

---

---

# ДОКЛАДЫ БГУИР

---

---

**Выходит два раза в квартал**

Научный журнал издается с января 2003 года

**Главный редактор М.П. Батура**

**Редакционная коллегия:**

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

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

**Редакционный совет:**

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

*АДРЕС РЕДАКЦИИ:*

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

doklady@bsuir.by

www.doklady.bsuir.by

**СОДЕРЖАНИЕ**

*ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА*

<b>Петровский А.А., Герасимович В.Ю.</b> Параметрический аудиокодер на основе разреженной аппроксимации с перцептуально-оптимизированным словарем частотно-временных функций.....	5
<b>Боровик А.М.</b> Исследование значимости параметров модели подвижности Дарвиша для описания токопереноса в наноразмерных МОП-транзисторах.....	12
<b>Гапоненко Н.В.</b> Мембраны пористого анодного оксида алюминия, содержащие ксерогель, для люминесценции и фотокатализа.....	18
<b>Бурко В.А., Долгая Я.В., Стемпицкий В.Р., Романовская Т.В.</b> Квантово-механическое моделирование механизмов взаимодействия фрагмента клеточной стенки бактерии с поверхностью кремния.....	23
<b>Печень Т.М., Прудник А.М.</b> Моделирование процесса взаимодействия электромагнитной волны оптического диапазона с кожей человека.....	28
<b>Пухир Г.А., Вилькоцкий М.А., Абукраа А.С. Абдулссалам, Насонова Н.В.</b> Радиопоглощающие конструкции на основе композиционных влагосодержащих волокнистых материалов растительного происхождения.....	34

<b>Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Тимофеев А.М., Косари А.Г.</b> Обнаружение несанкционированных пользователей квантового канала связи .....	41
<b>Рудикова Л.В.</b> Особенности архитектурной реализации системы визуализации и обработки результатов спектрального анализа.....	47
<b>Овсянников А.В.</b> Оценка информационной прогнозируемости стохастических процессов .....	54
<b>Боброва Н.Л.</b> Программно-аппаратный комплекс экспресс-диагностики психофизиологических показателей организма человека.....	61
<b>Соколов В.Б., Дробот С.В., Саванович С.Э.</b> Исследование взаимодействия электромагнитного излучения с материалами на основе хризотилловых асбестов .....	66
<b>Солонар А.С., Хмарский П.А.</b> Особенности применения методов дискретной фильтрации для задач сопровождения баллистических объектов, совершающих спиральный маневр .....	71
<b>Пинюта П.Ю., Бахтизин В.В.</b> Кооперационный метод планирования запросов в системах управления идентификационными данными.....	78
<b>Коваленко И.В., Поттосина С.А.</b> Использование многозначной логики в исследовании социально-экономических систем .....	84
<b>Заяц Е.Ю., Янушкевич В.Ф., Кременя К.И.</b> Взаимодействие импульсной волны с анизотропной неоднородностью плазмаподобного типа .....	91

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

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

---

Подписано в печать 16.02.2015. Формат 60×84 1/4. Гарнитура "Таймс". Бумага офсетная.  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 11,39. Уч.-изд. л. 9,5. Тираж 110 экз. Заказ 50.  
Индекс для индивидуальной подписки 00787.  
Индекс для ведомственной подписки 007872.

---

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

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

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2015

---

---

# DOKLADY BGUIR

---

---

**Published twice quarterly**

The journal has been published since January, 2003

**Editor-In-Chief M.P. Batura**

*ADDRESS OF EDITORIAL OFFICE*

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

*293-88-41*

*doklady@bsuir.by*

*www.doklady.bsuir.by*

## CONTENTS

### *ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS*

<b>Petrovsky A.I.A., Herasimovich V.Y.</b> Parametric audio coder based on sparse approximation with frame-based psychoacoustic optimized wavelet packet dictionary .....	5
<b>Borovik A.M.</b> Significance research of Darvish mobility model parameters for the charge transport description in nanoscale MOSFETS .....	12
<b>Gaponenko N.V.</b> Porous anodic alumina membranes with xerogel for luminescence and photocatalysis .....	18
<b>Burko V.V., Douhaya Y.V., Stempitsky V.R., Romanovskaja T.V.</b> Quantum-mechanical simulation of interaction mechanisms between fragment of bacteria cell wall and silicon surface .....	23
<b>Pechen T.M., Prudnik A.M.</b> The simulation of the electromagnetic waves interaction in the optical range with human skin .....	28
<b>Pukhir H.A., Vilkotskiy M.A., Aboukraa A.S. Abdulssalam, Nasonova N.V.</b> Radioabsorbing structures based on composite water-containing fiber materials of vegetation origin.....	34
<b>Gulakov I.R., Zenevich A.O., Timofeev A.M., Kosari A.G.</b> Detection of unauthorized users of quantum communication channel.....	41
<b>Rudikova L.V.</b> Architectural features of the imaging and treatment implementation of spectral analysis results .....	47
<b>Ausiannikau A.V.</b> Assessment of information predictability of stochastic processes .....	54
<b>Bobrova N.L.</b> Hardware-software express diagnostics complex of the human body psycho-physiological indicators.....	61
<b>Sokolov V.B., Drobot S.V., Savanovich S.E.</b> Study of electromagnetic radiation interaction with materials based on chrysotile asbestos .....	66
<b>Solonar A.S., Khmarski P.A.</b> Filtering features for tracking of spiraling reentry vehicles .....	71

<b>Piniuta P.Yu., Bakhtizin V.V.</b> Cooperative method of request planning in identity management systems .....	78
<b>Kovalenko I.V., Pottosina S.A.</b> The utilization of multivalued logic in socioeconomic systems research .....	84
<b>Zayats E.Yu., Yanushkevich V.F., Kremenya K.I.</b> Interaction of pulse wave with anisotropic environment of plasma like type .....	91

УДК 004.032.6

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АУДИОКОДЕР НА ОСНОВЕ РАЗРЕЖЕННОЙ АППРОКСИМАЦИИ С ПЕРЦЕПТУАЛЬНО-ОПТИМИЗИРОВАННЫМ СЛОВАРЕМ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ФУНКЦИЙ

Ал.А. ПЕТРОВСКИЙ, В.Ю. ГЕРАСИМОВИЧ

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

Поступила в редакцию 3 сентября 2014

Рассматривается метод частотно-временного преобразования сигналов, показывается преимущества совместного, частотно-временного анализа перед традиционным раздельным анализом во временной либо частотной областях. Описан алгоритм согласованной подгонки для декомпозиции сигнала в базис частотно-временных функций, а также модификация данного алгоритма с использованием принципов психоакустики для выбора наиболее важных для восприятия компонент аудиосигнала. Предлагается схема построения универсального аудиокодера на основе разреженной аппроксимации с перцептуально-оптимизированным словарем вейвлет коэффициентов.

*Ключевые слова:* частотно-временные преобразования, пакет дискретного вейвлет преобразования, согласованная подгонка, психоакустическая модель, аудиокодер.

### Введение

На текущем этапе развития алгоритмов сжатия аудиосигналов разработано большое количество кодеров, использующих различные особенности входного сигнала. В зависимости от выделяемых особенностей кодеры можно разделить на два класса: вокодеры, эффективно сжимающие речевой сигнал и позволяющие достичь низких скоростей передачи данных при сохранении высокого качества выходного сигнала; и аудиокодеры, алгоритмы которых нацелены на работу с таким типом входных сигналов, как музыка, звуки природы и тому подобное. В двух вышеприведенных классах кодеров разработано большое количество разнообразных реализаций, которые имеют свои плюсы и минусы, однако данная ситуация ставит в затруднительное положение при выборе определенного аудиокодера, или вокодера, для решения конкретной задачи. Во-первых, необходимо заранее знать, какой тип входного сигнала будет преобладать (речь или музыка), во-вторых, необходимо изучить все разнообразие представленных алгоритмов для того, чтобы выбрать наиболее эффективный из них. Естественной задачей, вытекающей из изложенной ситуации, является построение универсального аудиокодера, способного максимально эффективно работать со всеми известными типами звукового информационного наполнения.

С точки зрения обработки аудиосигналов кодеры можно разделить на две группы: кодеры на основе преобразования (transform coders), и параметрические кодеры (parametric coders) [1]. Суть кодеров на основе преобразования заключается в том, чтобы привести входные данные к той форме, в которой компоненты сигнала будут иметь минимальную корреляцию между собой, что позволит кодировать их независимо друг от друга. Для учета особенностей восприятия звука человеком и для уменьшения перцептуальной избыточности кодируемых данных в кодерах с преобразованием используется психоакустическая модель слуха человека. Основная идея параметрического кодирования – это параметризация аудиосигнала каким-либо способом для определения значений, которые описывают важные аспекты кодируемого аудиосигнала. Оба описанных выше подхода имеют свои достоинства и

недостатки и используются в таких широко распространенных кодеках, как MPEG-1 Layer 3 (MP3), Advanced Audio Coding (AAC) и подобные им [1]. Для построения универсального аудиокодера логично выбрать параметрический подход с некоторыми особенностями, взятыми из алгоритмов кодирования с преобразованием.

Использование параметрической модели кодирования позволит уменьшить количество информации, необходимое для описания и последующего восстановления сжимаемого сигнала, что в свою очередь даст ощутимое увеличение степени сжатия целевого сигнала (и уменьшения скорости битового потока). Для более эффективной обработки и параметризации входного сигнала можно также использовать психоакустическую модель, которая позволит исключить избыточную с точки зрения восприятия человеческим ухом информацию, тем самым уменьшая необходимое для передачи и восстановления сигнала количество параметров.

Параметризация сигнала может проводиться, как правило, либо во временной области, либо в частотной. Анализ сигнала во временной области позволяет получить некоторую информацию о его природе и характеристиках, но не дает никакой информации о его частотных свойствах. Решением задачи получения частотной информации о сигнале является переход в частотную область с помощью преобразования Фурье, однако оно не позволяет произвести многомасштабный анализ, т.е. точно определить временную локализацию той или иной частоты, что весьма существенно для нестационарных сигналов. Большинство окружающих нас сигналов являются нестационарными, т.е. такими, спектральные характеристики которых быстро изменяются во времени. Для работы с такими сигналами необходимо иметь совмещенную частотно-временную картину характеристик сигнала. Этот факт определяет выбор математического аппарата для параметризации входного сигнала аудиокодера: частотно-временные преобразования сигнала.

### Частотно-временные преобразования аудиосигнала

Частотно-временные преобразования подразумевают декомпозицию сигнала, то есть аппроксимацию сигнала частотно-временными функциями, полученными перемещением, модуляцией и масштабированием базисных функций, имеющих определенную временную и частотную локализацию.

Декомпозиция сигнала основана на алгоритме согласованной подгонки (matching pursuit – MP) со словарем частотно-временных функций. В данном подходе, любой сигнал  $x(t)$  представляется в виде линейной комбинации частотно-временных функций (называемых атомами)  $g_{\gamma_n}(t)$ , выбираемых из избыточного словаря  $D$ . Избыточный словарь в данном контексте обозначает тот факт, что он содержит намного больше элементов, нежели минимальное необходимое количество базисных функций, покрывающих данное пространство. Любой сигнал можно разложить с помощью алгоритма частотно-временной декомпозиции следующим образом [2]:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot g_{\gamma_n}(t), \text{ где } g_{\gamma_n}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_n}} g\left(\frac{t-p_n}{s_n}\right) \exp(j(2\pi f_n t + \varphi_n)), \text{ } a_n - \text{ масштабировующий}$$

коэффициент, который показывает вклад атома в формирование выходного сигнала.

В большинстве приложений, где используется алгоритм согласованной подгонки, словарь частотно-временных функций подбирается с учетом специфики сигналов. Масштабирующий коэффициент  $s_n$  служит для контроля ширины оконной функции, параметр  $p_n$  необходим для определения временного расположения функции. Параметры  $f_n$  и  $\varphi_n$  – соответственно, частота и фаза экспоненциальной функции.

Алгоритм согласованной подгонки является «жадным» алгоритмом и подразумевает поиск локально оптимальных решений с расчетом, что глобальное решение также будет оптимальным. Выбор аппроксимирующей функции из словаря заключается в поиске такой функции, которая дает максимальное значение скалярного произведения с фреймом анализируемого сигнала. После выбора функции необходимо вычесть ее вклад в формирование сигнала, что даст остаточный сигнал. Следующая итерация алгоритма производится над

найденным остаточным сигналом. В идеальном случае, остановка алгоритма происходит когда остаточный сигнал равен нулю. Однако, как правило, фиксируется количество исполняемых алгоритмом итераций, либо вводятся определенные энергетические пороги, при достижении которых алгоритм останавливает свою работу.

При использовании алгоритма согласованной подгонки стоит учитывать два основных взаимосвязанных фактора: выбор частотно-временных функций, формирующих словарь, и вычислительные затраты при работе алгоритма. Так как словарь должен быть избыточным, он может содержать большое множество различных базисных функций, однако, с другой стороны, чрезмерно объемный словарь увеличит время поиска подходящей функции. Следовательно, стоит вопрос о выборе оптимального словаря частотно-временных функций. Одним из наилучших вариантов является формирование словаря на основе анализируемого сигнала. Для этого необходимо выполнить разложение входного сигнала по вейвлет функциям определенного семейства. На основе данных функций формируется словарь атомов. Избыточный словарь можно сформировать, применив полное дерево пакетного дискретного вейвлет преобразования (ПДВП), как это показано на рис. 1 [3, 4].

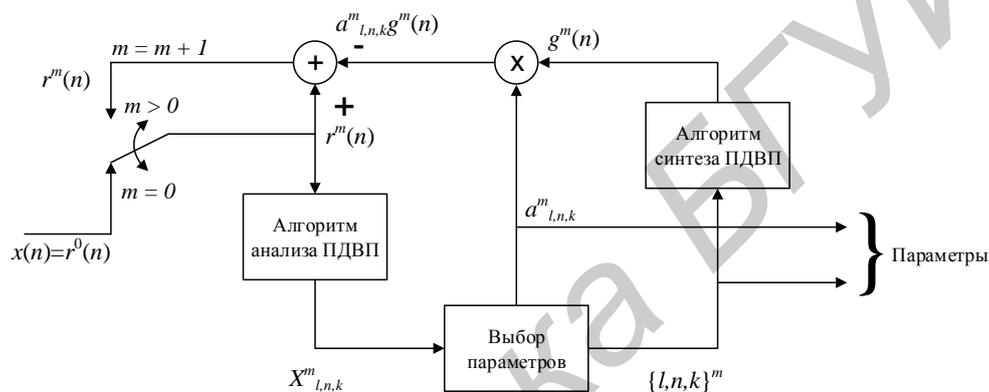


Рис. 1. Параметризация сигнала на основе полного дерева пакетного дискретного вейвлет преобразования

На рис. 1,  $x(n)$  – входной фрейм сигнала,  $r^m(n)$  – остаточный сигнал на итерации  $m$ ,  $X^m_{l,n,k}$  – вейвлет функция. Алгоритм работает по схеме «анализ через синтез» и заключается в итеративном повторении шести основных шагов.

