаграмма состояния системы Ni-Si содержит шесть соединений никеля с кремнием [7], но при диффузионном синтезе для случая избытка кремния по мере увеличения температуры термообработки последовательно образуются только три фазы Ni₂Si, NiSi и NiSi₂ [5]. Данные силициды существенно отличаются между собой по величине удельного сопротивления (табл. 1), которая для определенной фазы силицида никеля слабо зависит от способа ее получения, а ее разброс в тонких пленках обусловлен скорее рассеянием носителей заряда на примесных дефектах и границах зерен. Однако прогнозирование сопротивления слоев силицидов никеля на кремнии осложняется тем фактом, что температура формирования той или иной фазы силицида никеля может существенно различаться [5, 7]. Например, низкотемпературная фаза Ni₂Si как для стационарной, так и для быстрой термообработки по данным различных источников, может формироваться в интервале температур от 175 до 300 °С. И в то же время нижний предел температуры формирования следующей силицидной фазы NiSi лежит в диапазоне от 275 до 350 °С.

Таблица 1. Значения удельного сопротивления пленок никеля и его силицидов
Table 1. Values of specific resistance of nickel films and its silicides

Условия получения пленок Conditions for films fabrication					Удельное сопротивление при комнатной температуре, мкОм×см Specific resistance at room temperature, μOhm×cm	Источник Source	
Толщина исходной пленки Ni, нм Thickness of initial Ni film, nm	Условия диффузионного синтеза Diffusion synthesis conditions						
	Тип термообработки Thermal treatment type	Температура процесса, °С Process temperature, °C	Время процесса Process time	Фаза силицида Silicide phase			
Не указано					Ni	7–10	[1]
					Ni ₂ Si	24–30	
					NiSi	10,5–18	
					NiSi ₂	34–50	
30	стационарная	400–700	60 мин	NiSi	12	[8]	
		750–800	60 мин	NiSi ₂	35		
100	быстрая	500	30 с	NiSi	11	[9]	

Высота барьера Шоттки никеля на кремнии *n*-типа ориентации (111) также подвержена существенным вариациям в зависимости от концентрации доноров в кремнии, способа подготовки поверхности, способа и условий формирования барьерного слоя, влияющих как на фазу образующего силицида, так и на его кристаллическую структуру, совершенство границы раздела, и определяющих в конечном итоге высоту барьера Шоттки [10–14]. Так, для пленок никеля высота барьера Шоттки может лежать в пределах от 0,57 до 0,85 В [10–13], для пленок Ni₂Si – в пределах от 0,67 до 0,75 В [5, 10, 12], а для пленок NiSi – в пределах от 0,66 до 0,78 В [5, 10, 12–14].

Таким образом, изменения электрофизических свойств пленок никеля на кремнии в зависимости от способов и условий их термообработки оказываются сложно прогнозируемыми. Настоящая работа посвящена установлению влияния температуры быстрой термообработки пленок никеля на кремнии *n*-типа проводимости на их удельное сопротивление и контактные свойства.

Методика проведения эксперимента

Пленки никеля исходной толщиной порядка 60 нм наносили магнетронным распылением мишени из никеля чистотой 99,96 % в среде аргона чистотой 99,993 % при давлении 0,4 Па на установке SNT «Sigma» с безмасляной откачкой на кремниевые подложки двух типов. Перед нанесением никеля подложки подвергали химической очистке сначала в растворе плавиковой кислоты, а затем в перекисно-аммиачном растворе. Подложки первого типа представляли собой эпитаксиальные слои легированного фосфором кремния с удельным сопротивлением 0,58–0,63 Ом×см и толщиной 5,3–5,8 мкм, сформированные

на подложках монокристаллического кремния 100 КДБ 10 (111). Подложки второго типа представляли собой эпитаксиальные слои с аналогичными параметрами на подложках монокристаллического кремния 100 КЭМ 0,005 (111), содержащие охранные кольца и вскрытые в полевого окисле контакты для формирования структуры диодов Шоттки размером кристалла 1,42×1,42 мм.

Затем подложки обоих типов подвергали быстрой термической обработке в режиме теплового баланса путем облучения обратной стороны подложек некогерентным световым потоком в среде азота в течение 7 с при температуре от 200 до 550 °С. Источником нагрева служили кварцевые галогенные лампы накаливания. Контроль температуры рабочей стороны подложки осуществлялся термопарой с точностью ±0,5 °С.

На подложках первого типа измеряли поверхностное сопротивление с помощью установки RS-30 с погрешностью не более ±5 %. Величину удельного сопротивления ρ (Ом×см) пленок никеля рассчитывали по формуле

$$\rho = R_S \cdot d, \quad (1)$$

где R_S – поверхностное сопротивление образца, Ом/кв., d – толщина пленки никеля на кремнии после термообработки, см.

В свою очередь, толщину пленок никеля определяли с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) S-4800 ф. Hitachi (Япония) с погрешностью не более ± 5%.

Для подложек второго типа после быстрой термообработки удаляли непрореагировавшие остатки никеля с поверхности полевого окисла в перекисно-соляном растворе, а затем последовательно наносили на рабочую сторону слой титана толщиной 0,11 мкм и сплава алюминий-кремний толщиной 1,4 мкм и при помощи фотолитографии формировали металлизацию анода. Далее обратные стороны подложек подвергали шлифованию до остаточной толщины 300 мкм и выполняли на них металлизацию катода последовательным напылением в вакууме слоев титана, сплава никель-ванадий и серебра. После этого подложку разделяли на отдельные кристаллы, которые собирали в пластмассовый корпус типа ТО-220.

Измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) проводились на комплексе прецизионных измерений характеристик элементной базы ИМС В1500 ф. Agilent (США) с зондовой станцией Summit 11000 AP фирмы Cascade. Высоту барьера Шоттки ϕ_B (В) определяли методом ВАХ [10] путем экспоненциальной аппроксимации начального участка прямой ВАХ диода Шоттки к оси ординат с последующими расчетами по формуле:

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{SA^{**}T^2}{I_0} \right), \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \times 10^{-23}$ Дж×К⁻¹, T – абсолютная температура, равная 296 К, q – заряд электрона, равный $1,602 \times 10^{-23}$ Кл, S – площадь выпрямляющего контакта, равная $1,38 \times 10^{-2}$ см², A^{**} – эффективная постоянная Ричардсона, равная $120 \text{ А} \times \text{см}^{-2} \times \text{К}^{-2}$, I_0 – ток насыщения (А), определяемый точкой пересечения прямой экспоненциальной аппроксимации начального участка ВАХ с осью ординат.

Результаты и их обсуждение

1 Толщина пленок. Результаты исследований с помощью РЭМ показывают (рис. 1), что БТО при температуре от 200 до 550 °С приводит к росту толщины исходной пленки никеля. Это свидетельствует о наличии твердофазных взаимодействий никеля с кремнием во всем интервале температур термообработки.

Сравнительный анализ отношения толщины пленки никеля после термообработки d к толщине пленки исходного никеля d_0 (рис. 2) с известными значениями для силицидов никеля Ni₂Si ($d/d_0 = 1,47$) и NiSi ($d/d_0 = 2,2$) [1] позволяет сделать вывод, что при температуре БТО порядка 250 °С происходит полный переход никеля в фазу Ni₂Si, а при температуре БТО порядка 350 °С – в фазу NiSi. Таким образом, фазовый переход Ni₂Si – NiSi осуществляется

в диапазоне температур БТО от 250 до 350 °С. В тоже время рост отношения d/d_0 до значений порядка 2,7 с увеличением температуры БТО до 550–550 °С не дает оснований для вывода о формировании фазы NiSi_2 ($d/d_0 = 3,61$) [1].

Полученные температуры формирования фаз Ni_2Si и NiSi хорошо согласуются с результатами других авторов [5, 7], но существенное (более, чем на два порядка величины) уменьшение времени формирования силицидных фаз при БТО свидетельствует об уменьшении энергии активации процесса их образования.