Шаг 1. Декомпозиция сигнала-остатка (для первой итерации – это входной сигнал) полным деревом анализа ПДВП (блок алгоритм анализа ПДВП на рис. 1);

Шаг 2. Выбор наиболее значимого вейвлет-коэффициента  $X_\gamma$  – коэффициента с абсолютно максимальным значением весового коэффициента  $a_\gamma$ ;

Шаг 3. Наиболее значимому вейвлет-коэффициенту ставится в соответствие атом из словаря;

Шаг 4. Формирование результирующего вектора  $g^m_\gamma(n)$  декомпозиции выполняется при помощи обратного ПДВП преобразования (блок алгоритм синтеза ПДВП на рис. 1) на основе полного дерева;

Шаг 5. Получение результирующего сигнала, как умножение результирующего вектора  $g^m_\gamma(n)$  на весовой коэффициент  $a^m_\gamma$ ;

Шаг 6. Получение сигнала-остатка  $r^{m+1}(n)$  путем вычитания результирующего сигнала из остаточного сигнала  $r^m(n)$ .

Процесс повторяется, где для последующей итерации входным сигналом является сигнал-остаток, полученный из предыдущей итерации.

Использование частотно-временного преобразования на основе алгоритма согласованной подгонки со словарем частотно временных функций позволяет получить разреженную

аппроксимацию аудиосигналов, то есть, представление сигнала наименьшим количеством ненулевых элементов. Улучшить производительность алгоритма согласованной подгонки может перцептуальная оценка узлов дерева декомпозиции для каждого фрейма индивидуально. Это позволяет получить оптимальное дерево разложения ПДВП на каждом фрейме анализируемого сигнала, что, в свою очередь, позволит добиться минимизации словаря  $D$ .

### Алгоритм согласованной подгонки с применением психоакустической модели слуха человека

Минимизация словаря  $D$  реализуется в модифицированном алгоритме согласованной подгонки, где в алгоритм  $MP$  введена процедура расчета перцептуальной энтропии [5, 6].

Полное дерево ПДВП  $E_{full}$  содержит в себе множество структур  $E_j$ , которые представляют собой деревья с определенным набором узлов. Этот факт можно использовать для формирования структуры дерева декомпозиции, согласованное со шкалой барков (критическое дерево – рис. 2), что позволит производить расчет параметров психоакустической модели в вейвлет области [6].

Психоакустическая модель дает следующие возможности: расчет перцептуальной энтропии каждого узла дерева декомпозиции текущего фрейма для получения оптимального дерева (минимизация словаря  $D$ ), а также расчет порогов маскирования, что позволяет оценивать перцептуальную важность каждого найденного параметра.

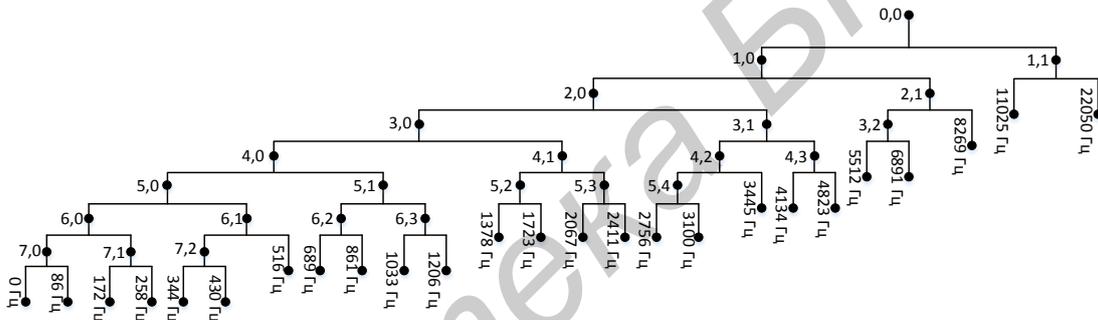


Рис. 2. Критическое дерево ПДВП, согласованное со шкалой барков

На рис. 3 отражено сравнение сходимостей алгоритма согласованной подгонки на основе трех различных словарей [5, 7]. Как видно из рис. 3, алгоритм согласованной подгонки со словарем перцептуально оптимизированных функций ПДВП обеспечивает наименьшее среднеквадратическое отклонение, по сравнению с алгоритмом согласованной подгонки на основе словаря с полным набором вейвлет-функций ПДВП или затухающих синусоид.

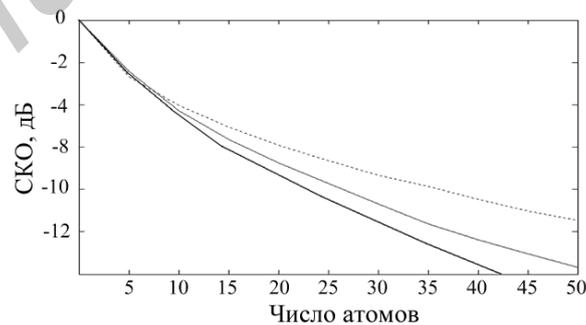


Рис. 3. Среднеквадратическое отклонение: затухающие синусоиды (пунктирная линия), вейвлет пакет с избыточным словарем (тонкая сплошная линия), вейвлет пакет, оптимизированный для каждого фрейма на основе психоакустики (толстая сплошная линия)

### Модель параметрического аудиокодера на основе разреженной аппроксимации с перцептуально-оптимизированным словарем частотно-временных функций

На современном этапе развития параметрических аудиокодеров можно выделить два основных подхода. Суть первого заключается в выделении из сигнала некоторых компонент,

сходных по своей природе, и их отдельный анализ. Достоинством такого подхода является то, что появляется возможность точно смоделировать входной сигнал и подобрать для каждой компоненты подходящий математический аппарат. Однако очевидными недостатками таких алгоритмов является привязка инструментов анализа компонент к типу сигнала (речь, музыка, смешанное содержимое). Также негативным моментом является то, что при анализе нескольких компонент индивидуально, появляется большое количество параметров, необходимых для синтеза сигнала декодером. Примером таких подходов могут служить модели «синусоидальная компонента-остаток (шум)», «синусоидальная компонента-транзиенты-остаток (шум)» [7]. Смысл второго подхода заключается в том, что сигнал параметризуется без выделения каких-либо компонент, что уменьшает количество передаваемых декодеру параметров. Ниже дано краткое описание трех аудиокодеров, основанных на алгоритме согласованной подгонки, проведен их анализ и сравнение.

Алгоритм кодирования, описанный в [8], производит декомпозицию сигнала на атомы, взятые из фиксированного, заранее предопределенного избыточного словаря. После получения параметров сигнала, происходит их обработка, а именно, перцептуальная оценка параметров с помощью анализа порогов маскирования каждой полученной частотно-временной функции. На этом этапе принимается финальное решение о важности каждого из параметров. Заключительным этапом работы кодера является квантование параметров и их упаковка для передачи.

Аналогичный вышеизложенному подход представлен в [9]. В данной работе проводится разреженная аппроксимация сигнала  $s$  следующим образом: инициализируется остаток  $r_0 = s$ , строится избыточный словарь на основе атомов Габора. Следующий после инициализации шаг – декомпозиция сигнала с помощью алгоритма *MP*. Выходом согласованной подгонки является набор параметров. Второй этап алгоритма кодирования – перцептуальная обработка найденных атомов. Для этого они упорядочиваются по убыванию амплитуды и к ним применяется модель маскирования. Те из них, которые ниже порога маскирования, удаляются из набора.

В отличие от вышеприведенных работ, в [10] представлен аудиокодер на основе разреженной аппроксимации, но выделяющий из сигнала элементы различной природы, и работающий с ними отдельно. В данном случае под элементами разной природы понимаются гармонические (синусоидальные) составляющие сигнала, транзиенты (кратковременные высокоэнергетические всплески), микротранзиенты (острые всплески низкоэнергетических транзиент), шумовая составляющая. Первые три элемента сигнала параметризируются на основе алгоритма согласованной подгонки с различными словарями для каждой из компонент. Моделирование шумовой составляющей реализовано на основе определения спектральной огибающей сигнала алгоритмом линейного предсказания (*LP*).

Подходы, описанные выше, имеют основной недостаток: словарь атомов является фиксированным, либо предопределенным для каждого сигнала, что не может являться оптимально эффективным в силу того, что тип сжимаемых данных может сильно отличаться в различных сигналах. Для решения этой проблемы можно использовать большее количество элементов в словаре, однако это приведет к резкому возрастанию времени поиска по словарю и увеличению вычислительных затрат. Также этот вариант может не дать эффективного решения в силу нестационарности реальных аудиосигналов и их большого разнообразия.

Анализируя вышесказанное можно выделить ряд требований, предъявляемых к разрабатываемому кодеру: масштабируемость, низкая скорость битового потока, высокое качество восстановленного сигнала. В качестве математической модели описания сигнала решено было выбрать модель разреженной аппроксимации сигнала. Данная модель позволяет описать входной аудиосигнал минимальным количеством параметров. В отличие от рассмотренных выше подходов, словарь атомов будет формироваться из самого сигнала для каждого входного фрейма индивидуально. Это позволит добиться максимальной гибкости и оптимальной эффективности алгоритма. Еще одним шагом оптимизации работы кодера будет являться тот факт, что словарь вейвлет коэффициентов будет формироваться на основе перцептуально-оптимизированного ПДВД вместо использования полного дерева декомпозиции. Это позволит исключить маскируемые компоненты, не воспринимаемые при прослушивании восстановленного аудиосигнала. Общая схема разрабатываемого кодера

представлена на рис. 4. Основу кодера составляют адаптивный ПДВП (область, отмеченная штриховкой) и блок подбора параметров (область, выделенная штрихпунктирной линией). В блоке адаптивного ПДВП для каждого фрейма сигнала выполняется подбор оптимальной структуры дерева. Параметры реконфигурации дерева рассчитываются на основе данных из блоков «Перцептуальная энтропия» и «Энтропия».

Блок подбора параметров отвечает за формирование параметров входного фрейма. Основу составляет блок «Согласованная подгонка», на вход которому поступают рассчитанная перцептуальная энтропия для каждого узла дерева и полученные в блоке «ПДВП» ветвь коэффициенты. На основе отобранных компонент выполняется синтез сигнала в блоке «Обратный ПДВП», который затем вычитается из сигнала. Остаточный сигнал анализируется в блоке «ПДВП» и весь процесс повторяется.

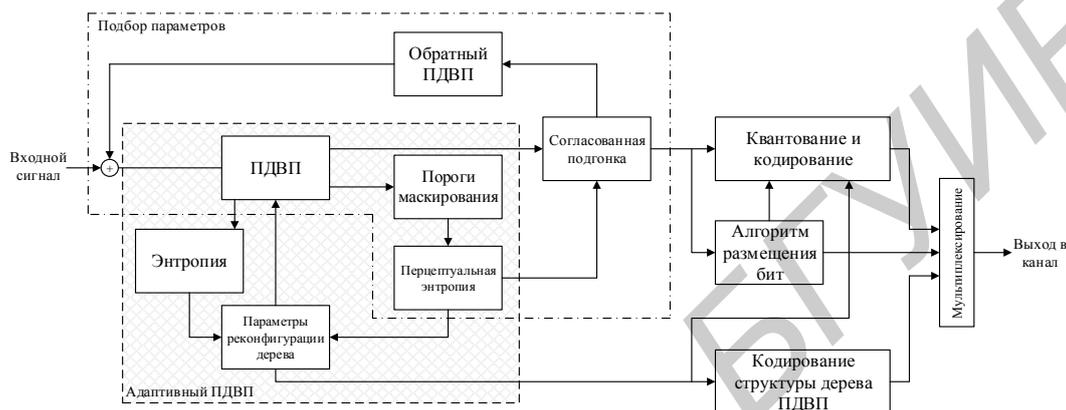


Рис. 4. Общая схема разрабатываемого аудиокодера

Отобранные параметры входного фрейма сигнала на последней стадии работы кодера квантуются, кодируется структура дерева ПДВП. Эта информация затем передается в канал. Работа декодера показана на рис. 5.

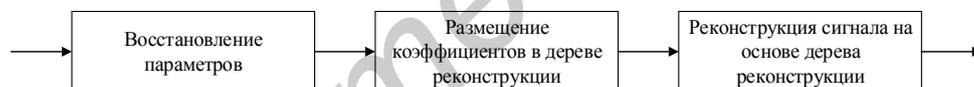


Рис. 5. Общая схема работы декодера

На стороне декодера принятая информация восстанавливается, затем декодированные параметры размещаются на соответствующие позиции в структуре дерева. Реконструкция сигнала выполняется на основе обратного ПДВП в соответствии со структурой полного дерева ПДВП.

Результаты экспериментальных исследований [3] параметрического аудиокодера на основе разреженной аппроксимации с перцептуально-оптимизированным словарем частотно-временных функций сведены в таблицу.

Оценки реконструированного сигнала параметрическим аудиокодером

Тестовый материал	MP3			AAC			Параметрический кодер		
	Степень сжатия	Субъективное отличие	MBSD	Степень сжатия	Субъективное отличие	MBSD	Степень сжатия	Субъективное отличие	MBSD
Rock	7,7	-0,2	1,45	9,5	-0,067	1,17	18,3	-0,3	1,55
Classic	16,6	-0,067	1,02	9,6	-0,2	1,32	20,2	-0,4	1,67
Pop	8,4	-0,045	1,13	11,5	-0,067	1,16	14,7	-0,2	1,34

### Заключение

Приведено краткое описание нескольких схем параметрических аудиокодеров и алгоритмов их работы, показаны особенности и недостатки. На основе этой информации

сформулировано направление исследования и разработки универсального масштабируемого аудиокодера. Дальнейшая работа должна заключаться в исследовании и обосновании выбора оптимального семейства вейвлет функций для декомпозиции входного сигнала на основе ПДВП, разработке эффективной схемы квантования полученных параметров сигнала и их упаковке, увеличению быстродействия и уменьшению вычислительных затрат алгоритма.

Стоит отметить, что выбранный математический аппарат позволяет решать некоторые другие задачи помимо сжатия: классификация аудиосигналов, защита информации (добавление «водяных знаков» в сигнал), конверсия голоса.

## **PARAMETRIC AUDIO CODER BASED ON SPARSE APPROXIMATION WITH FRAME-BASED PSYCHOACOUSTIC OPTIMIZED WAVELET PACKET DICTIONARY**

Al.A. PETROVSKY, V.Y. HERASIMOVICH

### **Abstract**

Time-frequency signal transform is considered. Advantages of joint time-frequency analysis over traditional separate analysis in time or frequency domains are shown. Matching pursuit algorithm and modified psychoacoustic matching pursuit is described. Universal audiocoder scheme based on sparse approximation with frame-based psychoacoustic optimized wavelet packet dictionary is proposed.