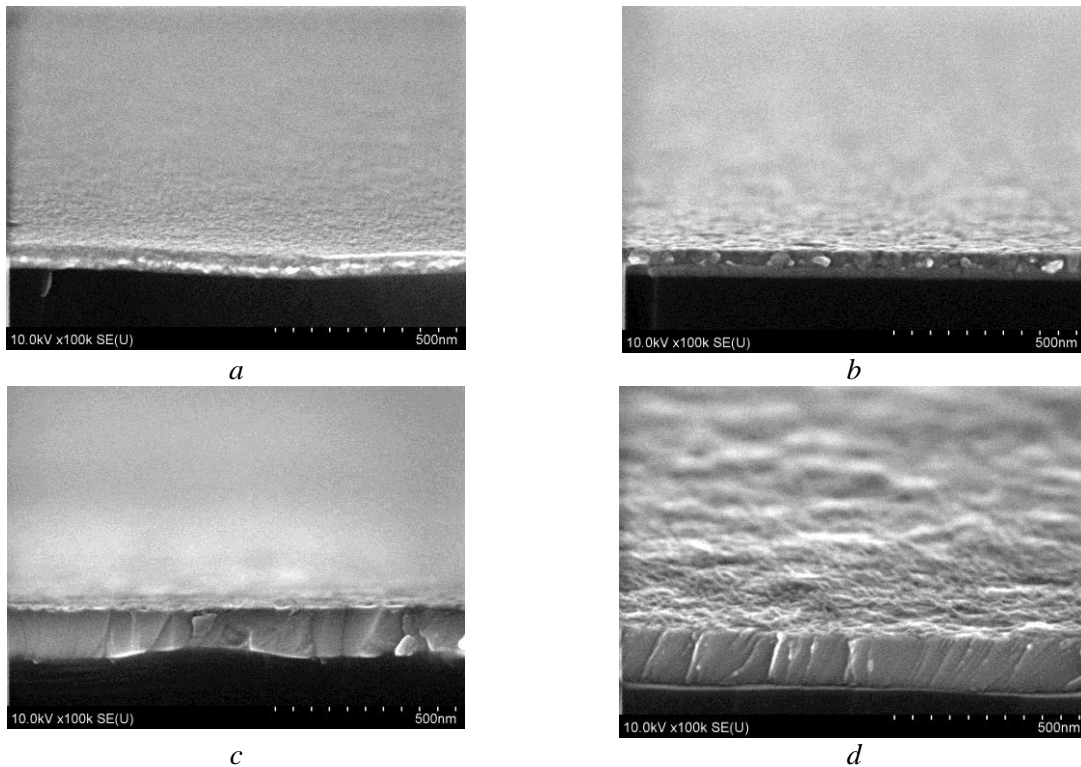


Рис. 1. РЭМ-фото поперечного скола образцов Ni/n-Si(111): *a* – исходная пленка никеля, *b* – пленка никеля после БТО при температуре 200 °С, *c* – пленка никеля после БТО при температуре 350 °С, *d* – пленка никеля после БТО при температуре 550 °С

Fig. 1. Cross-sectional SEM image of Ni/n-Si (111) samples: *a* – initial nickel film, *b* – nickel film after RTP at 200 °С, *c* – nickel film after RTP at 350 °С, *d* – nickel film after RTP at 550 °С

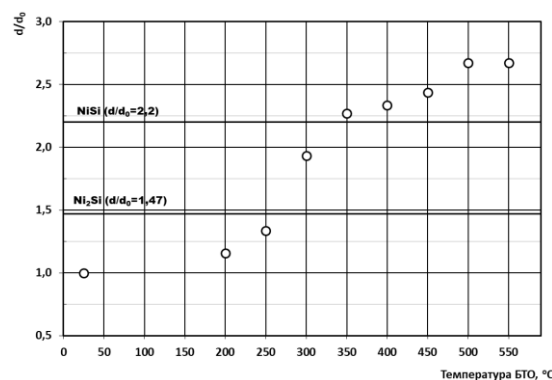


Рис. 2. Зависимость отношения d/d_0 от температуры БТО
Fig. 2. Dependence of d/d_0 ratio on RTP temperature

2 Удельное сопротивление. Удельное сопротивление исходной пленки никеля находится на уровне 15 мкОм×см, (рис. 3) что в 1,5–2,1 раза больше справочных данных [1] и объясняется размерными эффектами в тонких пленках никеля, обусловленными рассеянием носителей заряда на примесных дефектах и границах зерен. Рост удельного сопротивления пленок никеля при температурах БТО 200 и 250 °С до значений 26–30 мкОм×см несомненно является признаком формирования фазы Ni_2Si , что хорошо согласуется со справочными

данными [1]. Причем наименьший разброс удельного сопротивления, наблюдаемый при температуре БТО 250 °С, свидетельствует о структурной однородности пленок и полном переходе никеля в фазу Ni₂Si, что коррелирует с выводом, сделанным при анализе изменения толщины пленки никеля.

При температуре БТО 300 °С наблюдается снижение величины удельного сопротивления до 20–28 мкОм×см, что происходит вследствие начала перехода фазы Ni₂Si в фазу NiSi. В диапазоне температур БТО от 350 до 550 °С величина удельного сопротивления составляет 15–18 мкОм×см, что совпадает со справочными данными для NiSi [1] и подтверждает переход никеля в данную фазу. Минимальное значение удельного сопротивления порядка 15 мкОм×см и самый минимальный его разброс наблюдается при температуре БТО 400 °С, что позволяет сделать вывод о высокой структурной однородности данных пленок. Соответственно, незначительное превышение данной величины до 16–18 мкОм×см при температуре БТО 350 °С вызвано неполным перестроением кристаллической структуры при переходе фазы Ni₂Si в фазу NiSi. При увеличении температуры БТО от 450 до 550 °С также наблюдается увеличение значений удельного сопротивления и их разброса, что, наиболее вероятно, связано с дальнейшей перестройкой кристаллической структуры фазы NiSi. Причем незначительный рост величины удельного сопротивления также не дает оснований для вывода о формировании высокоомной фазы NiSi₂.

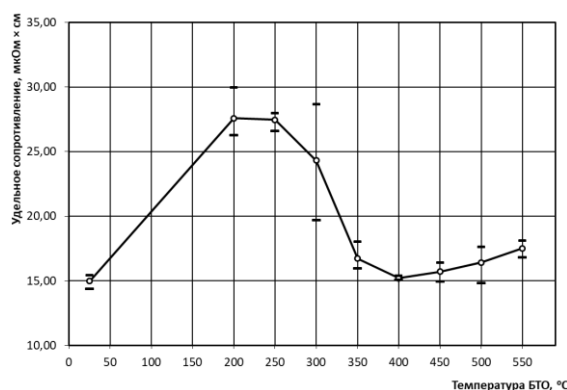


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления пленок никеля на кремнии от температуры БТО
Fig. 3. Dependence of specific resistance of nickel films on silicon on RTP temperature

3 Барьер Шоттки. Высота барьера Шоттки исходных пленок никеля на кремнии составила величину порядка 0,65 В (рис. 4), что оказалось несколько выше значений, представленных в ряде других работ, например, в [10, 12, 13], и сопоставимо с результатами работы [11], что, наиболее вероятно, обусловлено в особенностях подготовки поверхности кремниевых подложек перед нанесением никеля. Выполнение БТО при температуре 200 °С приводит к незначительному росту высоты барьера до величины порядка 0,66 В, что сопоставимо результатами для пленок Ni₂Si, полученными стационарной термообработкой при температуре 250 °С [12].

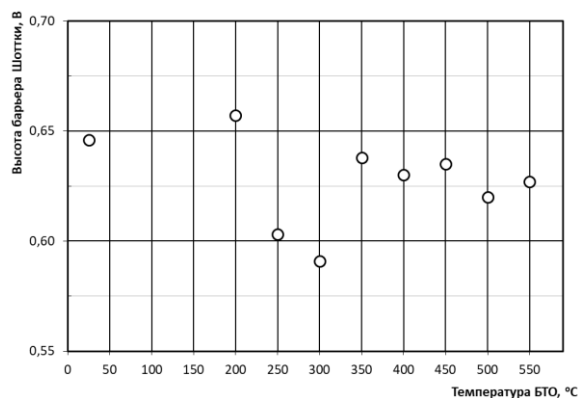


Рис. 4. Зависимость высоты барьера Шоттки структуры Ni/Si от температуры БТО
Fig. 4. Dependence of Ni/Si structure Schottky barrier height on RTP temperature

Для БТО пленок никеля, выполненной при температурах 250 и 300 °С, наблюдается резкое снижение высоты барьера до значений порядка 0,6 и 0,59 В, соответственно. Данная высота барьера не характерна для отдельно взятых фаз силицидов никеля Ni₂Si или NiSi [5, 10, 12–14]. Это позволяет сделать вывод, что при выполнении БТО в данных условиях высота барьера Шоттки определяется не столько фазовым составом переходного слоя силицида на кремнии, сколько наличием дефектов на границе раздела силицид–кремний, генерация которых вызвана структурно – фазовыми превращениями в пленках никеля. Для БТО, выполненной при температуре 350–550 °С, наблюдается увеличение высоты барьера Шоттки до величины 0,62–0,64 В. Данные значения можно считать сопоставимыми с результатами других работ для фазы NiSi, составляющими значения порядка 0,65–0,66 В. Таким образом, и результаты определения высоты барьера подтверждают вывод о переходе пленки никеля в фазу NiSi при температуре БТО 350 °С. Сопоставление полученных результатов исследований позволяет сделать вывод, что в диапазоне температур БТО от 350 до 550 °С формируются равновесные и термостабильные слои моносилицида никеля с низкой дефектностью. При этом наименьшей дефектностью и лучшей воспроизводимостью электрофизических свойств характеризуются пленки силицида никеля, сформированные БТО пленок никеля на кремнии при температуре 400–450 °С.

Заключение

В работе установлены закономерности изменения удельного сопротивления и высоты барьера Шоттки пленок никеля толщиной порядка 60 нм на кремнии *n*-типа (111) при их быстрой термообработке в диапазоне температур от 200 до 550 °С. Показано, что быстрая термообработка структуры Ni/*n*-Si (111) при температурах 200–250 °С в результате фазового перехода Ni-Ni₂Si приводит к увеличению исходной пленки никеля в 1,15–1,33 раза, росту удельного сопротивления до 26–30 мкОм×см и изменению высоты барьера Шоттки от 0,66 до 0,6 В.

При температуре быстрой термообработки 300 °С исходная пленка никеля увеличивается в 1,93 раза, удельное сопротивление и высота барьера Шоттки снижаются до 26–30 мкОм×см и 0,59 В, соответственно, что обусловлено фазовым переходом Ni₂Si-NiSi и фиксацией высоты барьера поверхностными состояниями на границе раздела силицид-кремний. Быстрая термообработка при температуре от 350 до 550 °С приводит к преобразованию исходной пленки никеля в фазу NiSi и сопровождается увеличением ее толщины от 2,26 до 2,67 раз, уменьшением удельного сопротивления до 15–18 мкОм×см и ростом высоты барьера Шоттки до 0,62–0,64 В. Для формирования слоев Ni₂Si и NiSi БТО требуется на два порядка меньше времени, чем при стационарном отжиге, что обусловлено уменьшением энергии активации процесса силицидообразования. В диапазоне температур БТО от 350 до 550 °С формируются равновесные и термостабильные слои моносилицида никеля с низкой дефектностью. При этом наименьшей дефектностью и лучшей воспроизводимостью электрофизических свойств характеризуются пленки силицида никеля, сформированные БТО пленок никеля на кремнии при температуре 400–450 °С. Полученные результаты могут быть использованы в технологии создания изделий интегральной электроники с выпрямляющими контактами.

Список литературы / References

1. Doering R., Nishi Y. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology. 2nd edition. New York: CRC Press; 2008.
2. Karabko A.O., Soloviev Y.A., Kaidov O.L., Gluchmanchuk V.V., Dostanko A.P. [The development of technological processes of the formation of solar cells with contacts based on nickel silicide]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2009;4(42):61-64. (In Russ.)
3. Bahabry R.R., Hanna A.N., Kutbee A.T., Gumus A., Hussian M.M. Impact of Nickel Silicide Rear Metallization on the Series Resistance of Crystalline Silicon Solar Cells. *Energy Technol.* DOI: 10.1002/ente.201700790.
4. Popov S. [Power Schottky Diodes]. *Electronic Components*. 2002;8:77-81 (In Russ.)
5. M'jurarka Sh.P. [*Silitsidy dlja SBIS*]. М.: Mir; 1986. (In Russ.)

6. Pilipenko V.A. [*Bystrye termoobrabotki v tehnologii SBIS*]. Minsk: Izd. centr BGU; 2004. (In Russ.)
7. Borisenko V.E., Hesketh P.J. *Rapid Thermal Processing of Semiconductors*. Berlin: Springer; 1997
8. Chen L.J. *Silicide Technology for Integrated Circuits*. London; 2004.
9. Martin D.M., Enlund J., Yanchev V., Olsson J., Katardjiev I. Optimisation of smooth multilayer Nickel Silicide surface for ALN growth. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008;100(4):042014. DOI: 10.1088/1742-6596/100/4/042014.
10. Zee S.M. [*Fizika poluprovodnikovyh priborov*]. M.: Mir; 1984. (In Russ.)
11. Purtell R., Hollinger G., Rubloff G.W., Ho P.S. Schottky barrier formation at Pd, Pt, and Ni/Si(111) interfaces. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1983;1(2):566-569. DOI: 10.1116/1.571958.
12. Schmid P.E., Ho P.S., Foll H. Tan T.Y. Effects of variations of silicide characteristics on the Schottky-barrier height of silicide-silicon interfaces. *Physical Review B*. 1983;28(8):4593-4601. DOI: 10.1103/physrevb.28.4593.
13. Tung R.T., Ng K.K., Gibson J.M., Levi A.F.J. Schottky-barrier heights of single-crystal NiSi₂ on Si(111): The effect of surface p-n junction. *Physical Review B*. 1986;33(10):7077-7090. DOI: 10.1103/physrevb.33.7077.
14. Liehr M., Schmid P.E., LeGoues F.K., Ho P.S. Schottky barrier heights of epitaxial Ni-silicides on Si(111). *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1986;4(3):855-859. DOI: 10.1116/1.573795.

Вклад авторов

Соловьёв Я.А. изготовил экспериментальные образцы, выполнил анализ и интерпретацию результатов.

Пилипенко В.А. осуществил постановку задачи, выполнил электрофизические измерения.

Authors contribution

Solovjov J.A. made experimental samples, performed analysis and interpretation of the results.

Pilipenko V.A. carried out the statement of the problem, performed electrophysical measurements.

Сведения об авторах

Соловьёв Я.А., к.т.н., доцент, заместитель директора филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющей компании холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Information about the authors

Solovjov Ja.A., PhD, Associate Professor, Deputy Director of “Transistor” Branch of JSC “Integral” holding managing company.

Pilipenko V.A., D.Sci, professor, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus., deputy director of Science Development of State Center “Belmicroanalysis”, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” holding managing company.

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
Минск, ул. Корженевского, 16,
Филиал «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
тел.+375-17-212-21-21;
e-mail: jsolovjov@integral.by
Соловьёв Ярослав Александрович

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Korzhenevskogo str., 16,
“Transistor” Branch of JSC “INTEGRAL” –
“INTEGRAL” holding managing company
tel. +375-17-212-21-21;
e-mail: jsolovjov@integral.by
Solovjov Jaroslav Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-89-95>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 537.874, 620.22

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМБИНИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ ИГЛОПРОБИВНОГО МАТЕРИАЛА И ФРАГМЕНТОВ АЛЮМИНИЕВОЙ ФОЛЬГИ

Х.Д.А. АБДУЛХАДИ, Е.А.А. АЛЬ-МАШАТТ, О.В. БОЙПРАВ, В.А. БОГУШ, А.М. ПРУДНИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 9 января 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Предложен способ создания экранов электромагнитного излучения, заключающийся в закреплении на поверхности иглопробивного углеродсодержащего материала фрагментов алюминиевой фольги. В соответствии с предложенным способом изготовлены образцы экранов. Используемые при этом фрагменты алюминиевой фольги были в виде прямоугольников и полуколлец, габаритные размеры которых не превышали 20 мм. С помощью автоматизированного измерителя коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01–18 получены экранирующие характеристики в диапазоне частот 0,7–17 ГГц образцов экранов, изготовленных в соответствии с предложенным способом. С помощью измерительного стенда, основными компонентами которого являются программный генератор белого шума, усилитель мощности, динамик, шумомер-спектроанализатор МАНОМ-2, в диапазоне частот 20–16000 Гц получены звукоизоляционные свойства образцов экранов, изготовленных в соответствии с предложенным способом. Показано, что величины коэффициентов отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17 ГГц исследованных экранов изменяются в пределах от –0,5 до –19,0 дБ, а величины коэффициента передачи электромагнитного излучения в указанном диапазоне частот – от –2,0 до –18,0 дБ. Установлено, что значения коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17 ГГц и значения коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 6–17 ГГц экранов, изготовленных в соответствии с предложенным способом с использованием фрагментов алюминиевой фольги в виде полуколлец, на 1,0–6,0 дБ ниже аналогичных значений экранов, изготовленных с использованием фрагментов алюминиевой фольги в виде прямоугольников. Определено, что исследованные экраны обеспечивают ослабление звука на 2–12 дБ в диапазоне частот 20–16000 Гц. С учетом полученных результатов экраны, изготовленные в соответствии с предложенным способом, рекомендованы для использования в целях защиты информации, циркулирующей в помещениях, от утечки по акустическому каналу и каналу побочного электромагнитного излучения и наводок.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, экранирование, иглопробивное полотно, алюминиевая фольга, экранирующие характеристики, коэффициент передачи и отражения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Абдулхадид Х.Д.А., Аль-Машатт Е.А.А., Бойправ О.В., Богуш В.А., Прудник А.М. Электромагнитные и звукоизоляционные свойства комбинированных конструкций экранов на основе иглопробивного материала и фрагментов алюминиевой фольги. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 89-95.

ELECTROMAGNETIC AND SOUND INSULATION PROPERTIES OF COMBINED SHIELDS BASED ON THE NEEDLE-PUNCHING MATERIAL AND FRAGMENTS OF ALUMINUM FOIL

HAITHAM D.A ABDULHADI, EMAD A.A. ALMASHAT, OLGA V. BOIPRAV,
VADIM A. BOGUSH, ALEKSANDER M. PRUDNIK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 9 January 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. A method for creating the electromagnetic radiation shields, which consists in fixing fragments of aluminum foil on the surface of a needle-punched carbon-containing material has been proposed. In accordance to the proposed method the shield samples have been made. The fragments of the used aluminium foil were in the form of rectangles or half rings the overall dimensions of which didn't exceed 20 mm. Using an automated meter of transmission and reflection coefficients SNA 0.01–18, shielding characteristics in the frequency range 0.7–17 GHz of the shield samples made in accordance with the proposed method have been obtained. Using the measuring stand, the main components of which were a white noise generator, power amplifier, speaker, sound analyzer MANOM-2, in the frequency range 20–16000 Hz, the soundproofing properties of the shield samples made in accordance with the proposed method have been obtained. It was shown that the values of the electromagnetic radiation reflection coefficients in the frequency range of 0.7–17 GHz of the investigated shields vary from –0.5 to –19.0 dB, and the electromagnetic radiation transmission coefficient in the specified frequency range vary from –2.0 up to –18.0 dB. It was found that the of electromagnetic radiation reflection coefficient values in the frequency range 0.7–17 GHz and the electromagnet radiation transmission coefficient values in the frequency range 6–17 GHz of the shields made in accordance with the proposed method using fragments of aluminum foil in the form of half rings, by 1.0–6.0 dB below the same values of the shields made using fragments of aluminum foil in the form of rectangles. It was determined that the studied shields provide sound attenuation by 2–3 dB in the frequency range from 20–16000 Hz. In view of the obtained results, shields manufactured in accordance with the proposed method are recommended for use in order to protect information circulating in the premises from leakage through the acoustic channel and the channel of secondary electromagnetic radiation.