### **Список литературы**

1. *Painter T., Spanias A.* // Proceedings of the IEEE. 2000. Vol. 88, № 4. P. 451–513.
2. *Mallat S.G., Zhang Z.* // IEEE Transactions on signal processing. 1993. Vol. 41, № 12. P. 3397–3415.
3. *Petrovsky Al., Petrovsky A.* // Electronica. Konstrukcje, technologie, zastosowania. 2008. № 4. P. 74–80.
4. *Veras-Candeas V., Ruiz-Reyes N., Rosa-Zurera M, et. al.* // IEEE Proceedings on Vision, Image and Signal Processing. February, 2004. Vol. 151, Iss. 1. P. 21–28.
5. Анализаторы речевых и звуковых сигналов: методы, алгоритмы и практика. // Под ред. А.А Петровского. Минск, 2009.
6. *Петровский Ал.А.* // Речевые технологии. 2008. № 4. С. 61–71.
7. *Petrovsky Al., Azarov E., Petrovsky A.* // Elsevier, Signal Processing, Special Issue «Fourier Related Transforms for Non-Stationary Signals». June 2011. Vol. 91, Iss. 6. P. 1489–1504.
8. *Umapathy K., Ghoraani B., Krishnan S.* // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2010. Vol. 2010. P. 1–28.
9. *Gilles C., Thibaud N., Peter B.* // ICASSP. 2014. P. 3126–3130.
10. *Ruiz Reyes N., Vera Candeas P.* // IEEE Transactions on audio, speech and language processing. 2010. Vol. 18, № 3. P. 447–460.

УДК 621.382

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗНАЧИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОДВИЖНОСТИ ДАРВИША ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТОКОПЕРЕНОСА В НАНОРАЗМЕРНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРАХ

А.М. БОРОВИК

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

*Поступила в редакцию 22 июля 2014*

С использованием методики отсеивающих экспериментов определены наиболее значимые параметры модели подвижности Дарвиша. Показана возможность оптимизации диффузионно-дрейфовой модели с целью достижения адекватности результатов моделирования наноразмерных МОП-структур.

*Ключевые слова:* наноразмерный МОП-транзистор, компьютерное моделирование, отсеивающий эксперимент, модель подвижности Дарвиша.

### Введение

Принципиальными проблемами моделирования наноразмерных приборов являются возникающие в структуре полупроводниковых приборов новые, в том числе квантовые, эффекты, влияние которых возрастает с уменьшением геометрических размеров приборов, а также сложность одновременного обеспечения как высокой точности и достоверности результатов, так и приемлемой скорости моделирования.

Квантово-механические эффекты оказывают значительное влияние на пороговое напряжение и ток стока, так как вследствие их наличия изменяются плотность и распределение носителей в канале, а также поверхностный потенциал. Кроме того, модели, базирующиеся на квантовой механике, особенно те из них, которые реализуют подход полного квантового описания, отличаются требовательностью к вычислительным ресурсам, что делает их непригодными для исследований, требующих проведения большого количества компьютерных экспериментов [1–5].

Решение представленных проблем и противоречий заключается в оптимизации диффузионно-дрейфовой модели путем введения корректирующих коэффициентов к ее наиболее значимым параметрам с целью достижения адекватности моделирования наноразмерных МОП-структур, используя результаты натуральных экспериментов или более точного квантово-механического моделирования. В связи с этим возникает необходимость в определении наиболее значимых параметров диффузионно-дрейфовой модели, в частности модели подвижности Дарвиша.

### Модель подвижности Дарвиша

Модель подвижности Ломбарди [4], описывающая поведение носителей в инверсионных слоях и учитывающая снижение подвижности носителей заряда вследствие высокой степени их рассеяния на поверхности вблизи границы раздела полупроводник-диэлектрик, успешно используется при моделировании многих приборов микроэлектроники. Дарвишем была предложена улучшенная версия этой модели, в которой введены две модификации. Первая касается описания подвижности в объеме с использованием модели Клаасена, в которой учитываются эффекты кулоновского экранирования. Вторая модификация

связана с использованием нового выражения для описания эффекта шероховатости поверхности. Модель организована таким образом, чтобы можно было одновременно учитывать указанные эффекты [4, 6]. Ниже представлены соотношения модели Дарвиша для электронов.

$$\frac{1}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_b} + \frac{1}{\mu_{ac}} + \frac{1}{\mu_{sr}}, \quad (1)$$

где  $\mu_b$  – подвижность носителей в объеме,  $\mu_{ac}$  – вклад, обусловленный рассеянием на акустических фононах,  $\mu_{sr}$  – вклад, обусловленный шероховатостью поверхности.

Подвижность носителей в объеме определяется следующим образом:

$$\frac{1}{\mu_b} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_{DAP}}. \quad (2)$$

Компонента рассеяния носителей на решетке определяется следующим соотношением:

$$\mu_L = \mu_{max} \left( \frac{300}{T_L} \right)^0, \quad (3)$$

где  $T_L$  – температура кристаллической решетки.

Компонента рассеяния, обусловленная наличием примесей, определяется выражением:

$$\mu_{DAP} = \mu_N \frac{N_{nsc}}{N_{nsc,eff}} \left( \frac{N_{ref}}{N_{nsc}} \right)^{\alpha_1} + \mu_{nc} \left( \frac{n+p}{N_{nsc,eff}} \right). \quad (4)$$

Компонента рассеяния на примесных атомах определяется выражением:

$$\mu_N = \frac{\mu_{max}^2}{\mu_{max} - \mu_{min}} \left( \frac{T_L}{300} \right)^{(3\alpha_1 - 1.5)}. \quad (5)$$

Компонента рассеяния носителей на носителях определяется следующим выражением:

$$\mu_{nc} = \frac{\mu_{max} \cdot \mu_{min}}{\mu_{max} - \mu_{min}} \left( \frac{300}{T_L} \right)^{0.5}, \quad (6)$$

$$N_{nsc} = N_D + N_A + p, \quad (7)$$

где  $N_D$  – концентрация доноров,  $N_A$  – концентрация акцепторов,  $p$  – концентрация дырок.

$$N_{nsc,eff} = N_D + G(P)N_A + \left( \frac{p}{F(P)} \right). \quad (8)$$

Функции  $G(P)$  и  $F(P)$  фактора экранирования  $P$  определяются выражениями:

$$G(P) = 1 - \frac{S_1}{\left( S_2 + P \left( \frac{T_L / 300}{m_e} \right)^{S_4} \right)^{S_3}} + \frac{S_5}{\left( P \left( \frac{m_e}{T_L / 300} \right)^{S_7} \right)^{S_6}}, \quad (9)$$

$$F(P) = \frac{R_1 \cdot P^{R_6} + R_2 + R_3 \frac{m_e}{m_h}}{P^{R_6} + R_4 + R_5 \frac{m_e}{m_h}}, \quad (10)$$

где  $m_e$  – эффективная масса электрона,  $m_h$  – эффективная масса дырки.

Вклад, обусловленный шероховатостью поверхности, определяется следующей формулой:

$$\frac{1}{\mu_{sr}} = \frac{\left(\frac{E_{\perp}}{E_2}\right)^{\gamma}}{\delta}, \quad \gamma = A + \frac{\alpha(n+p)}{\left(\frac{N}{N_2}\right)^{\eta}}. \quad (11)$$

Здесь  $N$  – полная концентрация примесей ( $N_D+N_A$ ),  $N_2=1 \text{ см}^{-3}$ ,  $E_2=1 \text{ В/см}$ .

Вклад, обусловленный рассеянием на акустических фононах, определяется следующим образом:

$$\mu_{ac} = \left( \frac{B}{\left(\frac{E_{\perp}}{E_2}\right)^E} + \frac{C\left(\frac{N}{N_2}\right)^{\tau}}{\left(\frac{E_{\perp}}{E_2}\right)^D} \right) \frac{1}{T}, \quad T = (T_L / 300)^k. \quad (12)$$

Данная модель успешно используется при моделировании субмикронных приборов, однако должна быть адаптирована для моделирования наноразмерных приборов.

### Методика исследований

Известно, что для сложных процессов и зависимостей характерно то, что лишь небольшое количество факторов оказывает существенное влияние на выходные параметры изделия, воздействие остальных факторов малозначительно. Таким образом, при сравнительно большом числе факторов является разумным применение отсеивающих экспериментов с целью оценки значимости независимых переменных при изучении сложных процессов и исключения из рассмотрения тех из них, влияние которых на процесс несущественно, на начальной стадии экспериментального исследования, что позволяет существенно упростить изучение факторного пространства и описание поверхности отклика, а значит, сократить общий объем экспериментальных работ. Для такого эксперимента не предъявляются требования к точности полученных результатов, но зато предъявляются требования высокой разрешающей способности, т. е. проводится проверка на влияние как можно большего числа факторов [7–9].

Изначально формируется список факторов, влияющих на изучаемое явление, задаются ориентировочные пределы изменения факторов с учетом требований их совместимости [7]. При планировании отсеивающего эксперимента полный или дробный факторный анализ обычно применяется при необходимости проанализировать 2–4 фактора. Если анализируемых факторов больше 5, то используются дробный факторный план эксперимента или план Плакетта-Бермана [8, 9]. Плакетт и Берман показали, что полная факторная модель может быть разбита так, чтобы получить насыщенные планы, в которых число опытов кратно 4, а не степени 2. Такие планы иногда называют планами с матрицей Адамара. Они являются насыщенными, поскольку вся информация в них используется для оценки параметров, не оставляя степеней свободы для оценки эффекта ошибок. Общее число опытов должно быть не меньше числа исследуемых факторов. План Плакетта-Бермана позволяет тестировать наибольшее число главных эффектов при наименьшем числе наблюдений [9, 10]. Пример подобного плана отсеивающего эксперимента представлен в виде табл. 1.

Таблица 1. План Плакетта-Бермана для 7 факторов

№ эксперимента	Факторы							Значение выходного параметра
	1	2	3	4	5	6	7	
1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	$R_1$
2	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	$R_2$
3	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	$R_3$
4	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	$R_4$
5	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	$R_5$
6	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	$R_6$
7	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	$R_7$
8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	$R_8$

Все факторы при проведении отсеивающего эксперимента варьируются на двух уровнях с одинаковым разбросом значений относительно исходного. Комбинация уровней факторов определяется «матрицей планирования». В этой таблице «+1» означает, что фактор берется на верхнем уровне, «-1» – на нижнем. В каждом конкретном опыте уровни факторов выбираются так, чтобы матрица планирования обладала следующими свойствами: сумма чисел в каждом столбце равнялась нулю и сумма произведений элементов, относящихся к одному опыту, для двух любых столбцов равнялась нулю, т. е. если  $X_{ji}$  – элемент матрицы в  $i$ -й строке в  $j$ -м столбце,  $n$  – число опытов, то должны выполняться соотношения (13) и (14) [7].

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 0, \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} X_{ik} = 0, \quad j \neq k. \quad (14)$$

После выполнения отсеивающего эксперимента согласно плану Плакетта-Бермана проводится математическая обработка и анализ ее результатов. Для этого в соответствии с формулой (15) вычисляется величина  $\Delta_j$ :

$$\Delta_j = \left| \sum_{i=1}^n X_{ij} R_i \right|. \quad (15)$$

Факторы, для которых данная величина имеет наибольшее значение, и оказывают наибольшее влияние на исследуемую выходную характеристику.

## Результаты

Количество параметров модели подвижности Дарвиша, участвующих в описании процессов транспорта электронов и доступных для варьирования при использовании программного комплекса компании Silvaco, равно 33, что является чересчур большим для дальнейшего рассмотрения [4]. В связи с этим возникает необходимость применения отсеивающих экспериментов. Одновременно рассматривается влияние размеров структуры на значимость параметров. Для исследования значимости параметров модели был сформирован план Плакетта-Бермана для 33 факторов, включающий 36 экспериментов. Все факторы варьируются на двух уровнях с одинаковым разбросом значений относительно исходного значения – 20%. Исследования на значимость параметров проводились для МОП-структур с длиной канала  $L$ , составляющей 20, 40, 60, 80, 100 нм. В табл. 2 и 3 представлены результаты проведения отсеивающих экспериментов, полученные в соответствии с методикой анализа, описанной ранее. Обозначения параметров соответствуют используемым в программном комплексе Silvaco.

Таблица 2. Результаты отсеивающих экспериментов по влиянию на ток стока

Vзи, В	Наиболее значимые параметры по влиянию на ток стока				
	$L = 20$ нм	$L = 40$ нм	$L = 60$ нм	$L = 80$ нм	$L = 100$ нм
0,1	$A, D, \alpha_1, E$	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \mu_{\max}$	$A, D, E, \mu_{\max}$	$A, D, E, \mu_{\max}$
0,2	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \mu_{\max}$	$A, D, E, \mu_{\max}$	$A, D, E, \mu_{\max}$
0,3	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \mu_{\max}$	$A, D, E, \mu_{\max}$	$A, D, E, \mu_{\max}$
0,4	$A, D, \alpha_1, E$	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \mu_{\max}$	$A, D, E, \mu_{\max}$
0,5	$A, D, \alpha_1, \mu_{\min}$	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \alpha_1$
0,6	$A, D, \alpha_1, \mu_{\min}$	$A, D, \alpha_1, E$	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \alpha_1$
0,7		$A, D, \alpha_1, E$	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \alpha_1$
0,8			$A, D, \alpha_1, E$	$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \alpha_1$
0,9				$A, D, E, \alpha_1$	$A, D, E, \alpha_1$

Таблица 3. Наиболее значимые параметры по влиянию на пороговое напряжение

Длина канала	20 нм	40 нм	60 нм	80 нм	100 нм
Параметры	$A, S_1, \mu_{\min}, \alpha_1$	$A, S_1, \alpha_1, \mu_{\min}$	$A, \alpha_1, \mu_{\min}, S_1$	$A, \alpha_1, \mu_{\min}, S_1$	$A, \alpha_1, \mu_{\min}, S_1$

В соответствии с полученными результатами отсеивающих экспериментов наибольшее влияние на пороговое напряжение и ток стока наноразмерных МОП-транзисторов оказывают параметры  $A$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $S_1$ ,  $\alpha_1$ ,  $\mu_{\min}$ ,  $\mu_{\max}$ , особенно  $A$ . Однако степень их влияния существенно зависит от размеров приборов и рассматриваемого участка вольтамперной характеристики. На рис. 1–3 представлены вольтамперные характеристики зависимости плотности тока стока от напряжения на затворе, демонстрирующие различия в степени влияния одного и того же параметра на результаты при изменении длины канала.