Keywords: electromagnetic radiation, shielding, needle-punched fabric, aluminium foil, shielding characteristics, transmission and reflection coefficient.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Abdulhadi H.D.A., Almashat E.A.A., Boiprav O.V., Bogush V.A., Prudnik A.M. Electromagnetic and sound insulation properties of combined shields based on the needle-punching material and fragments of aluminum foil. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 89-95.

Введение

Безопасность связи ставит целью предотвращение несанкционированного доступа к инфокоммуникационному трафику, обеспечивая при этом доставку информации предполагаемым пользователям. Данная область включает в себя криптографическую безопасность, безопасность передачи данных, безопасность электромагнитных излучений и физическую безопасность инфокоммуникационного оборудования.

Безопасность электромагнитных излучений – это анализ уязвимостей определенной системы на предмет возможного несанкционированного доступа в результате наличия излучений от оборудования. Как правило, предотвращение распространения излучения в окружающее пространство, а точнее, снижение его до обеспечивающей безопасность данных величины, применяется к инфокоммуникационным системам, радиосетям, криптографическим системам или другим подобным устройствам обработки и передачи информации.

Безопасность электромагнитных излучений стала важной частью защиты конфиденциальных данных в государственных и частных организациях. Ряд стран разработали соответствующие протоколы для экранирования оборудования, создающего электромагнитное излучение, амплитуда которого превышает уровни, установленные стандартом MIL-STD-461G «Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment».

Одной из задач по разработке материалов для создания защитных конструкций для обеспечения безопасности систем, предназначенных для передачи речевой информации, является задача разработки материалов, обладающих экранирующими свойствами в заданном диапазоне электромагнитных излучений, но, с другой стороны, низкими звукоизоляционными характеристиками.

Методика проведения эксперимента

Авторами предложен способ изготовления экранов электромагнитного излучения, заключающийся в закреплении на поверхности иглопробивного углеродсодержащего материала [1] фрагментов алюминиевой фольги. В соответствии с предложенным способом сформированы два типа образцов экранов. Образцы первого типа были изготовлены с использованием фрагментов алюминиевой фольги в виде прямоугольников, длина и ширина которых не превышала 20 мм, образцы второго типа – с использованием фрагментов алюминиевой фольги в виде полуколлец, радиус и ширина которых не превышали 20 мм и 10 мм соответственно. Толщина образцов составляла 8 ± 2 мм.

Для исследования экранирующих характеристик изготовленных образцов экранов использовался измеритель коэффициентов передачи и отражения, работающий по принципу выделения и детектирования уровней падающей и отраженной волн, по методике, описанной в [2]. Измерительная установка состоит блока обработки измерительных сигналов, генератора качающейся частоты, преобразования и обработки прошедшей волны, а также преобразования и обработки падающей/отраженной волны.

Для исследования звукоизоляционных характеристик образцов использовался измерительный стенд [3], изготовленный из двух частей алюминиевой трубы с длинами 0,8 и 0,4 м и внутренним диаметром 0,26 м. Внутренние поверхности частей трубы были облицованы звукопоглощающим материалом для уменьшения диффузной составляющей звукового поля, а наружные поверхности частей трубы были облицованы вибропоглощающим материалом на битумно-мастичной основе. Обе части трубы были закреплены на металлической станине, причем первая часть – неподвижно на виброизолирующих прокладках из резины, а другая часть передвигалась с помощью винтовой передачи. Металлическая станина была также установлена на виброизолирующие прокладки. В неподвижной части трубы был установлен микрофон М-101 с микрофонным предусилителем ВПМ-101. Для минимизации воздействия виброизоляции на микрофон, последний был подвешен на резиновых нитях внутри металлических колец, которые, в свою очередь, также устанавливались на основание из звукопоглощающего материала внутри неподвижной части трубы. В подвижной части трубы был установлен динамик Auditor с номинальным сопротивлением 4 Ом, пиковой/номинальной мощностью 170/35 Вт и чувствительностью 90 дБ. Образец фиксировали между частями трубы, закрепляя его между плоскими фланцами с резиновыми прокладками. Сигнал «белого шума», сформированный программой Daqarta, проходил через усилитель мощности LV 103, воспроизводится динамиком и излучался в трубу с установленным образцом. Регистрация сигнала осуществлялась шумомером-спектроанализатором МАНОМ-2. При оценке звукоизоляции образцов весь диапазон измерений делится на третьоктавные полосы со среднегеометрическими частотами от 20 Гц до 16 кГц, в соответствии с ГОСТ 12090-80 «Частоты для акустических измерений. Предпочтительные ряды». Звукоизоляция определялась как разность уровней звукового давления при прохождении звука через исследуемый образец материала и в его отсутствие.

Результаты и их обсуждение

Проводились измерения коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазонах УВЧ и СВЧ. Показано, что у образцов экранов первого типа величины коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–2 ГГц составили –0,5...–2,7 дБ в режиме холостого хода и –1,0...–5,6 дБ в режиме короткого замыкания (рис. 1, *a*), в то время, как в диапазоне частот 2–17 ГГц их величины составили –3,8...–19,0 дБ в режиме холостого хода и –2,0...–15,0 дБ в режиме короткого замыкания (рис. 1, *b*).

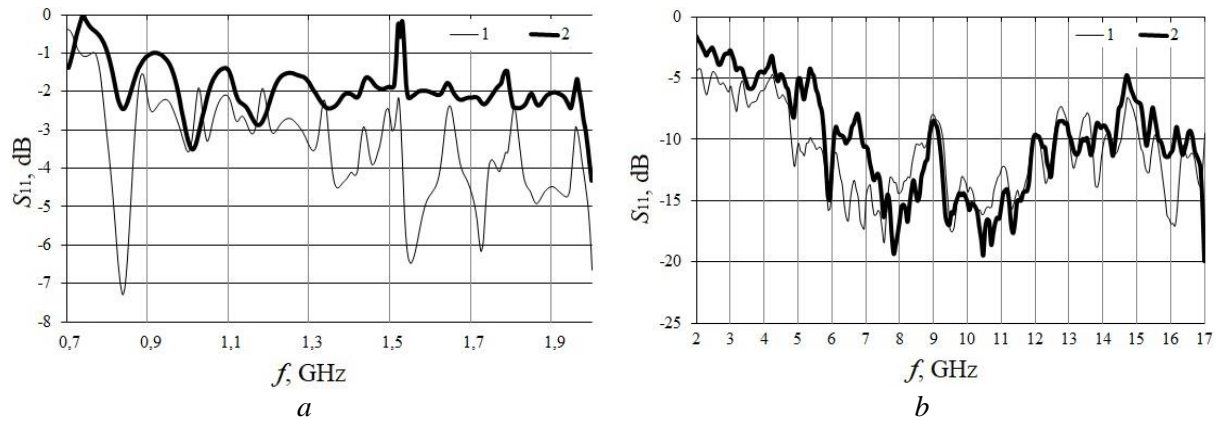


Рис. 1. Зависимости коэффициента отражения от частоты электромагнитного излучения для образцов экранов первого типа: *a* – в диапазоне 0,7–2 ГГц; *b* – в диапазоне 2–17 ГГц (1 – в режиме холостого хода; 2 – в режиме короткого замыкания)

Fig. 1. The frequency dependencies of the reflection coefficients the shields samples of the first type: *a* – in the range 0,7–2 GHz; *b* – in the range 2–17 GHz (1 – in the idle mode; 2 – in the short circuit mode)

Для образцов экранов второго типа в диапазоне частот 0,7–17 ГГц величины коэффициента отражения составили –2,7...–5,2 дБ в режиме холостого хода и –0,5...–7,2 дБ в режиме короткого замыкания (рис. 2, *a*), в то же время, как в диапазоне частот 2–17 ГГц их величины составили –4,0...–11,0 дБ в режиме холостого хода и –5,0...–12,0 дБ в режиме короткого замыкания (рис. 2, *b*).

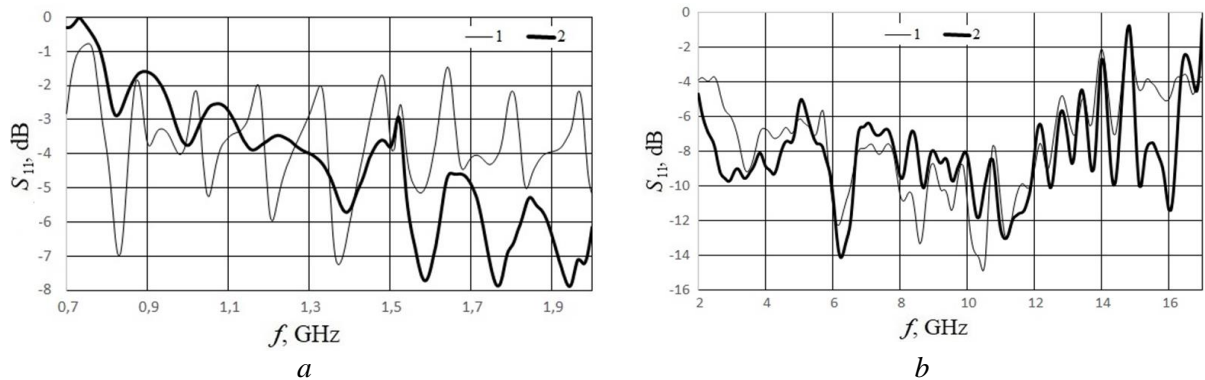


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения от частоты электромагнитного излучения образцов экранов второго типа: *a* – в диапазоне 0,7–2 ГГц; *b* – в диапазоне 2–17 ГГц (1 – в режиме холостого хода; 2 – в режиме короткого замыкания)

Fig. 2. The frequency dependencies of the reflection coefficients of the shields samples of the second type: *a* – in the range 0,7–2 GHz; *b* – in the range 2–17 GHz (1 – in the idle mode; 2 – in the short circuit mode)

Получены также величины коэффициента передачи электромагнитного излучения для изготовленных образцов электромагнитных экранов (рис. 3, 4). Установлено, для образцов экранов первого типа указанные значения в диапазонах частот 0,7–2 ГГц (рис. 3, *a*) и 2–17 ГГц (рис. 3, *b*) составили –5,9...–16,2 дБ и –5,4...–13,2 дБ соответственно. Для образцов экранов второго типа значения коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазонах 0,7–17 ГГц (рис. 3, *a*) и 2–17 ГГц (рис. 3, *b*) соответственно варьировались в пределах –2,0...–12,2 дБ и –4...–18,0 дБ.

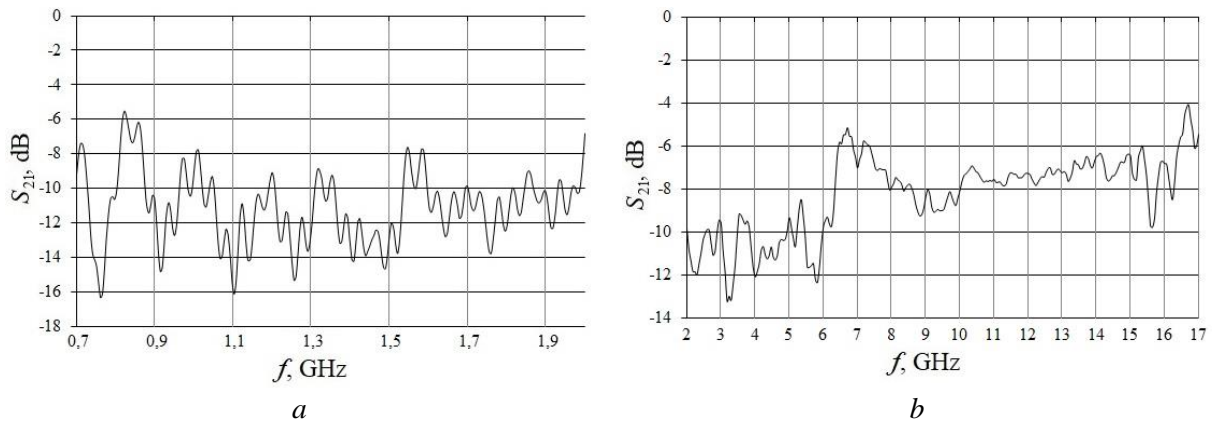


Рис. 3. Зависимости коэффициентов передачи от частоты электромагнитного излучения образцов экранов первого типа: *a* – в диапазоне 0,7–2 ГГц; *b* – в диапазоне 2–17 ГГц
Fig. 3. The frequency dependencies of the transmission coefficients of the shields samples of the first type: *a* – in the range 0,7–2 GHz; *b* – in the range 2–17 GHz

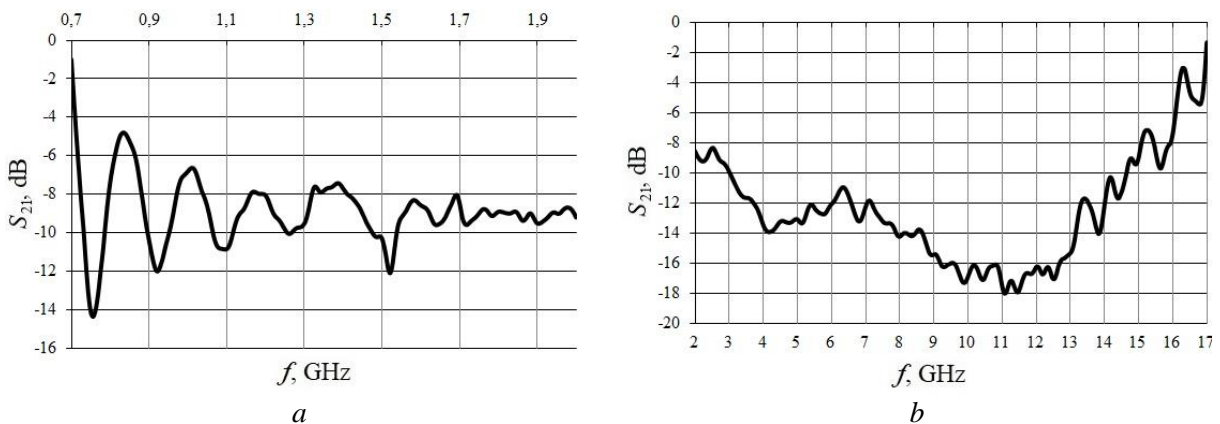


Рис. 4. Зависимости коэффициентов передачи от частоты электромагнитного излучения образцов экранов второго типа: *a* – в диапазоне 0,7–2 ГГц; *b* – в диапазоне 2–17 ГГц
Fig. 4. The frequency dependencies of the transmission coefficients of the shields samples of the second type: *a* – in the range 0,7–2 GHz; *b* – in the range 2–17 GHz

На рис. 5 представлены звукоизоляционные характеристики исследованных образцов экранов в сравнении со звукоизоляционной характеристикой полиэтиленовых пластин толщиной 600 мм, которые в настоящее время широко используются в целях снижения уровней акустических шумов, воздействующих на помещения.

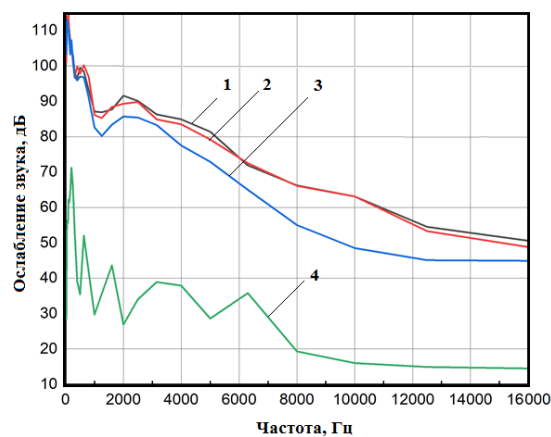


Рис. 5. Звукоизоляционные характеристики воздушной среды (кривая 1), образцов экранов первого и второго типов (кривые 2 и 3 соответственно), полиэтиленовой пластины толщиной 600 мм (кривая 4)
Fig. 5. Sound insulation characteristics of the air (curve 1), shields samples of the first and the second types (curves 2 and 3 respectively), a polyethylene plate 600 mm thick (curve 4)

Как видно из рис. 5, изготовленные и исследованные экраны первого и второго типов обеспечивают ослабление звука на 2–3 дБ и на 2–12 дБ в диапазоне частот 20–16000 Гц.

Заключение

Показано, что величины коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц экранов, изготовленных на основе углеродосодержащего иглопробивного полотна и фрагментов алюминиевой фольги в соответствии с предложенным способом, составляют –0,5...–19,0 дБ при величинах коэффициента передачи электромагнитного излучения –2,0...–18,0 дБ. Определено, что путем изменения содержания углерода в иглопробивном материале и геометрических размеров фрагментов алюминиевой фольги можно обеспечить в заданном диапазоне частот требуемые характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения указанных экранов. В частности, при повышении процентного содержания углерода в иглопробивном материале можно снизить значения их коэффициента передачи электромагнитного излучения, при этом их масса и линейные размеры существенно не изменятся. При изменении формы фрагментов алюминиевой фольги можно снизить значения коэффициента отражения электромагнитного излучения таких экранов. Простота технологического процесса их изготовления и низкая степень подверженности применяемых при этом материалов к воздействию внешней среды являются факторами, обуславливающими невысокую стоимость таких экранов по сравнению с аналогами.

Принимая во внимание звукоизоляционные и электромагнитные свойства исследованных экранов, можно сделать вывод о том, что они могут найти применение в качестве элементов конструкций, предназначенных для облицовки стен помещений, в пределах которых циркулирует информация ограниченного распространения. Эти экраны будут способствовать защите такой информации от утечки по акустическому каналу, а также каналу побочного электромагнитного излучения и наводок.

Список литературы

1. Prudnik A., Beloglazov A., Kudryavtseva T., Lynkou L. Production technology and shielding properties of the needle-punched non-woven fabrics with carbon additives. (20–22 September 2017). *Electromagnetic disturbances EMD 2017: Proceedings of the 24th International conference*. Poland, Białystok, 2017. P. 108–111.
2. Абдулхаді Х.Д.А., Белоусова Е.С., Пруднік А.М., Лыньков Л.М. Механические и электромагнитные свойства экранов на основе иглопробивного материала с проводящими и диэлектрическими покрытиями. *Вестні НАН Беларусі*. 2019; 64(1):44-50.
3. Зельманский О.Б., Худолей И.С., Прудник А.М., Лыньков Л.М., Петров С.Н. Методика оценки снижения разборчивости речи конструкциями для средств защиты информации. *Вестник Военной Академии Республики Беларусь*. 2010; 2:153-158.