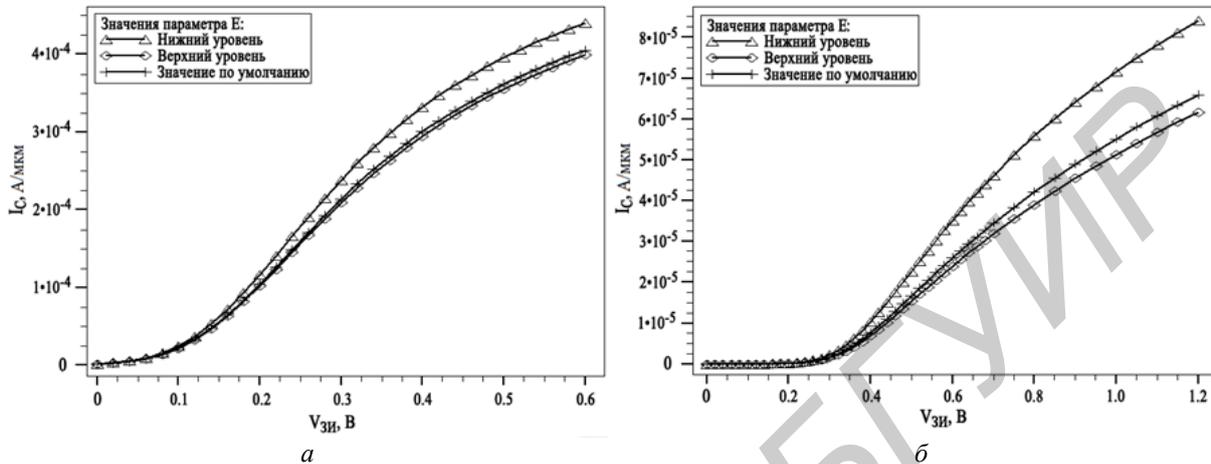


Рис. 1. Вольтамперные характеристики МОП-транзисторов с длиной канала 20 нм (а) и 100 нм (б) при различных значениях параметра  $E$

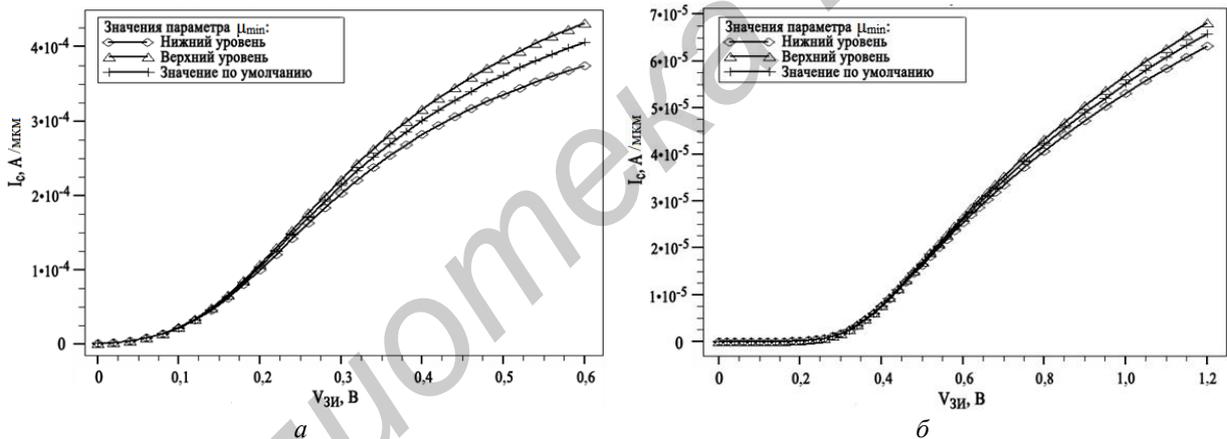


Рис. 2. Вольтамперные характеристики МОП-транзисторов с длиной канала 20 нм (а) и 100 нм (б) при различных значениях параметра  $\mu_{\min}$

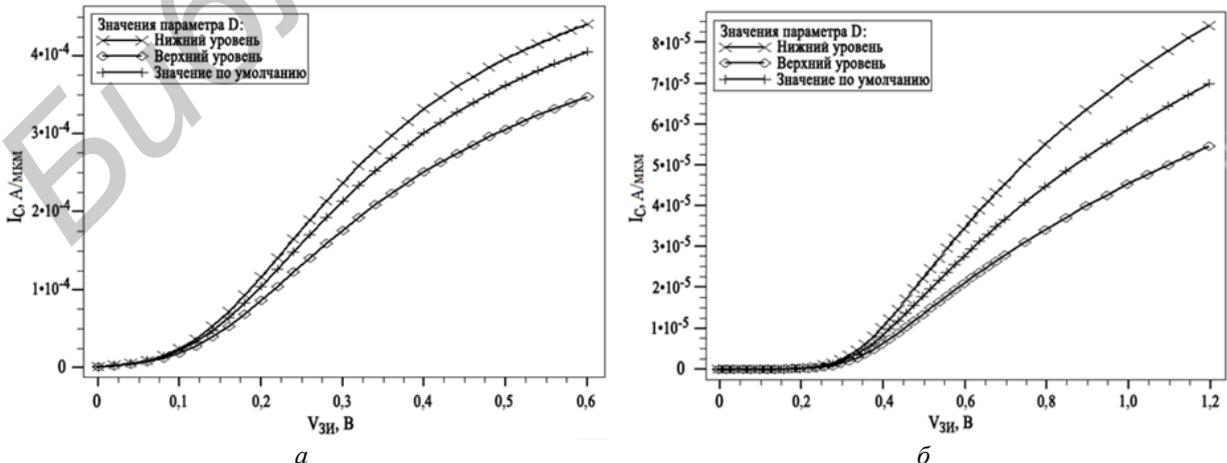


Рис. 3. Вольтамперные характеристики МОП-транзисторов с длиной канала 20 нм (а) и 100 нм (б) при различных значениях параметра  $D$

Таким образом, очевидна высокая степень влияния параметров модели Дарвиша на результаты моделирования процессов транспорта носителей заряда. Высокая чувствительность вольтамперных характеристик на изменения отдельных параметров диффузионно-дрейфовой модели способствует осуществлению дальнейшей ее оптимизации для нанометровых проектных норм.

### Заключение

Предложен новый подход расчета электрических характеристик наноразмерных МОП-транзисторов, сущность которого заключается в использовании корректирующих коэффициентов, а также таких значений параметров классических диффузионно-дрейфовых моделей, применяемых в стандартных комплексах приборно-технологического моделирования субмикронных приборов (например, компаний Silvaco и Synopsys) при описании физических механизмов транспорта носителей заряда, которые бы эффективно учитывали квантово-механические механизмы транспорта, характерные для наноразмерных приборов.

Посредством проведения компьютерных отсеивающих экспериментов определены наиболее значимые относительно влияния на пороговое напряжение и ток стока параметры модели подвижности Дарвиша диффузионно-дрейфовой модели, а именно  $A$ ,  $D$ ,  $S_1$ ,  $\alpha_1$ ,  $\mu_{\min}$ ,  $E$ .

## SIGNIFICANCE RESEARCH OF DARVISH MOBILITY MODEL PARAMETERS FOR THE CHARGE TRANSPORT DESCRIPTION IN NANOSCALE MOSFETS

A.M. BOROVIK

### Abstract

Using the methodology of screening experiments the most significant parameters of the Darwish mobility model are identified. The possibility of optimizing the drift-diffusion model in order to achieve the adequacy of the simulation results of nanoscale MOS structures is shown.

### Список литературы

1. Денисенко В.В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике. М., 2010.
2. Carlo de Falco. Quantum corrected drift-diffusion models and numerical simulation of nanoscale semiconductor devices: Ph.D. Thesis. Milan, 2006.
3. Iannaccone G. G., Curatola A., Fiori G. // SISPAD. 2004. P. 275–278.
4. ATLAS User's Manual. Device simulation software. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: atlas\_users.pdf. – Дата доступа: 01.09.2014.
5. Watling J. R., Brown A. R., Asenov A. // Journal of Computational Electronics. 2002. P. 289–293.
6. Darwish M., Lentz J.L., Pinto M.R. et al // IEEE Trans. Electron Devices. 1997. Vol. 44 (9). P. 1529–1538.
7. Луизова Л.А. От постановки задачи до принятия решения. Петрозаводск, 2002.
8. Engineering Statistics Handbook. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm>. – Дата доступа: 01.09.2014.
9. Plackett R. L., Burman J. P. // Biometrika. 1946. Vol. 33. P. 305–325.
10. StatSoft. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>. – Дата доступа: 01.09.2014.

УДК 66.087.3+666.265

## МЕМБРАНЫ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, СОДЕРЖАЩИЕ КСЕРОГЕЛЬ, ДЛЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ФОТОКАТАЛИЗА

Н.В. ГАПОНЕНКО

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

*Поступила в редакцию 29 декабря 2014*

Приведена методика синтеза мембраны пористого анодного оксида алюминия, содержащей аморфный ксерогель, соответствующий составу титаната стронция. Мембрана приготовлена в электролите щавелевой кислоты и демонстрирует интенсивную синюю фотолюминесценцию с широкой полосой с максимумом около 400 нм после термообработки при температуре 700 °С как с ксерогелем, так и без него. Обсуждается возможное влияние кислородных вакансий в структурах мембрана/ксерогель на их люминесценцию и фотокаталитическую активность.

*Ключевые слова:* золь-гель, титанат стронция, люминесценция, фотокатализ.

### Введение

Пористый анодный оксид алюминия (ПАОА), представляющий собой пленочную ячеистую структуру с вертикальными каналами пор, привлекает внимание исследователей различных направлений [1–3]. Контролируемое изменение периода структуры и диаметра пор, а также материала, заполняющего пористый объем, обеспечивает возможность модифицировать ряд физико-химических свойств мембран и пленочных структур на основе ПАОА [4, 5]. Многократное рассеяние электромагнитного излучения ансамблем упорядоченных цилиндров пористого анодного оксида алюминия приводит к фильтрации излучения, проходящего через мембрану или пленку ПАОА, выращенную на прозрачной подложке кварца, и появлению отрезающей коротковолновой границы, характерной для рассеивающих дисперсионных фильтров [6, 7]. Многократное рассеяние излучения может быть одним из факторов усиления люминесценции тербия и европия в структурах ксерогель/пористый анодный оксид алюминия, что подтверждается появлением дополнительной полосы в спектре возбуждения люминесценции лантаноидов [8]. Известно, что наряду с люминесценцией материалов, синтезированных в пористых матрицах, пористый анодный оксид алюминия, выращенный в определенных условиях, также демонстрирует интенсивную фото- и хемилюминесценцию в видимом диапазоне [9–12]. О природе этих центров люминесценции до сих пор ведутся дискуссии, и практическое использование люминесцентных материалов на его основе требует дальнейшего изучения физико-химических закономерностей синтеза и оптических свойств структур на основе пористого анодного оксида алюминия. Недостаточно изучено влияние полимеров и ксерогелей на собственную люминесценцию ПАОА.

В работе приводятся результаты синтеза и исследования оптических свойств мембраны ПАОА, содержащей ксерогель титаната стронция. Композиты оксида титана, легированные стронцием и тербием, синтезированные золь-гель методом (ксерогели) в пористом анодном оксиде алюминия, демонстрируют фото-, катодо- и радиолюминесценцию тербия [13]. Контролируемый синтез ксерогелей в высокоупорядоченном пористом анодном оксиде алюминия позволит в дальнейшем целенаправленно модифицировать наблюдаемую ранее анизотропию плотности фотонных состояний с максимальным распределением излучения вдоль каналов пор [14, 15].

## Методика эксперимента

Проведенные ранее исследования показали, что наиболее упорядоченная структура пленок пористого анодного оксида алюминия толщиной 0,5–150 мкм получается из электролитов на основе серной, ортофосфорной и щавелевой кислот с размером пор 20–120 нм и диаметром ячейки 45–250 нм. Мембрану пористого анодного оксида алюминия получали из алюминия А99 размером 2×2 см, который подвергался двухстадийному анодированию для формирования более упорядоченной структуры. Перед анодированием алюминиевую фольгу обезжиривали в хромовой смеси, затем полировали химически в растворе:  $\text{HNO}_3$  (65 %) – 70 мл,  $\text{H}_3\text{PO}_3$  (80 %) – 780 мл,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (98 %) – 150 мл,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  – 5,0 г при температуре 95 °С в течение 1–1,5 мин. После промывки и сушки образцы полировали электрохимически в смеси этанола и  $\text{HClO}_4$  (5:1) при  $T \leq 15$  °С и плотности тока 250 мА/см<sup>2</sup> в течение 1–2 мин.

Для формирования структуры мембрана/ксерогель требуется изготовление мембраны, обладающей определенной прочностью. Это требование обусловлено деформацией мембраны в процессе термообработки при усадке геля и ксерогеля, заполнившего пористый объем матрицы. Поэтому было предложено для анодирования использовать щавелевокислый электролит, а мембрану готовить для двухстороннего нанесения ксерогеля. Получение мембраны ПАОА анодированием проводили в щавелевокислом электролите 0,3 моль/л при напряжении 80 В и температуре 10–12 °С. Полученный в процессе первой стадии анодирования анодный оксид алюминия толщиной 10–15 мкм удаляли в растворе на основе ортофосфорной кислоты (30 %) и хромового ангидрида (10 %) при температуре 60–95 °С, в результате чего формируется упорядоченная нанотекстурированная поверхность алюминия, которая использовалась для второго анодирования.

После получения достаточной толщины анодной пленки в процессе второй стадии анодирования проводилось утонение барьерного слоя оксида алюминия в донной части структуры между оксидом алюминия и алюминиевой подложкой. Остатки алюминиевой фольги удалялись травлением в растворе на основе соляной кислоты (15 %) и хлорной меди (0,5 %). Далее проводилось химическое удаление барьерного слоя анодного оксида алюминия травлением в 5 %  $\text{H}_3\text{PO}_4$  при 35 °С в течение 20 мин, промывка в проточной дистиллированной воде в течение 2 мин и сушка при 110 °С в течение 15 мин.

Синтезированные мембраны использовались для формирования в них ксерогеля титаната стронция, легированного тербием,  $\text{SrTiO}_3:\text{Tb}$ . Для синтеза золя использовали изопропоксид титана,  $\text{Ti}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4$ , уксуснокислые соли стронция ( $\text{Sr}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) и тербия ( $\text{Tb}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot 4,6\text{H}_2\text{O}$ ), ацетилацетон и воду. Золи наносили методом центрифугирования на мембрану ПАОА со скоростью 1500 об/мин. На каждую сторону мембраны было нанесено по 5 слоев. После нанесения каждого слоя  $\text{SrTiO}_3:\text{Tb}$  образец подвергался предварительной обработке при температуре 100 °С в течение 10 мин. Затем образец прошел высокотемпературную обработку при 700 °С в течение 60 мин, скорость нагрева составила 3,3 °С/мин. Спектры люминесценции регистрировались на спектрофлуориметре Solar 2203. Для регистрации индикатрис рассеяния использовался неодимовый лазер с длиной волны излучения 531 нм [15].

## Результаты и их обсуждение

Опыт работы с описанными выше и полученными ранее мембранами позволяет заключить, что пропитка мембран золями и гелями с последующей термообработкой, переводящей гель в твердотельный материал (ксерогель), повышает их прочность. Улучшение прочности мембранных структур актуально для их возможного применения как для оптического дизайна, так и фотокаталитической очистки воды и воздуха [16]. При этом влияние зелей, гелей и ксерогелей на люминесценцию мембран, пропускание и рассеяние света практически не изучено, несмотря на установление интенсивной люминесценции лантаноидов в структурах ксерогель/пористый анодный оксид алюминия с анизотропной индикатрисой люминесценции с максимумом вдоль каналов пор [15].