References

1. Prudnik A., Beloglazov A., Kudryavtseva T., Lynkou L. Production technology and shielding properties of the needle-punched non-woven fabrics with carbon additives. (20–22 September 2017). *Electromagnetic disturbances EMD 2017: Proceedings of the 24th International conference*, Poland, Białystok, 2017. P. 108–111.
2. Abdulhadi H.D.A., Belousova E.S., Prudnik A.M., Lyn'kov L.M. [Mechanical and electromagnetic properties of the shields on the base of needle-punched material with conductive and dielectric coatings]. *Vesci NAN Belarusi = Vesci NAN Belarusi*. 2019; 64(1):44-50. (in Russ.)
3. Zelmanski O.B., Hudolej I.S., Prudnik A.M., Lyn'kov L.M., Petrov S.N. [Methodology for assessing the decrease in speech intelligibility by designs for information security tools]. *Vestnik Voennoj akademii Respubliki Belarus = Vestnik Voennoj akademii Respubliki Belarus*. 2010; 2:153-158. (in Russ.)

Вклад авторов

Абдулхадид Х.Д.А. и Аль-Машатт Е.А.А. изготовили образцы экранов и провели измерения значений их коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения.

Бойправ О.В. разработала способ изготовления экранов и выполнила интерпретацию результатов измерения их значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения.

Богуш В.А. определил цель проведения исследования, поставил задачи, выполнил интерпретацию результатов измерения звукоизоляционных характеристик экранов.

Прудник А.М. выполнил измерение звукоизоляционных характеристик экранов, описал полученные результаты исследования.

Authors contribution

Abdulhadi H.D.A. and Al-Mashatt E.A.A. made shields samples and measured their electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values.

Boiprav O.V. developed a method for shields manufacturing and interpreted the results of their electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values.

Bogush V.A. defined the purpose of the study, set tasks, performed an interpretation of the measurement results of the shields soundproofing characteristics.

Prudnik A.M. performed the measurement of soundproofing characteristics of screens, described the results of the study.

Сведения об авторах

Абдулхадид Х.Д.А., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Аль-Машатт Е.А.А., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бойправ О.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Богуш В.А., д.ф.-м.н., профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Прудник А.М., к.т.н., доцент, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Abdulhadi H.D.A., PG student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Al-Mashatt E.A.A., PG student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Boiprav O.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Information Security Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bogush V.A., D.Sci, Professor, Rector of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Prudnik A.M., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Engineering Psychology and Ergonomics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
+375-17-293-88-24;
e-mail: aleksander.prudnik@bsuir.by
Прудник Александр Михайлович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brouki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
+375-17-293-88-24;
E-mail: aleksander.prudnik@bsuir.by
Prudnik Aleksander Mikhailovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-96-103>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 551.509

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫВОДОВ О НАЛИЧИИ ВРЕМЕННЫХ ТРЕНДОВ

МУХА В.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 5 октября 2017

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. На примере исследования изменения средних годовых значений температуры атмосферного воздуха на метеостанции Минск с 1998 года излагается методика обработки метеорологических данных для выводов о наличии линейных временных трендов количественных характеристик погоды. Средние годовые значения температуры, полученные по результатам обработки имеющихся метеорологических данных, аппроксимируются методом наименьших квадратов линейной регрессионной зависимостью от времени. Полученная таким образом линейная функция регрессии для средних годовых значений температуры атмосферного воздуха имеет некоторый рост с течением времени (положительный временной тренд). В работе ставится задача выяснения значимости такого тренда. Для этого предлагается использовать регрессионный анализ с его процедурами проверки гипотез. Прежде всего проверяется выполнимость требований, предъявляемых к регрессионному анализу: нормальности распределения возмущений и однородности дисперсии возмущений. Нормальность распределения возмущений проверена и подтверждена критерием согласия Колмогорова. Однородность дисперсии проверена и подтверждена проверкой гипотезы о равенстве дисперсий двух нормальных распределений и критерием Смирнова для проверки гипотезы о равенстве двух распределений. Для проверки значимости положительного тренда средней годовой температуры проверялись гипотезы о значимости коэффициентов линейной функции регрессии с помощью t -статистики с распределением Стьюдента и гипотеза о существовании линейной связи с помощью f -статистики с распределением Фишера (дисперсионный анализ). В результате проверки указанных гипотез на уровне значимости 0,05 установлена незначимость положительного линейного тренда средней годовой температуры атмосферного воздуха на метеостанции Минск в периоды с 1998 по 2016 год и с 1998 по 2017 год и его значимость в периоды с 1998 по 2018 год и с 1998 по 2019 год.

Ключевые слова: регрессионный анализ, дисперсионный анализ, статистическая проверка гипотез, парниковый эффект, глобальное потепление.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Муха В.С. Статистическая обработка метеорологических данных для выводов о наличии временных трендов. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 96-103.

STATISTICAL PROCESSING OF THE METEOROLOGICAL DATA FOR CONCLUSION ON THE PRESENCE OF THE TIME TRENDS

VLADIMIR S. MUKHA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Submitted 5 October 2017

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The technic of the processing of the meteorological data for conclusion on the presence of the time trends in the quantitative characteristics of the weather on the example of the analysis of the average yearly atmospheric temperature change at the meteorological station Minsk from 1989 is presented. The average yearly atmospheric temperature received from the measurements is approximated by the least square error method in the linear time dependence regression function. The linear time dependence regression function received in such a way has some positive growing (positive trend). The aim of this paper is to clarify the significance of this growth. For this aim, the usage of the regression analysis with its procedures of hypotheses testing is proposed. First of all, the performing of the demands presented to the regression analysis is checked: normality of the distribution of the disturbance and the homogeneity of the variance (dispersion) of the disturbance. The normality of the distribution of the disturbance was checked and confirmed by the Kolmogorov test. The homogeneity of the dispersion of the disturbance was checked and confirmed both by checking the hypotheses on the equality of the dispersions of two normal distributions and by the Smirnov test for checking the hypotheses on the equality of two distributions. For checking the significance of the positive trend of the yearly mean temperature, the hypotheses on the significance of the coefficients of the linear regression function by the Student *t*-statistics and the hypothesis on the linear connection presence by the analysis of variance were checked. As the result, the insignificance of the positive linear trend from 1998 to 2016 and from 1998 to 2017 and its significance from 1998 to 2018 and from 1998 to 2019 on the level of significance 0.05 for mean average yearly atmospheric temperature at the meteorological station Minsk was stated.

Keywords: regression analysis, analysis of variance, testing of statistical hypotheses, greenhouse effect, global warming.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Mukha V.S. Statistical processing of the meteorological data for conclusion on the presence of the time trends. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 96-103.

Введение

Всемирной метеорологической организацией (ВМО) и Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП) в 1988 году была создана межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК, англ. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) для оценки риска глобального изменения климата, вызванного техногенными факторами. До настоящего времени МГЭИК выпустила пять оценочных докладов, посвященных состоянию климата Земли и оценке его изменения в будущем. Пятый оценочный доклад выпущен в 2013–2014 гг.

Отправной точкой первого оценочного доклада является констатация факта существования природного парникового эффекта, усиливающегося в результате деятельности человека и способного привести к глобальному потеплению и климатическим изменениям. «Мы уверены в следующем: существует природный парниковый эффект, который поддерживает повышенную температуру Земли, по сравнению с той, которая могла бы быть при других обстоятельствах. Выбросы в атмосферу в результате деятельности человека существенно увеличивают атмосферную концентрацию парниковых газов: двуокиси углерода,

метана, хлорфторуглеродов и закиси азота. Увеличение этих выбросов увеличит парниковый эффект, в результате чего в среднем создается дополнительное потепление поверхности Земли». Приводится график изменения средней температуры Земли за период с 1860 по 1990 г. относительно средней температуры за 1951–1980 гг., построенный на основе инструментальных измерений, и делается следующий вывод: «... мы верим, что реальное нагревание земного шара на 0,3–0,6 °C произошло в течение последнего столетия ...» (рис. 1)¹. Применение выражений «мы уверены», «мы верим» без строгих обоснований снижает убедительность представленных выводов.

В пятом оценочном докладе указывается, что «глобально усредненные совокупные данные о температуре поверхности суши и океана, рассчитанные на основе линейного тренда, свидетельствуют о потеплении на 0,85 °C за период с 1880 по 2012 год» (рис. 2)². Не указывается, однако, насколько представительна использованная выборка, как рассчитывались средние характеристики, какими методами получен данный вывод, что снижает убедительность представленного заключения.

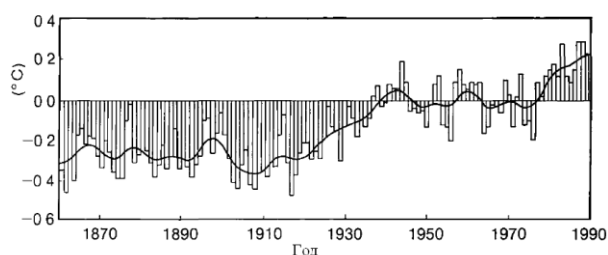


Рис. 1. График изменения средней температуры Земли согласно¹

Fig. 1. A graph of the variation of the mean earth temperature in accordance with¹

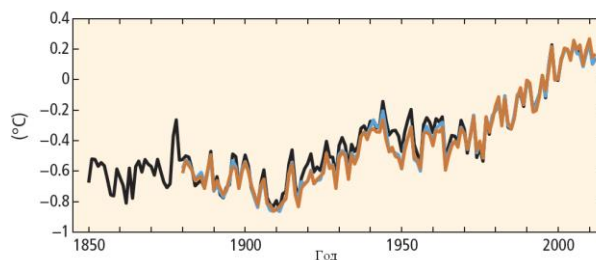


Рис. 2. График изменения средней температуры Земли согласно²

Fig. 2. A graph of the variation of the mean earth temperature in accordance with²

12 декабря 2015 г. на конференции в Париже (*COP21*), посвященной климатическим изменениям, подписано международное соглашение по поддержанию увеличения средней температуры планеты на уровне ниже 2 °C – так называемое Парижское соглашение по климату.

Наряду с этим имеется большое число «климатических скептиков», ставящих под сомнение как сам факт глобального потепления, так и роль человека в этом процессе³. Это может быть связано с отмеченной выше неубедительностью докладов МГЭИК. Интерес к проблеме подогревается объявленным 1 июня 2017 г. президентом США Д. Трампом выходом США из Парижского соглашения по климату.

В связи с этим представляется целесообразным отслеживание изменений температуры атмосферного воздуха в локальных масштабах. Представляется, что достоверные выводы об изменениях любой характеристики могут быть сделаны только на основе научной обработки результатов ее инструментальных измерений.

В данной статье делается попытка исследования изменения температуры атмосферного воздуха на метеостанции Минск по имеющимся данным с 1998 по 2019 год. В качестве научного инструмента исследования предлагается использовать регрессионный анализ с его процедурами проверки гипотез.

Содержание исследований

Исходными данными для исследований являются данные метеорологических наблюдений⁴. Эти данные содержат измерения характеристик погоды (температуры атмосферного воздуха, атмосферного давления, направления и скорости ветра, относительной влажности воздуха и некоторых других) с периодичностью в три часа начиная с нуля часов по UTC (UTC – всемирное координированное время, англ. Coordinated Universal Time), всего 8 измерений в сутки и 240 измерений в месяц из 30 дней. Данные, полученные с сайта⁴, объединялись в файлы месячных данных. Среднее месячное значение характеристики

за определенный месяц определенного года, например, температуры атмосферного воздуха t , рассчитывалось по формуле

$$\bar{t}_{y,m} = \frac{1}{n_{y,m}} \sum_{j=1}^{n_{y,m}} t_{j,y,m}, \quad y = 1998, 1999, \dots, 2019, \quad m = 1, 2, \dots, 12, \quad (1)$$

где $t_{j,y,m}$ – j -е измерение характеристики t в m -м месяце y -го года, $n_{y,m}$ – количество измерений характеристики t в m -м месяце y -го года, $\bar{t}_{y,m}$ – среднее значение характеристики t в m -м месяце y -го года.

Средние месячные значения характеристики t , полученные по формуле (1), использовались для расчета средних годовых значений характеристики по формуле

$$\bar{t}_y = \left(\sum_{m=1}^{12} n_{y,m} \right)^{-1} \left(\sum_{m=1}^{12} n_{y,m} \bar{t}_{y,m} \right), \quad y = 1998, 1999, \dots, 2019.$$

Полученные по этой формуле значения температуры атмосферного воздуха на метеостанции Минск приведены в табл. 1 (данные за 2002, 2004 и 2005 годы отсутствуют). Как видно, самым холодным в рассматриваемом периоде был 1998 год со средней годовой температурой 6,3°C.

Таблица 1. Средние годовые значения температуры атмосферного воздуха на метеостанции Минск
Table 1. Mean yearly values of the temperature of the atmospheric air at the meteorological station Minsk

Год y Year y	1998	1999	2000	2001	2003	2006	2007	2008	2009	2010
Средняя годовая температура $\bar{t}_y, ^\circ\text{C}$ Mean yearly temperature $\bar{t}_y, ^\circ\text{C}$	6,3	7,8	7,9	7,0	6,6	6,8	7,7	7,9	7,0	7,0
Год y Year y	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	–
Средняя годовая температура $\bar{t}_y, ^\circ\text{C}$ Mean yearly temperature $\bar{t}_y, ^\circ\text{C}$	7,6	6,8	7,5	7,8	8,7	7,8	7,7	8,1	8,4	–

Всего в табл. 1 имеется 19 значений (размер выборки $n = 19$). График средних годовых значений температуры атмосферного воздуха на метеостанции Минск, построенный по данным табл. 1, приведен на рис. 3 (ломаные линии). По виду графика можно сделать вывод, что данные табл. 1 можно представить в виде

$$\bar{t}_y = \theta_1 + \theta_2 y = H^T(y) \bar{\theta} + \xi_y, \quad y = 1998, 1999, \dots, 2019, \quad (2)$$

где $z = H^T(y) \bar{\theta}$ – линейная функция регрессии средней годовой температуры (линейный временной тренд средней годовой температуры), $H^T(y) = (1, y)$ – вектор базисных функций для представления линейной функции регрессии, $\bar{\theta}^T = (\theta_1, \theta_2)$ – вектор коэффициентов линейной функции регрессии, ξ_y – отклонения средней годовой температуры от функции регрессии, являющиеся результатом действия случайного возмущения Ξ с нулевым средним и дисперсией σ^2 .

Вместо модели данных (2) удобнее пользоваться следующей моделью данных:

$$\bar{t}_x = \theta_1 + \theta_2 x = H^T(x) \bar{\theta} + \xi_x, \quad x = 1, 2, \dots, 19, \quad (3)$$

в которой вместо переменной y взята переменная $x = y - 1997$, $\bar{t}_x = \bar{t}_y$, $H^T(x) = (1, x)$, $\bar{\theta}^T = (\theta_1, \theta_2)$. При изменении переменной y от 1998 до 2019 переменная x принимает значения от 1 до 19.

Вектор оценок коэффициентов $\hat{\theta}^T = (\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2)$ линейной функции регрессии (3) может быть получен методом наименьших квадратов по формуле [1]

$$\hat{\theta} = (F^T F)^{-1} (F^T Z),$$

где $F = (H(x_1), H(x_2), \dots, H(x_n)) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n \end{pmatrix}$, $Z^T = (\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_n)$, $n = 19$. Оценка $\hat{\sigma}^2$

дисперсии σ^2 случайного возмущения Ξ определяется формулой:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-k} (Z - F\hat{\theta})^T (Z - F\hat{\theta}), \quad (4)$$

где $k = 2$ – количество коэффициентов функции регрессии.

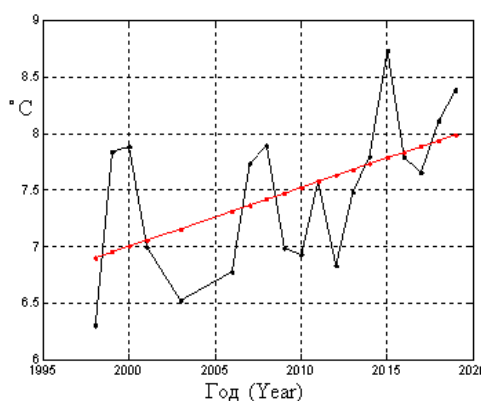


Рис. 3. Средняя годовая температура атмосферного воздуха и ее линейная аппроксимация на метеостанции Минск с 1998 по 2019 год

Fig. 3. The yearly mean temperature of the atmospheric air and its linear approximation at the meteorological station Minsk from 1998 to 2019 year

По этим формулам и данным табл.1 были получены следующие оценки коэффициентов линейной функции регрессии и оценка дисперсии случайного возмущения для средней годовой температуры атмосферного воздуха на метеостанции Минск: $\hat{\theta}_1 = 6,9072$, $\hat{\theta}_2 = 0,0442$, $\hat{\sigma}^2 = 0,5625$. Функция регрессии при значениях коэффициентов $\hat{\theta}_1$, $\hat{\theta}_2$ (эмпирическая функция регрессии) изображена на рис.1 прямой линией. На рисунке наблюдается некоторый рост средней годовой температуры с течением времени. Возникает, однако, следующий вопрос: является ли этот рост значимым? Линейный регрессионный анализ позволяет дать ответ на этот вопрос путем проверки гипотез двух видов: о значимости коэффициентов линейной регрессии и о наличии линейной связи между входной и выходной переменными [1, 2].