На рис. 1 приведены РЭМ-изображения мембраны. Средний диаметр пор составляет 60–70 нм при диаметре ячейки около 140 нм. Толщина мембраны составляет около 100 мкм.

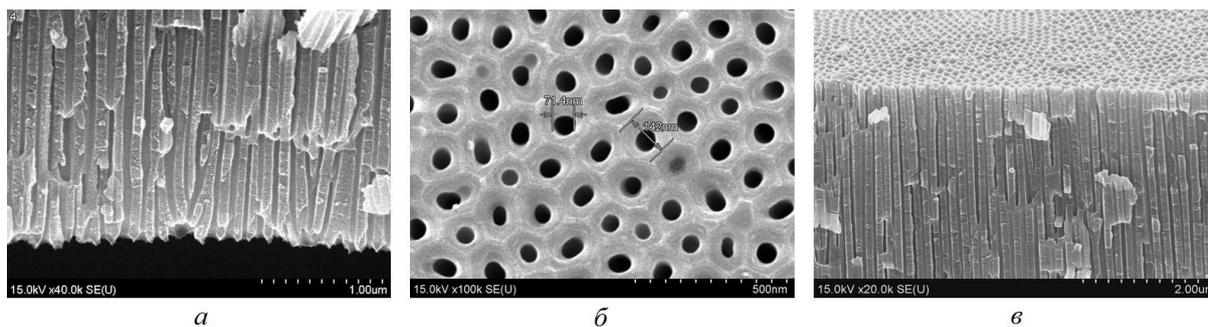


Рис. 1. Микрофотографии мембраны ПАОА: *а* – после травления барьерного слоя; *б* – изображение поверхности; *в* – скол

После формирования ксерогеля цвет мембраны изменился от прозрачно-желтого до бледно-мутного, сохраняя визуальную однородность (рис. 2). Край мембраны незначительно изогнулся, скорее всего, за счет усадки геля при термообработке. Дальнейшая термообработка при температуре 750 °С приводит к большому изгибу мембраны, приподнимая край мембраны на высоту до 4 мм.

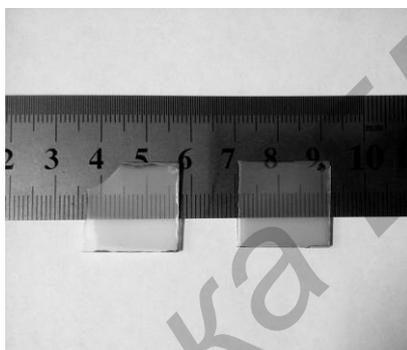


Рис. 2. Внешний вид мембраны пористого анодного оксида алюминия: *а* – после формирования ксерогеля титаната стронция и термообработки при температуре 700 °С длительностью 1 ч; *б* – исходная мембрана без ксерогеля и отжига

Следует обратить внимание, что деформированный и плоский участки мембраны демонстрируют неодинаковое рассеяние – рис. 3. При облучении мембраны со стороны выпуклого участка интегральная интенсивность рассеяния меньше, чем для плоского участка, что может быть связано с увеличением отражения падающего лазерного луча для выпуклого участка.

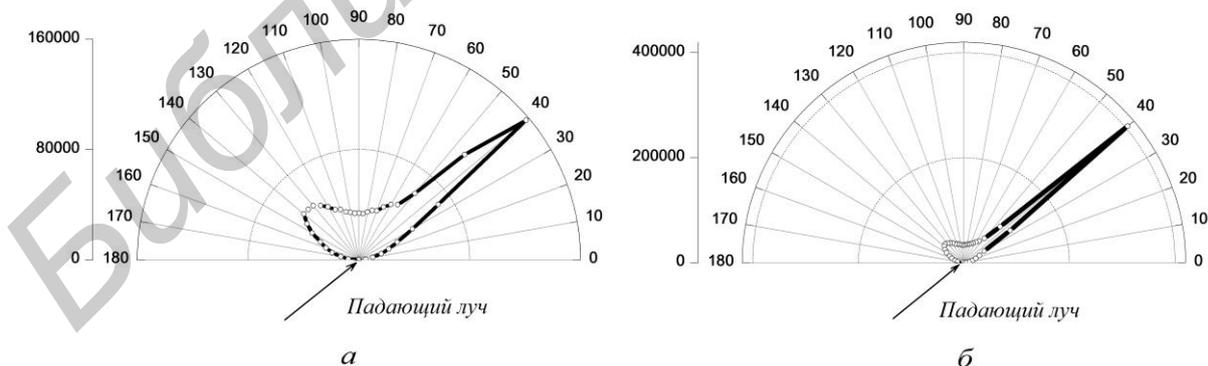


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния мембраны ПАОА: *а* – плоский участок, *б* – выпуклый участок, содержащий ксерогель титаната стронция, после термообработки при температуре 700 °С длительностью 1 час

Для исходной мембраны и мембраны, содержащей ксерогель титаната стронция, зарегистрированы спектры фотолуминесценции (рис. 4).

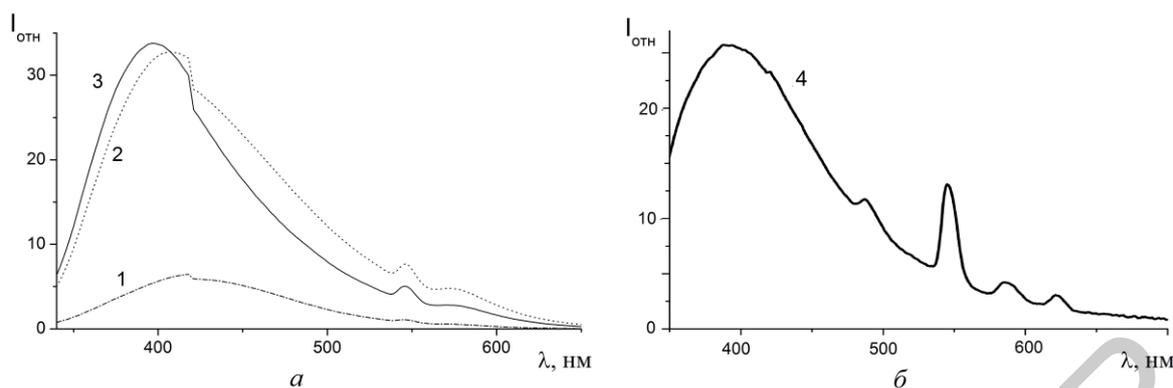


Рис. 4. Спектры люминесценции мембран ПАОА для длины волны возбуждения 280 нм, прошедших термообработку при 700 °С (а) и 750 °С (б) в течение 60 мин: 1 – исходная мембрана; 2 – исходная мембрана после термообработки; 3, 4 – мембрана с ксерогелем после термообработки

Люминесценция в синем диапазоне мембран ПАОА, приготовленных в растворе щавелевой кислоты, наблюдалась авторами [9], причем максимальная интенсивность достигалась при температуре 500 °С, после чего повышение температуры отжига приводило к уменьшению интенсивности. При этом образцы демонстрировали наличие однократно ионизированных кислородных вакансий ( $F^+$ -центров) по данным ЭПР-спектроскопии. Наблюдаемую зависимость интенсивности ФЛ авторы объясняют диффузией кислорода из воздуха в мембрану и окислением оставшегося алюминия, что в итоге повышает концентрацию  $F^+$ -центров в мембране. При увеличении температуры отжига наступает снижение кислородных вакансий и спад люминесценции. Люминесценцию, которую ассоциировали с наличием  $F^+$ -центров, наблюдали также в керамическом материале  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , причем термолюминесценция в этих материалах используется для детектирования ионизирующего излучения [17].

Можно предположить, что при упрочнении мембраны ксерогелем титаната стронция (см. рис. 2) кислородные вакансии, ответственные за синюю люминесценцию мембраны, сохраняются после отжига при температуре 700 °С. Дополнительным подтверждением наличия кислородных вакансий может быть сравнительно слабая фотокаталитическая активность структур мембрана/ксерогель диоксида титана, если мембрана приготовлена в электролите щавелевой кислоты [16]. Известно, что неравновесные носители – электроны и дырки, генерируемые при облучении пористого диоксида титана, участвуют в окислительно-восстановительных реакциях, что обеспечивает деструкцию вредных органических соединений в водных растворах [18]. Фотокаталитическая активность пористого ксерогеля диоксида титана, сформированного в мембране ПАОА, приготовленной из щавелевокислого электролита, значительно ниже, чем в пленке ПАОА, приготовленной в электролите ортофосфорной кислоты [16]. Возможно, одним из факторов снижения фотокаталитической активности является рекомбинация неравновесных носителей диоксида титана на  $F^+$ -центрах в мембране ПАОА, приготовленной в щавелевокислом электролите, что уменьшает их концентрацию в валентной зоне и зоне проводимости диоксида титана.

Анализ методом рентгеновской дифракции показал, что после термообработки при температуре 700 °С ксерогель титаната стронция в ПАОА является аморфным. Дополнительные уровни энергии в аморфной матрице, а также уровни кислородных вакансий в мембране ПАОА могут быть каналами безызлучательной релаксации трехвалентного тербия с уровнями возбужденных состояний  $^5D_4$  и  $^5D_3$ , что и объясняет отсутствие полос люминесценции тербия в синтезированной мембране после термообработки при температуре 700 °С. Увеличение температуры термообработки до 750 °С приводит к появлению полос люминесценции в длинноволновой части спектра с наиболее интенсивной полосой 545 нм, которые соответствуют термам трехвалентного тербия (рис. 4, б). Отметим, что пленка ксерогеля, сформированная из аналогичного золя на монокристаллическом кремнии, после термообработки при температуре 750 °С, является поликристаллической [19].

## Заключение

Проведен золь-гель синтез титаната стронция в мембране пористого анодного оксида алюминия, полученной в электролите щавелевой кислоты. При температуре термообработки 700–750 °С наблюдается деформация мембраны, содержащей ксерогель. Структура мембрана/ксерогель сохраняет интенсивную ФЛ с максимумом 400 нм после термообработки, которая наблюдалась и после отжига мембраны, не содержащей ксерогель. Наличие F<sup>+</sup>-центров, которые могут быть ответственны за синюю люминесценцию, следует учитывать при формировании фотокаталитически активных мезопористых структур ксерогель/мембрана при использовании электролита щавелевой кислоты. Возможно, более эффективные фотокаталитические структуры ксерогель/мембрана ПАОА могут быть получены в электролитах, не вызывающих синюю ФЛ мембраны ПАОА.

*Автор выражает благодарность Т.Ф. Райчонок, С.Я. Прислпскому, Т.И. Ореховской, Х.А. Сохраби и Л.С. Хорошко за помощь при получении экспериментальных результатов.*

## POROUS ANODIC ALUMINA MEMBRANES WITH XEROGEL FOR LUMINESCENCE AND PHOTOCATALYSIS

N.V. GAPONENKO

### Abstract

The method of synthesis of porous anodic alumina membrane with amorphous xerogel corresponding to chemical content of SrTiO<sub>3</sub> is reported. The membrane was prepared in oxalic acid electrolyte and revealed intensive blue photoluminescence with a broad band at 400 nm after heat treatment at 700 °C either with or without xerogel. Possible influence of oxygen vacancies in the structures membrane/xerogel on their luminescence and photocatalytic activity is reported.

### Список литературы

1. *Лыньков Л.М., Мухуров Н.И.* Микроструктуры на основе анодной алюмооксидной технологии. Минск, 2002.
2. *Позняк А.А.* Модифицированный пористый анодный оксид алюминия и композитные материалы на его основе. Минск, 2007.
3. *Сокол В.А.* Анодные оксиды алюминия. Минск, 2011.
4. *Гапоненко Н.В.* Пленки, сформированные золь-гель методом на полупроводниках и в мезопористых матрицах. Минск, 2003.
5. *Shingubara S.* // J. of Nanoparticle Research. 2003. Vol. 5. P. 17–30.
6. *Борисевич Н.А., Верещагин В.Г., Валидов М.А.* Инфракрасные фильтры. Минск, 1971.
7. *Верещагин В.Г., Дынич Р.А., Понявина А.Н.* // Оптика и спектроскопия. 1999. Т. 87. №1. С. 126–131
8. *Гапоненко Н.В., Молчан И.С., Гапоненко С.В. и др.* // Журнал прикладной спектроскопии. 2003. Т. 70, № 1. С. 57–61
9. *Du Y., Cai W.L., Mo C.M. et. al.* // Applied Physics Letters. 1999. Vol. 74, № 20. P. 2951–2953.
10. *Belca I., Kasalica B., Zekovic Lj. et. al.* // Electrochimica Acta. 1999. Vol. 45. P. 993–996.
11. *Wu J.H., Wu X.L., Tang N. et. al.* // Appl. Phys. A. 2001. Vol. 72. P. 735–737.
12. *Vrublevsky I., Chernyakova K., Ispas A. et. al.* // J. of Luminescence. 2011. Vol. 131. P. 938–942.
13. *Gaponenko N.V., Kortov V.S., Rudenko M.V. et. al.* // J. of Applied Physics. 2012. Vol. 111. P. 103101.
14. *Masuda H., Ohya M., Ason H. et. al.* // Japan. J. Appl. Phys. 1999. Vol. 38, Part 2, № 12 A P. L1403–L1405.
15. *Lutich A. A., Gaponenko S. V., Gaponenko N. V. et. al.* // Nano Lett. 2004. Vol. 4, № 9. P. 1755–1758.
16. *Linnik O., Smirnova N., Zhukovskiy M. et. al.* // Adv. Sci. Eng. Med. 2013. Vol. 5, № 4. P. 371–376.
17. *Кортв В.С., Мильман И.И., Никифоров С.В. и др.* // Физика твердого тела. 2004. Т. 46, Вып 12. С. 2143–2147.
18. *Poznyak S.K., Talapin D.V., Kulak A.I.* // J. Phys. Chem. B. 2001. Vol. 105. P. 4816–4823.
19. *Сохраби Анараки Х., Гапоненко Н.В., Руденко М.В. и др.* // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48, вып. 12. С. 1724–1726.

УДК 577.322:539.196.3

## КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФРАГМЕНТА КЛЕТОЧНОЙ СТЕНКИ БАКТЕРИИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ КРЕМНИЯ

В.А. БУРКО, Я.В. ДОЛГАЯ, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ, Т.В. РОМАНОВСКАЯ\*

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

\*Институт микробиологии НАН Беларуси

Поступила в редакцию 25 июня 2014

Представлены результаты исследования механизмов взаимодействия между фрагментом клеточной стенки бактерии и поверхностью кремния посредством проведения компьютерного моделирования с использованием квантово-механических методов. Рассмотрены механизмы взаимодействия O-Si, O-H-Si, где кислород принадлежит биомолекуле, а водород и кремний – подложке.

*Ключевые слова:* методы квантовой механики, NWChem, пористый кремний, муреин.