Регрессионный анализ основан на предположениях нормальности $N(0, \sigma^2)$ случайного возмущения Ξ и однородности (независимости от x) дисперсии σ^2 . Вывод о том, что данные предположения выполняются, можно сделать по виду графиков на рис. 1. Однако в работе была выполнена проверка этих предположений с помощью статистических критериев. Нормальность распределения случайного возмущения Ξ была подтверждена применением к данным $\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_{19}$ табл.1 критерия согласия Колмогорова [3]. В частности, была подтверждена принадлежность распределению $N(0, \hat{\sigma}^2)$ случайных чисел $u_x = \bar{t}_x - \hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2 x$, $x = 1, 2, \dots, 19$. Однородность дисперсии проверялась и подтверждена двумя критериями: критерием однородности дисперсий двух распределений и критерием Смирнова однородности двух распределений. Рассматривались две выборки $\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_{10}$ и $\bar{t}_{11}, \bar{t}_{12}, \dots, \bar{t}_{19}$ в предположении, что они выбраны из распределений с функциями распределения $F_1(x)$ и $F_2(x)$ с дисперсиями σ_1^2 и σ_2^2 соответственно. Однородность дисперсии случайного возмущения Ξ будет подтверждена в случае принятия гипотезы о равенстве дисперсий σ_1^2 и σ_2^2 . Данная гипотеза проверяется на основе статистики $f = \hat{\sigma}_1^2 / \hat{\sigma}_2^2$, имеющей f -распределение (Фишера)

с 9,8 степенями свободы [1]. Здесь $\widehat{\sigma}_1^2$ и $\widehat{\sigma}_2^2$ – оценки дисперсий σ_1^2 и σ_2^2 , полученные по выборкам $\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_{10}$ и $\bar{t}_{11}, \bar{t}_{12}, \dots, \bar{t}_{19}$:

$$\widehat{\sigma}_1^2 = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{10} (\bar{t}_i - m_1)^2, \quad \widehat{\sigma}_2^2 = \frac{1}{8} \sum_{i=11}^{19} (\bar{t}_i - m_2)^2,$$

$$m_1 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \bar{t}_i, \quad m_2 = \frac{1}{9} \sum_{i=11}^{19} \bar{t}_i.$$

Гипотеза об однородности распределений $F_1(x)$ и $F_2(x)$ – это гипотеза о том, что выборки $\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_{10}$ и $\bar{t}_{11}, \bar{t}_{12}, \dots, \bar{t}_{19}$ извлечены из одного и того же распределения ($F_1(x) = F_2(x)$). Эта гипотеза проверяется на основе статистики Смирнова [3]

$$z = \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} \max |F_1^*(x) - F_2^*(x)|,$$

где $F_1^*(x)$ и $F_2^*(x)$ – эмпирические функции распределения, полученные по выборкам $\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_{10}$ и $\bar{t}_{11}, \bar{t}_{12}, \dots, \bar{t}_{19}$ соответственно, $n_1 = 10$, $n_2 = 9$ – размеры этих выборок. Таблица процентных точек распределения статистики z для малых значений n_1 и n_2 имеется в [3], а при $n_1 \rightarrow \infty$, $n_2 \rightarrow \infty$ статистика z имеет распределение Колмогорова.

Гипотеза о значимости коэффициентов линейной функции регрессии проверяется на основе t -статистики

$$t_i = \frac{\widehat{\theta}_i}{\sqrt{\widehat{\sigma}_1^2 a^{i,i}}}, \quad i = \overline{1,2}, \quad (5)$$

где $\widehat{\sigma}^2$ определяется формулой (4), $a^{i,i}$ – элемент матрицы $A^{-1} = (a^{i,j}) = (F^T F)^{-1}$. Статистика t_i (5) имеет распределение Стьюдента с $n - k$ степенями свободы.

Гипотеза о наличии линейной стохастической связи между входной и выходной переменными проверяется с использованием f -статистики дисперсионного анализа:

$$f = \frac{R_1^2 - R_0^2}{k - 1} \Big/ \frac{R_0^2}{n - k}, \quad (6)$$

где

$$R_1^2 = \sum_{i=1}^n (\bar{t}_{y,i} - \bar{z})^2,$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{t}_{y,i},$$

$$R_0^2 = \sum_{i=1}^n (\bar{t}_{y,i} - H^T(x_i) \widehat{\theta})^2.$$

Статистика f (6) имеет F -распределение (Фишера) с $k - 1, n - k$ степенями свободы.

Гипотеза о значимости коэффициентов линейной функции регрессии $\{H_0 : \theta_i = 0; H_1 : \theta_i \neq 0\}$, $i = 1, 2$, проверялась с помощью двустороннего критерия значимости $P(|t_i| > t_{\alpha/2}) = \alpha$. На типичном уровне значимости $\alpha = 0,05$ предел значимости $t_{\alpha/2}$ при $n - k = 17$ степенях свободы имеет значение $t_{\alpha/2} = 2,1098$. Рассчитанные по формуле (5) эмпирические значения статистики равны: $t_{1,эмп.} = 24,8039$, $t_{2,эмп.} = 2,6130$. Так как $|t_{1,эмп.}| > t_{\alpha/2}$, то гипотезу $H_0 : \theta_1 = 0$ следует отклонить, то есть коэффициент θ_1 следует признать значимым. В силу выполнения неравенства $|t_{2,эмп.}| > t_{\alpha/2}$ гипотезу $H_0 : \theta_2 = 0$ также следует отклонить, то есть признать коэффициент θ_2 значимым.

Гипотеза о наличии линейной стохастической связи между входной и выходной переменными в нашем скалярном случае имеет вид $\{H_0 : \theta_1 = 0; H_1 : \theta_1 \neq 0\}$. Она проверялась правосторонним критерием значимости $P(f > f_\alpha) = \alpha$. На уровне значимости $\alpha = 0,05$ предел значимости f_α при $k-1=1$, $n-k=17$ степенях свободы имеет значение $f_\alpha = 4,4513$. Рассчитанное по формуле (6) эмпирическое значение статистики f равно $f_{\text{эмп.}} = 6,8278$. Так как $f_{\text{эмп.}} > f_\alpha$, то гипотеза $H_0 : \theta_1 = 0$ отклоняется. Это означает наличие значимой линейной связи между рассматриваемыми переменными.

Аналогичный анализ выполнялся ранее в работе [4] для периода времени с 1998 по 2017 год. Там было установлено отсутствие значимой линейной зависимости от времени средней годовой температуры атмосферного воздуха на метеостанции Минск. Дополнительно был выполнен анализ данных для периодов времени с 1998 по 2016 год и с 1998 по 2018 г. Для данных с 1998 по 2016 год была установлена незначимость линейного тренда, а для данных с 1998 по 2018 год – его значимость.

Заключение

В статье предложена методика использования процедур регрессионного анализа для выводов о наличии линейных временных трендов количественных характеристик погоды. Линейный регрессионный анализ позволяет установить значимость линейного тренда путем проверки гипотез двух видов: гипотезы о значимости коэффициентов линейной функции регрессии и гипотезы о существовании линейной зависимости функции регрессии. Данная методика была использована для анализа линейного тренда средней годовой температуры атмосферного воздуха на метеостанции Минск. Рассматривались четыре периода времени: с 1998 по 2016 год, с 1998 по 2017 год, с 1998 по 2018 год и с 1998 по 2019 год. Полученные линейные регрессионные зависимости для этих периодов имеют небольшой положительный тренд. Проверка указанных выше гипотез на уровне значимости $\alpha = 0,05$ показала незначимость положительного линейного тренда средней годовой температуры атмосферного воздуха на метеостанции Минск в периоды с 1998 по 2016 год и с 1998 по 2017 год и его значимость в периоды с 1998 по 2018 год и с 1998 по 2019 год. Более теплые в среднем 2018 и 2019 годы привели к росту положительного линейного тренда средней годовой температуры до значимого значения. Отметим также, что в работах [5, 6] предлагаются иные статистические подходы для тех же целей.

Список литературы / References

1. Vuchkov I. N., Boyadjeva L., Solakov E. [*Applied linear regression analysis*]. Moskva: Finansy I statistika; 1987. (In Russ.)
2. Rao C.S. *Linear statistical inference and its applications*. Wiley, 2ed, 1973.
3. Bolshev L.N., Smirnov N.V. [*Tables of mathematical statistics*]. Moskva: Nauka; 1983. (In Russ.)
4. V.S. Mukha. On the Statistical Methods for the Conclusion on the Climate Change. *American Journal of Environmental Engineering and Science*. 2018;5(2):34-38.
5. Gavrilov M.B., Marković S.B., Janc N., Nikolić M., Valjarević A., Komac B., Zorn M., Punišić M., Bačević N. Assessing average annual air temperature trends using the Mann–Kendall test in Kosovo. *Acta geographica Slovenica*. 2018;58(1):7-25. DOI: 10.3986/AGS.1309.
6. McKittrick, Ross R., McIntyre S. Herman C. Panel and multivariate methods for tests of trend equivalence in climate data sets. *Atmospheric Science Letters*. 2010;11(4):270-277. DOI: 10.1002/asl.290.

Сведения об авторе

Муха В.С., д.т.н., профессор, профессор кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Mukha V.S., D.Sci, Professor, Professor of Automated Data Processing Systems Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-23
e-mail: mukha@bsuir.by
Муха Владимир Степанович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus. Minsk,
P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-88-23
e-mail: mukha@bsuir.by
Mukha Vladimir Stepanovich

¹ Policymakers Summary. In: *Climate Change. The IPCC Scientific Assessment*. Published by the Press Syndicate of the University of Cambridge. First published 1990. – Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ipcc_far_wg_I_full_report.pdf.

² Summary for Policymakers. In: *IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. – Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf

³ *Climate skeptic*. – Available at: <http://www.climate-skeptic.com>

⁴ *Meteorological observations*. – Available at: <http://www.pogoda.by/meteoarchive>.