### Введение

Необходимость создания безопасных и эффективных биологических препаратов для борьбы с болезнями, вызываемыми фитопатогенными грибами и бактериями, непрерывно связана с высокой токсичностью химических пестицидов, приводящей к целому ряду экологических проблем. Преимуществами биопестицидов, по сравнению с химическими пестицидами, является высокая избирательность действия на вредные организмы и меньшая токсичность для нецелевых видов, что позволяет отнести многие биопестициды к средствам защиты растений с низким уровнем экологической опасности и риска применения. В качестве компонента такого препарата используются эндофитные бактерии, которые способны проникать во внутренние ткани растений и предотвращать попадание возбудителей болезней в растительный организм.

Проблема эксплуатации биологических препаратов, таких как биопестициды, заключается в необходимости соблюдения строгих условий хранения. Для решения этой проблемы предложено использовать пористые материалы, такие как пористый кремний, в качестве «контейнера» для хранения и транспортировки бактерий. Клетки, расположенные на поверхности пористого материала, обеспечиваются питательными веществами, газами и биологически активными веществами как из раствора, так и из пор. Таким образом, пористая поверхность может предложить для клеток более постоянную среду, которая имитирует *in vivo*. Это позволяет продлевать сроки хранения препарата и замедлить ферментативный процесс.

Вследствие вышеперечисленного возникает задача взаимодействия бактерий с поверхностями пористых материалов. Проблема иммобилизации биологически активных организмов встречается в большом количестве литературных источников, в которых рассмотрены различные варианты обработки поверхности пор и различные среды, увеличивающие вероятность иммобилизации бактерий в порах [1–3].

Выбор пористого кремния в качестве материала подложки связан с его хорошо изученными химическими, физическими и геометрическими свойствами, в том числе и для биологического применения: гидрофильность или гидрофобность поверхности кремния внутри

поры, электрический заряд на поверхности пористого кремния, размер и упорядоченность пор и другие.

В качестве объекта исследования выбрана бактерия *Bacillus subtilis*, иммобилизованная в кремниевой поре, относящаяся к группе грамположительных бактерий. У данного типа бактерий в состав клеточных стенок входят мукопептиды, полисахариды (сложные, высокомолекулярные сахара), тейхоевые кислоты (сложные по составу и структуре соединения, состоящие из сахаров, спиртов, аминокислот и фосфорной кислоты) [4]. Полисахариды и тейхоевые кислоты связаны с каркасом стенок – муреином, или пептидогликаном (рис. 1). Полисахаридный скелет молекулы представляет собой чередующиеся остатки *N*-ацетилглюкозамина и *N*-ацетилмурамовой кислоты, соединенных между собой посредством  $\beta$ -1,4- гликозидных связей. Структура пептидогликана представлена на рис. 1, где 1 и 2 – места полимеризации гликанового остова молекулы, 3 – место присоединения с помощью фосфордиэфирной связи молекулы тейхоевой кислоты в клеточной стенке грамположительных бактерий, 4 и 5 – места, по которым происходит связывание между гликановыми цепями с помощью пептидных связей.

Частота «сшивок» различна, поскольку не все пептидные хвосты участвуют в формировании межцепочечных связей. Некоторые образуют ковалентные связи с другими химическими молекулами, входящими в состав клеточной стенки, и часть тетрапептидных хвостов находится в свободном состоянии. Как показано на рис. 1, к *N*-ацетилмурамовой кислоте присоединен короткий пептидный хвост, состоящий из небольшого числа (обычно 4-5) аминокислот.

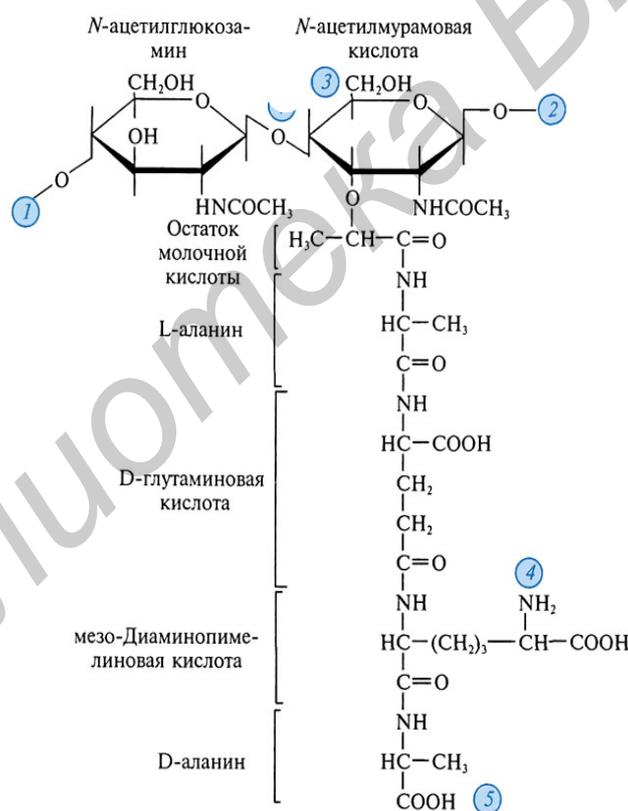


Рис. 1. Структура молекулы муреина грамположительных бактерий

### Методика исследования

Для исследования механизмов взаимодействия использовался метод квантовой механики, основанный на уравнении Шредингера.

Для совокупности  $N$  взаимодействующих частиц с потенциальной энергией  $U$  и массами  $m_k$  в декартовой системе координат оно имеет вид

$$-\frac{\hbar^2}{2} \sum_{k=1}^N \frac{1}{m_k} \left[ \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_k^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y_k^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z_k^2} \right] + \hat{U} \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $\Psi(x, y, z, t)$  – волновая функция совокупности координат системы частиц и времени;  $\hat{U}$  – оператор потенциальной энергии.

Суммирование производится по всем частицам. Если вероятность обнаружить частицу в некоторой области пространства не зависит от времени, а только от места расположения этой точки в пространстве, такое состояние системы называется стационарным, и описывается уравнением Шредингера, не зависящим от времени:

$$-\frac{\hbar^2}{2} \sum_{k=1}^N \frac{1}{m_k} \left[ \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_k^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y_k^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z_k^2} \right] + \hat{U} \Psi = E \Psi. \quad (2)$$

Параметр  $E$  – есть собственное значение стационарного уравнения Шредингера. В результате решения уравнения (2) находят собственные (возможные) значения параметра  $E$  и соответствующие ему решения – собственные функции.

В настоящее время существует достаточное количество методик и упрощений для решения уравнения Шредингера. К наиболее распространенным методам относят метод Хартри Фока (HF, UHF, RHF), метод самосогласованного поля (SCF), а также методы, основанные на теории возмущений (теория возмущений Меллера-Плессета, MPn).

При проведении компьютерных расчетов использовался метод Хартри-Фока. При реализации данного метода используются следующие приближения:

- 1) пренебрежение всеми физическими эффектами, кроме притяжения электронов к ядрам и отталкивания электронов друг от друга;
- 2) состояние молекулы стационарно (ее энергия  $E$  не зависит от времени);
- 3) ядра атомов неподвижны и их координаты точно определены.

Первое условие предполагает и пренебрежение всеми релятивистскими эффектами. Второе условие обосновано, если внешние поля и другие воздействия на молекулу в данный момент несущественны. Третье условие называется адиабатическим приближением и является приближенным требованием, поскольку ядра очень тяжелые и движутся очень медленно.

Поскольку при исследовании механизмов взаимодействия необходимо сравнивать энергии и другие свойства системы с замкнутой оболочкой и родственной ей системы с открытой оболочкой, выбран ограниченный метод Хартри-Фока для открытой оболочки (Restricted Open-shell Hartree-Fock method, ROHF), в котором замкнутые и открытые оболочки описаны по-разному [5].

### Результаты и их обсуждение

Анализ активных участков молекулы пептидогликана (муреина) показал наличие двойной связи между кислородом и углеродом, которая включает в себя  $\pi$ - и  $\sigma$ -связи, причем первая значительно слабее второй. Можно предположить, что при взаимодействии с подложкой эта  $\pi$ -связь будет разрушаться и принимать участие во взаимодействии с подложкой.

Рассмотрены два механизма образования новой связи кислорода с подложкой: C-O-H-Si и C-O-Si (см. рис. 2), причем в первом случае вероятно образование водородной связи, в то время как во втором случае – наиболее вероятно образование ковалентной связи. Вычисления проводились в программном комплексе NWChem [6]. С целью сокращения машинного времени, для атомов, участвующих во взаимодействиях, использовался базис более высокого порядка, по сравнению с базисом для атомов, которые не принимают во взаимодействии с подложкой непосредственного участия – 6-31G\* и 3-21G, соответственно. В таблице представлены расстояния между органической молекулой и подложкой до оптимизации геометрии с целью поиска энергетического минимума энергии и после нее.

Результаты проведенных расчетов показали, что при взаимодействии фрагмента клеточной стенки с поверхностью кремния по механизму C-O-Si, как и предсказывалось, может образовываться ковалентная связь Si-O, длиной ~ 0,17 нм.

**Результат вычисления расстояния между атомами: Si-O при взаимодействии органической молекулы с атомом кремния непосредственно, H-O при взаимодействии посредством водорода**

Механизм C-O-Si					
Начальное расстояние Si-O, нм	0,1400	0,1600	0,1800	0,2000	0,2400
Конечное расстояние Si-O, нм	0,1675	0,1681	0,6052	0,6270	0,3789
Механизм C-O-H-Si					
Начальное расстояние H-O, нм	0,0900	0,1000	0,1100	0,1400	0,1800
Конечное расстояние H-O, нм	0,3053	0,3053	0,3003	0,2903	0,2925

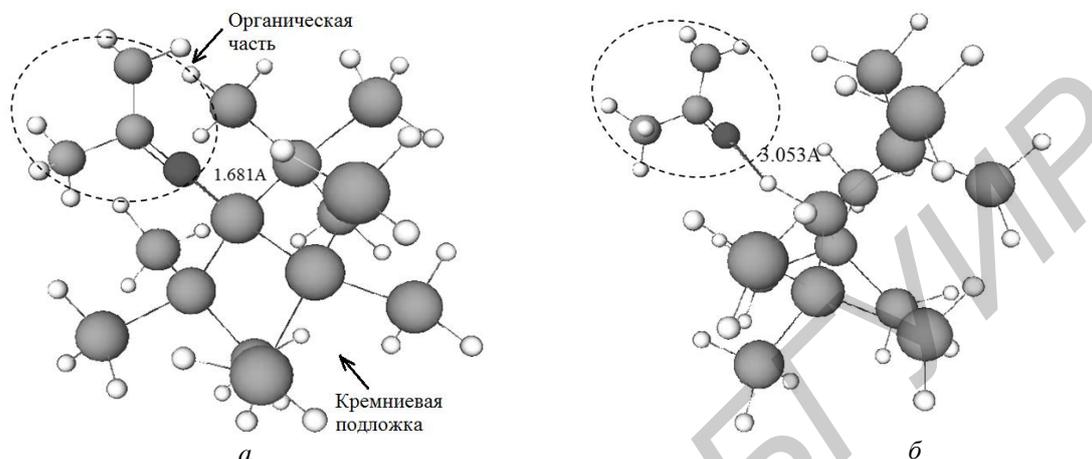


Рис. 2. Механизмы взаимодействия: *a* – C-O-Si; *б* – C-O-H-Si

На рис. 3, *a* изображен график зависимости энергии связи от расстояния между взаимодействующими атомами (Si-O). Видно, что минимальная энергия соответствует расстоянию ~ 0,17 нм. Из графика, изображенного на рис. 3, *б*, видно, что энергия системы меньше при отдалении органической молекулы и подложки друг от друга. Это говорит о том, что взаимодействие по механизму C-O-H-Si не приводит к образованию ни ковалентной, ни водородной связи.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что бактерия будет иммобилизоваться посредством образования химических связей на кремниевой подложке, поверхность которой очищена от водорода.

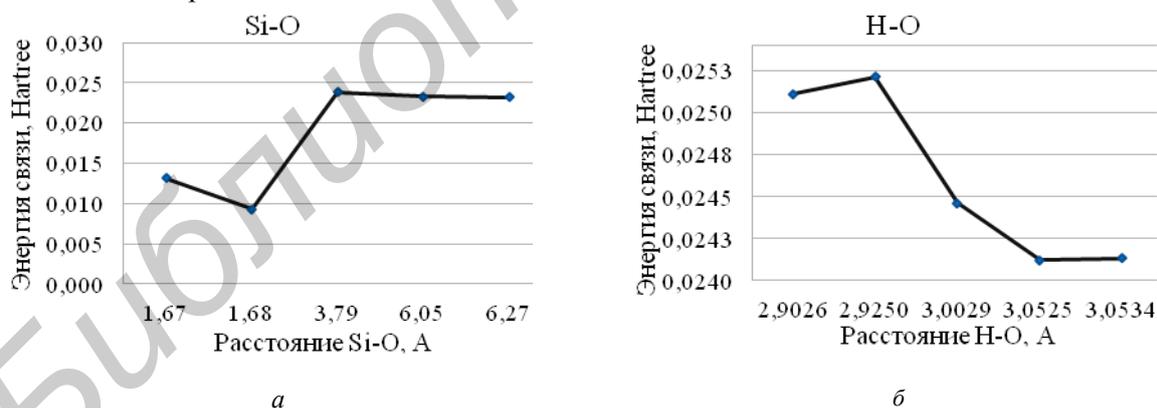


Рис. 3. Зависимость энергии связи от расстояния: *a* – Si-O для механизма C-O-Si; *б* – H-O для механизма C-O-H-Si

### Заключение

Результаты проведенного посредством компьютерного моделирования исследования механизмов взаимодействия клеточной стенки грамположительной бактерии *Bacillus subtilis* с поверхностью кремния позволяют сделать следующие выводы.

Клеточная стенка грамположительных бактерий, к которым относится исследуемая бактерия, представляет собой цепочки чередующихся пептидогликанов, пронизанных тейхоевыми кислотами.

Детальное изучение природы взаимодействия «бактерия-поверхность кремния» показало, что наиболее вероятным механизмом взаимодействия будет образование связи C-O-H-Si либо C-O-Si между углеродом и кислородом N-ацетилглюкозамина, объединенных двойной связью, и атомом водорода, связанным с атомом кремния подложки, либо непосредственно с кремнием.

Установлено, что минимум полной энергии взаимодействия «фрагмент органической молекулы – поверхность кремния» по механизму C-O-Si наблюдается при расстоянии между взаимодействующими частями 1,68 Å, что соответствует длине связи Si-O. То есть взаимодействие по механизму C-O-Si приводит к образованию ковалентной связи.

Для механизма C-O-H-Si из полученных результатов минимум явно не прослеживается. Это свидетельствует о том, что при наличии атома водорода, связь между органической молекулой и поверхностью кремния не образуется.

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что для лучшей иммобилизации бактерии на поверхности кремния необходимо обеспечить отсутствие атомов водорода на поверхности.

## QUANTUM-MECHANICAL SIMULATION OF INTERACTION MECHANISMS BETWEEN FRAGMENT OF BACTERIA CELL WALL AND SILICON SURFACE

V.V. BURKO, Y.V. DOUHAYA, V.R. STEMPIITSKY, T.V. ROMANOVSKAJA

### Abstract

The results of investigation the mechanisms of interaction between fragment of bacterial cell wall and silicon surface via quantum-mechanical methods are presented. The main attention given to the interaction mechanisms oxygen-silicon and oxygen-hydrogen-silicon, where oxygen belongs to biomolecule and silicon and hydrogen belongs to silicon substrate.

### Список литературы

1. *Chiadini F., Fiumara V., Scaglione A., et. al* // J. Photon. Energy. 2013. Vol. 3(1). P. 034596.
2. *LaVan D. A., McGuire T., Langer R.* // Nature Biotechnology. 2003. Vol. 21(10). P. 1184–1191.
3. *Ulbrich M., Fromherz P.* // Adv. Mater. 2001. Vol. 13. P. 344.
4. *Kunst F., Ogasawara N., Moszer I.* // NATURE. 1997. Vol. 390. P. 249–256.
5. *Игнатов С.К.* Квантово-химическое моделирование молекулярной структуры, физико-химических свойств и реакционной способности: учебно-методический материал по программе повышения квалификации. Нижн. Новгород, 2006.
6. NWChem Official Site. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.nwchem-sw.org>. – Date of access: 4.01.2014.

УДК 539.216:546.824-31

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА С КОЖЕЙ ЧЕЛОВЕКА

Т.М. ПЕЧЕНЬ, А.М. ПРУДНИК

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

*Поступила в редакцию 18 ноября 2014*

Для целей медицинской неинвазивной спектроскопии необходимо знать оптические характеристики биологических тканей и сред. Одним из способов определения оптических характеристик слоев кожи является математическое моделирование процесса прохождения электромагнитной волны. В основе методики моделирования лежит метод Монте-Карло. Модель кожи человека состоит из пяти слоев: эпидермис, верхняя часть дермы, дерма, нижняя часть дермы, гиподерма. Моделирование проводилось в программе TracePro, которая позволяет выполнять анализ рассеянного света, оптический анализ оптико-механических систем с учетом поглощения, зеркального отражения и преломления, рассеивания и дифракции апертуры света.

*Ключевые слова:* кожа человека, метод Монте-Карло, отражение и поглощение света, отражатель Ламберта, фотоплетизмографический метод.

### Введение

В настоящее время методы неинвазивного измерения различных параметров систем организма широко применяются в медицинских целях. Фотоплетизмографический метод является одним из таких методов [1]. Существенное достоинство данного метода заключается в бесконтактном проведении исследований. Это очень важная особенность, т.к. в этом случае не происходит сдавливания сосудов, что полностью исключает возможность нарушения кровообращения в исследуемых участках тканей организма человека. Следует особо подчеркнуть, что в случае проведения медицинских исследований у пациентов в области ран или ожогов применение фотоплетизмографического метода возможно.

Фотоплетизмографический метод основывается на принципе денситометрии, которая позволяет определять оптическую плотность исследуемого материала по отражению, проникновению и поглощению света тканями организма человека. Для проведения исследований по данному методу необходимо применять специальные электронно-оптические приборы – фотоплетизмографы. Нужно отметить, что по принципу работы эти приборы подобны фотометрам.

### Методика эксперимента

Кожный покров – это многофункциональный орган. Экспериментально показано, что кожа представляет собой сильно нелинейный вязкоупругий материал [2]. Кожа человека представляет собой многокомпонентную мутную (сильно светорассеивающую) биологическую среду [3]. По этой причине возникают сложности при построении моделей. Оптические характеристики кожи зависят от множества факторов.

В зависимости от части тела толщина кожного покрова изменяется от 1 до 4 мм. Как показано на рис. 1 (с левой стороны фигурными скобками), в коже выделяют три основные

части: 1 – эпидермис, который представляет собой многослойный эпителий, с толщиной, варьирующейся от 0,02 до 2,40 мм; 2 – дерма, которая состоит из множества волокон и относительно малого количества клеток соединительной ткани, с толщиной от 0,5 до 5 мм; 3 – гиподерма, представляет собой подкожный слой, состоящий из коллагеновых, эластических и ретикулярных волокон и пронизанный сетью нервов и кровеносных сосудов, что позволяет выполнять функцию поддержания и питания дермы и эпидермиса; толщина этого слоя различается у людей, т.к. данный параметр напрямую зависит от питания и образа жизни человека.

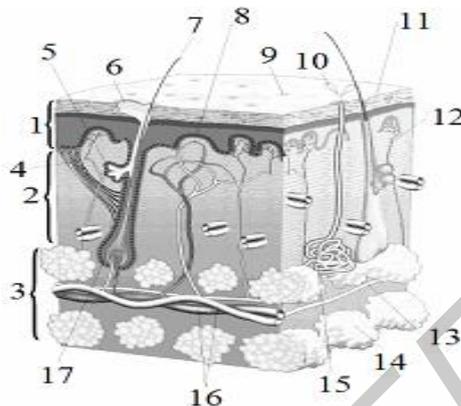


Рис. 1. Схематическое изображение строения кожи человека: 1 – эпидермис; 2 – дерма; 3 – гиподерма (подкожная жировая клетчатка); 4 – мышца, которая выполняет функцию поднятия волоса; 5 – сальная железа; 6 – жировой секрет; 7 – волос; 8 – капилляры; 9 – пора; 10 – пот; 11 – роговой слой (кератин); 12 – нервное окончание; 13 – нерв; 14 – жировая долька; 15 – потовая железа; 16 – кровеносные сосуды; 17 – волосяной мешочек

Средний показатель преломления кожи больше, чем у воздуха, в связи с этим на границе раздела биообъект – воздух часть излучения отражается, а остальная часть проходит в биоткань. Моделирование фотоплетизмографического процесса измерения основных параметров кожи человека основывается на моделировании методом Монте-Карло распространения электромагнитной волны оптического диапазона длин волн (1 нм...1 мм) через кожу человека. Таким образом, определяется часть и спектральный состав отраженных лучей от слоев кожи.

В основе алгоритма математического моделирования лежит фазовая функция Хенни-Гринштейна (1), которая позволяет определить направление обратного рассеивания в многослойных мутных средах:

$$p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}, \quad (1)$$

где  $\theta$  – угол рассеяния,  $g$  – параметр анизотропии рассеяния, который представляет собой средний косинус угла рассеяния; определяемый из выражения

$$g = \langle \cos \theta \rangle = \int_0^\pi p(\theta) \cos \theta \cdot 2\pi \sin \theta d\theta \quad (2)$$

Необходимо отметить, что параметр анизотропии рассеяния  $g$  определяет число актов рассеяния, после которых теряется информация о первоначальном направлении движения фотона в рассеивающей среде. Как видно из (2), значение этого параметра варьируется от  $-1$  до  $+1$ . Как правило, для биологических тканей  $g$  принимает значения из диапазона  $0,70 \dots 0,99$  [4].

Основные оптические параметры кожи человека, приведенные в таблице, использовались в процессе математического моделирования в программе TracePro компании Lambda Research Corporation для оптического анализа. В среде данного программного продукта можно создавать трехмерные модели оптико-механических систем и проводить анализ распределения освещенности в системе, учитывая рассеяние, отражение, поглощение, дифракцию света, при этом трассировка лучей производится методом Монте-Карло.

**Оптические параметры кожи человека**

Слой кожи \ Параметр	Длина волны, $\lambda$ , нм	Коэффициент поглощения, $\mu_a$ , см <sup>-1</sup>	Коэффициент рассеяния, $\mu_s$ , см <sup>-1</sup>	Параметр анизотропии рассеяния, $g$	Коэффициент преломления, $n$	Толщина слоя, $d$ , мкм	
Эпидермис	видимая область	577	10,7	120	0,78	1,5	100
		633	4,30	107	0,79		
	ближняя ИК-область	805	1,66	18,3	0,80		
		940	0,64	16,2	0,80		
Верхняя часть дермы	видимая область	577	3,00	205	0,78	1,4	200
		633	2,70	187	0,82		
	ближняя ИК-область	805	1,18	11,4	0,80		
		940	0,77	9,70	0,80		
Дерма	видимая область	577	5,20	219	0,78	1,4	200
		633	3,30	192	0,82		
	ближняя ИК-область	805	1,41	40,1	0,81		
		940	1,18	33,0	0,81		
Нижняя часть дермы	видимая область	577	6,00	225	0,78	1,4	600
		633	3,40	194	0,82		
	ближняя ИК-область	805	1,45	45,9	0,81		
		940	1,26	37,7	0,81		
Гиподерма	видимая область	577	3,00	205	0,78	1,4	900
		633	2,70	187	0,82		
	ближняя ИК-область	805	1,18	11,4	0,80		
		940	0,77	9,70	0,80		

Следует подчеркнуть, что оптические параметры для верхнего и нижнего слоев дермы кожи человека представляют собой линейные комбинации коэффициентов поглощения и рассеивания соответственно для концентраций оксигенированного гемоглобина (HbO<sub>2</sub>) и дезоксигенированного гемоглобина (Hb) [5].

Оптические свойства кожи человека изменяются в зависимости от возраста. Важно учитывать данный факт и при математическом моделировании. В литературе не приведены точные оптические параметры кожи человека, т.к. их, как правило, не рассчитывают по аппроксимирующим функциям, а получают из экспериментальных исследований.

Для получения наиболее наглядной картины поведения фотоплетизмографических сигналов для разных возрастных групп нами были использованы опубликованные данные, полученные в результате проведения экспериментальных исследований, в [6]. На рис. 2 представлены графики фотоплетизмографических сигналов в зависимости от времени. Графики были построены для нормированных значений по осям абсцисс (времени) и ординат (амплитуды).

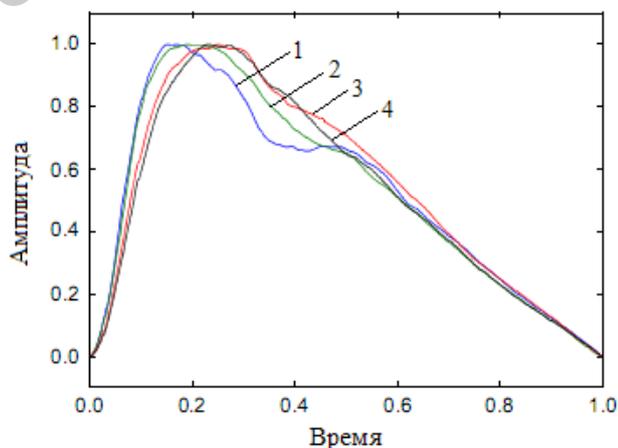


Рис. 2. Формы фотоплетизмографических сигналов для разных возрастных групп:  
1 – меньше 30 лет; 2 – от 30 до 39 лет; 3 – от 40 до 49 лет; 4 – больше 50 лет

Как видно из рис. 2, формы фотоплетизмографических сигналов для групп старшего возраста (кривые 2, 3 и 4) имеют более плавный характер, чем для группы меньше 30 лет. Эти

фотоплетизмографические сигналы в общем можно представить в виде гармонической функции (3), разложенную в ряд Фурье с коэффициентами  $c_n$  (4):

$$f(k) = \sum_{n=-m}^m c_n \exp\left(\frac{2\pi ink}{N}\right), \quad (3)$$

$$c_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \exp\left(-\frac{2\pi ink}{N}\right), \quad (4)$$

где  $c_n$  –  $n$ -ый коэффициент в ряде Фурье,  $N$  – количество дискретных отсчетов на период,  $k$  – индекс дискретного отсчета,  $m$  – максимальное количество гармоник функции  $f(k)$ , разложенной в ряд Фурье.

Данная особенность является существенной с точки зрения определения спектрального состава этих сигналов. Спектр фотоплетизмографических сигналов есть конечное количество дискретных спектральных составляющих с амплитудами  $c_n$ .

### Результаты и их обсуждение

Моделирование проводилось для 4 разных длин волн электромагнитного излучения оптического диапазона длин волн: 577 нм и 633 нм из видимой области, а также 805 нм и 940 нм из ближней инфракрасной области. На рис. 3 представлено одно из изображений, полученное в результате моделирования.

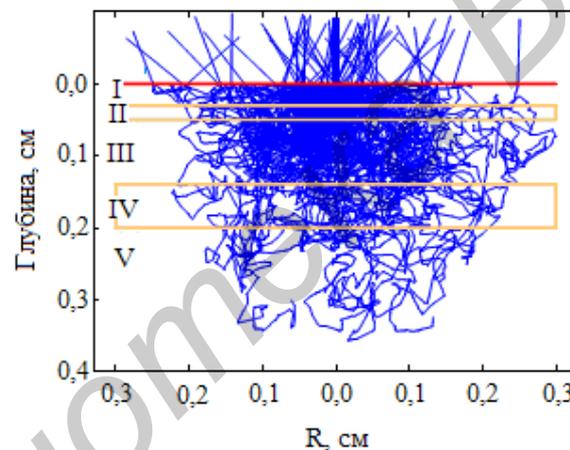


Рис. 3. Изображение обратного рассеивания в пятислойной модели кожи, полученного в результате моделирования методом Монте-Карло для длины волны 577 нм

Как видно из рис. 3, взаимодействие электромагнитного излучения оптического диапазона длин волн представляет собой сложный процесс. Здесь необходимо учитывать особенности при прохождении границы раздела воздух-кожа: различие в показателях преломления воздуха и эпидермиса кожи приводит к тому, что падающее излучение частично отражается и переотражается в разных направлениях, а существенная часть лучей (больше 90 %) проходит в кожу. Прохождение электромагнитного излучения оптического диапазона длин волн во внутренние слои кожи сопровождается неравномерным ослаблением и размыванием. Эти искажения световой волны обусловлены переотражением внутри кожи (слои I, II, III и IV, показанные на рис. 3). Необходимо отметить, что процесс ослабления определяется поглощением и рассеянием, а процесс размывания – только рассеянием.

Достоверность результатов экспериментальных исследований зависит от точности показаний используемых приборов. В процессе моделирования учитывалось это обстоятельство. На рис. 4 приведены графики зависимостей отношений поглощения дезоксигенированного гемоглобина (Hb) к коэффициенту поглощения оксигенированного гемоглобина (HbO<sub>2</sub>) и коэффициента поглощения оксигенированного гемоглобина (HbO<sub>2</sub>) к коэффициенту поглощения дезоксигенированного гемоглобина (Hb) от длины волны.

Применение фотоплетизмографа для исследований по определению оптической плотности исследуемых материалов по отражению, проникновению и поглощению света

тканями организма человека в видимой области и ближней ИК-области позволяет получать результаты с высокой точностью. При исследовании прохождения электромагнитного излучения оптического диапазона длин волн через кожу человека наиболее важно рассмотреть спектр поглощения гемоглобина. Это связано с тем, что дерма кожи сильно пронизана кровеносными сосудами с гемоглобином [7]. Характер влияния свойств поглощения дезоксигенированного гемоглобина (Hb) на свойства оксигенированного гемоглобина (HbO<sub>2</sub>) можно проследить по кривым 1 и 2 (рис. 4). Следует отметить, что коэффициент поглощения дезоксигенированного гемоглобина (Hb) выше по отношению к коэффициенту поглощения оксигенированного гемоглобина (HbO<sub>2</sub>) на интервалах 420...440 нм и 590...800 нм.

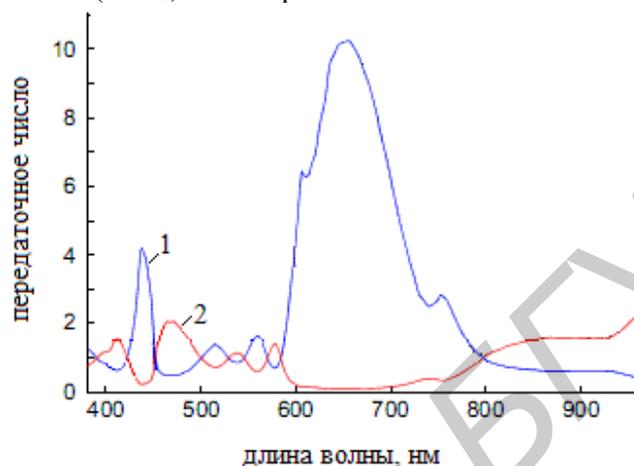


Рис. 4. Графики зависимостей: 1 – отношение коэффициента поглощения дезоксигенированного гемоглобина (Hb) к коэффициенту поглощения оксигенированного гемоглобина (HbO<sub>2</sub>); 2 – отношение коэффициента поглощения оксигенированного гемоглобина (HbO<sub>2</sub>) к коэффициенту поглощения дезоксигенированного гемоглобина (Hb)

Для оценки отражающей способности кожи в случае падения светового луча на плоскую поверхность эпидермиса целесообразно проводить сравнение с отражателем Ламберта, который подчиняется закону Ламберта: яркость отражающей поверхности одинакова во всех направлениях [8]. На рис. 5 представлены графики зависимости плотности отражения частиц от угла отражения.

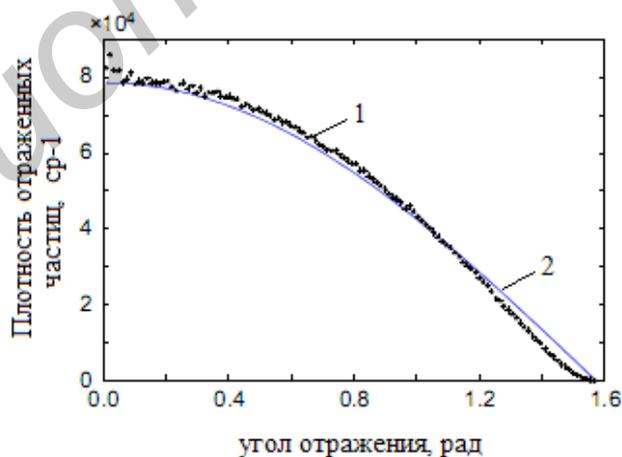


Рис. 5. Графики зависимостей плотности отражения частиц от угла отражения: 1 – для отражателя Ламберта; 2 – для пятислойной модели кожи человека

Кривые 1 и 2 (рис. 5) изменяются по косинусоидальному закону. Видно, что кожа человека имеет практически идентичный характер поведения зависимости плотности отражения частиц от угла отражения как и у отражателя Ламберта. Таким образом, справедливо отметить, что яркость диффузно рассеянного электромагнитного излучения оптического диапазона длин волн внутри кожи человека одинакова во всех направлениях.

## Заключение

В результате проведенного компьютерного моделирования прохождения электромагнитного излучения оптического диапазона длин волн через кожу человека установили:

- исследуемая модель кожи человека имеет практически одинаковые отражающие свойства как и отражатель Ламберта;
- оптические характеристики кожи человека зависят от толщины, которая на разных участках тела человека варьируется;
- сильное светорассеивание кожи человека характеризует ее как мутную биологическую среду;
- взаимодействие электромагнитного излучения оптического диапазона длин волн представляет сложный процесс: отражение, рассеяние, поглощение света;
- глубина прохождения световой волны в слои кожи человека зависит от длины волны.

## THE SIMULATION OF THE ELECTROMAGNETIC WAVES INTERACTION IN THE OPTICAL RANGE WITH HUMAN SKIN

T.M. PECHEN, A.M. PRUDNIK

### Abstract

For the aims of non-invasive medical spectrophotometry it is necessary to know the optical properties of biological tissues and fluids. One of the means of the skin layers optical characteristics definition is the mathematical modeling of electromagnetic wave passing process. The Monte-Carlo method is the cornerstone of a modeling technique. Human skin model consists of five layers: the epidermis, the upper part of the dermis, the dermis, the lower part of the dermis, hypodermis. The simulation was performed in the program TracePro, which allows the analysis of the scattered light, the optical analysis of opto-mechanical systems, taking into account absorption, specular reflection and refraction, scattering and diffraction of light aperture.

### Список литературы

1. *Мошкевич В.С.* Фотоплетизмография (аппаратура и методы исследования). М., 1970.
2. *Пушкарева А.Е.* Методы математического моделирования в оптике биоткани: учеб. пособие. СПб, 2008.
3. *Меглинский И.В.* // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 12. С. 1101–1107.
4. *Cheong W.-F., Prah S.A., Welch A.J.* // IEEE Quant. Electr. 1990. Vol. 26. № 12. P. 2166–2185.
5. *Spigulis J.* // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2012. № 49 (5). P. 63–80.
6. *Allen J., Murray A.* // Physiological Measurement. 2003. № 24 (2). P. 297–307.
7. *Anderson R.R., Parrish J.A., Jaenicke K.F.* // The Science Photomedicine. 1982. P. 147–194.
8. *Платунов Е. С., Самолетов В. А., Буравой С. Е.* Физика. Словарь-справочник. СПб, 2005.

УДК 621.37, 537.874.7

## РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Г.А. ПУХИР, М.А. ВИЛЬКОЦКИЙ, АБУКРАА А.С. АБДУЛССАЛАМ, Н.В. НАСОНОВА

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

*Поступила в редакцию 16 января 2015*

Предложены конструкции радиопоглотителей на основе влагосодержащих волокнистых материалов растительного происхождения и исследованы частотные зависимости их экранирующих характеристик в диапазоне частот 0,7...17 ГГц, отличающиеся низким коэффициентом отражения в широком диапазоне частот, высокой технологичностью формирования и доступностью исходных составляющих. Показано, что разработанные конструкции обладают эффективностью экранирования ЭМИ до 45 дБ при минимальном коэффициенте отражения в размере –15 дБ в исследуемом диапазоне частот.

*Ключевые слова:* экран электромагнитного излучения, радиопоглотитель, композиционный материал, волокнистый материал растительного происхождения.

### Введение

Электромагнитное излучение – неотъемлемая составляющая современной цивилизации. Сегодня невозможно представить себе наше существование без технической инфраструктуры, охватывающей абсолютно все сферы деятельности человека. Информатизация общества привела к тому, что электронно-вычислительные системы контролируют наиболее важные и сложные процессы. Их отстранение или внезапное отключение может привести к серьезным финансовым, экологическим и социальным последствиям. Поэтому необходимость сосуществования с технической средой является очевидным фактом. Работа любых электронных технических средств связана с использованием электромагнитной энергии в той или иной форме. Кроме того, многие устройства являются непосредственными источниками таких излучений в широком диапазоне частот и мощностей, что создает небезопасную среду для функционирования других технических устройств, а также жизнедеятельности живых организмов в непосредственной близости с источниками таких излучений.

Радиоэлектронная аппаратура (от бытовых приборов до систем наземной и спутниковой связи), как правило, функционирует в микроволновом диапазоне. Что порождает проблему электромагнитной совместимости, а при высоких мощностях излучаемых волн и защиту оборудования и персонала от их негативного воздействия. Электронно-вычислительная техника использует весьма широкий частотный диапазон и чувствительна к воздействию практически любых электромагнитных полей и наводок [1].

В настоящее время разработка экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) и конструкций, обеспечивающих защиту персонала и технических объектов от нежелательного воздействия ЭМИ, является широкомасштабным процессом, в который вовлечено мировое научное сообщество. Ученые многих стран работают над созданием высокоэффективных методов и средств защиты от воздействия ЭМИ. Немаловажным фактором является доступность компонентов системы и надежность готовой защитной конструкции, что может быть обусловлено территорией создания и эксплуатации экранов ЭМИ.

Целью настоящей работы является создание и исследование эффективности конструкций широкополосных радиопоглопителей СВЧ-диапазона, отличающихся низким коэффициентом отражения в широком диапазоне частот, высокой технологичностью формирования и доступностью исходных материалов из волокон растительного происхождения.

### Обоснование выбора компонентов радиопоглопителя

Эффективность экранирования определяется процессами отражения и поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) в материале экрана:

$$\mathcal{E}_{\text{экр}} = \mathcal{E}_{\text{отр}} \cdot \mathcal{E}_{\text{погл}} \cdot \mathcal{E}_{\text{мотр}}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{экр}}$  – общая эффективность экранирования;  $\mathcal{E}_{\text{отр}}$  – эффективность экранирования за счет отражения первичной падающей электромагнитной волны (ЭМВ) от поверхности экрана;  $\mathcal{E}_{\text{погл}}$  – эффективность экранирования за счет поглощения (внутренних преобразований) энергии в среде экрана при прохождении ЭМВ сквозь толщину стенки экрана;  $\mathcal{E}_{\text{мотр}}$  – эффективность экранирования за счет потерь энергии ЭМВ от многократных переотражений от внутренних границ экрана [2].

Широко известными и распространенными являются экраны из металлических материалов. В зависимости от частотного диапазона такие экраны могут выполняться сплошными или сетчатыми. Эффективность таких экранов может быть рассчитана исходя из толщины слоя, проводимости и магнитных свойств металла. Высокая величина проводимости металлов обуславливает 99%-ное отражение энергии падающего ЭМИ.

В некоторых случаях условие снижения компонента  $\mathcal{E}_{\text{отр}}$  является необходимым. Материалы и конструкции, действие которых основано на эффекте поглощения ЭМИ средой экрана, называют радиопоглощающими или поглотителями ЭМИ [3]. Формирование радиопоглопителей основано на согласовании волновых параметров слоев материала с параметрами свободного пространства и рассеянии энергии ЭМВ за счет геометрических неоднородностей поверхности конструкции радиопоглопителя.

Отдельного внимания требуют водосодержащие материалы экранов ЭМИ. Вода является наиболее широко распространенным поглотителем ЭМИ миллиметрового диапазона за счет диэлектрической поляризационной дисперсии, обеспечивающей высокие диэлектрические потери в СВЧ-диапазоне. Большинство материалов уступают воде по этому показателю. Однако появляется другая проблема, которая заключается в формировании определенной пространственной структуры на основе воды в жидкой фазе, так как именно жидкое состояние воды обеспечивает высокие диэлектрические потери. Диэлектрическая проницаемость сильно зависит от влагосодержания в материале, температуры и частоты излучения. С ростом влагосодержания материала увеличивается комплексная диэлектрическая проницаемость: как действительная часть, так и фактор потерь [4, 5].

В [6] приведены значения составляющих комплексной диэлектрической проницаемости для различных веществ при температуре 20 °С и 25 °С на частоте 10 ГГц в зависимости от влагосодержания. На основании этих данных, учитывая закономерность такой зависимости, можно смоделировать средние значения  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  для различного содержания влаги в материале (табл. 1).

Таблица 1. Соответствие значений  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  и содержания влаги в материале на частоте 10 ГГц

$\epsilon'$	$\epsilon''$	W, % масс	$\epsilon'$	$\epsilon''$	W, % масс
7,7	3,4	10	38,3	17,0	50
11,5	5,1	15	53,7	23,8	70
23,0	10,2	30	69,0	30,6	90

Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты в диапазоне СВЧ носит нелинейный характер. При этом наибольшее влияние оказывает частота на действительную составляющую  $\epsilon'$ . Это подтверждается экспериментальными и расчетными данными.

Поиск несущей основы или матрицы для жидкого наполнителя является актуальной задачей при разработке влагосодержащих композиционных экранирующих материалов. Для этих целей используются различные капиллярно-пористые порошковые и волокнистые

материалы. Известны конструкции на основе силикагеля, бентонита, тканого и нетканого полотна, шунгита и др. с различными способами герметизации для стабилизации влагосодержания композита [7–10]. Подобные материалы способны обеспечивать коэффициент передачи ЭМИ не менее  $-10$  дБ при минимальном коэффициенте отражения  $-10\dots-15$  дБ в СВЧ-диапазоне. В настоящей работе рассматривается возможность применения пористой волокнистой основы, в качестве которой используется древесная стружка хвойных пород. Дерево широко известно как волокнистый электроизоляционный материал. Из всех составных частей древесины волокнистым строением обладает только целлюлоза, содержащаяся в количестве до 50 % от веса абсолютно сухой древесины. Целлюлоза – один из самых основных видов полимерных материалов, имеет волокнистое строение и является главной составной частью стенок растительных клеток, и вместе с сопровождающими ее веществами составляет твердый остов всех растений, придавая им механическую прочность и эластичность [11]. Волокнистая структура, гигроскопичность, а также доступность, экологичность и малый вес исходного сырья обуславливают выбор данного материала как несущей основы для жидкого наполнителя. В качестве жидкого наполнителя предлагается использовать гидрофильный водный раствор хлорида кальция, который обеспечит стабилизацию уровня влагосодержания.

Водный раствор хлорида кальция обладает повышенной электропроводностью по сравнению с водой за счет появления свободных ионов, являющихся носителями заряда. Также из-за присутствия ионов происходит существенная модификация структуры воды, сопровождающаяся снижением диэлектрической проницаемости воды с одновременным уменьшением времени диэлектрической релаксации [12]. При этом увеличение отражения, обусловленное возрастанием удельной электропроводности раствора, с избытком компенсируется уменьшением доли отраженной энергии ЭМИ, связанным с уменьшением диэлектрической проницаемости воды и согласованием волновых сопротивлений материала и свободного пространства.

### Методика проведения эксперимента

Для исследования был изготовлен композиционный материал на основе древесной стружки хвойных пород, пропитанной водным раствором хлорида кальция в равновесной концентрации. Из полимерной пленки были сформированы локальные модули для заполнения композиционным материалом, что позволило зафиксировать наполнитель и обеспечить его механическую защиту. Соединение отдельных модулей между собой легко осуществляется термообработкой. Готовые образцы конструкций экранов представлены в двух вариантах исполнения с различной длиной влагосодержащих участков.

Как показано в [13], наибольшей эффективностью экранирования обладают композиционные материалы с наибольшим влагосодержанием. Результаты исследований экранирующих характеристик композиционных влагосодержащих волокнистых материалов растительного происхождения в частотном диапазоне  $8\dots12$  ГГц позволяют предложить их для формирования радиопоглощающих конструкций в более широком диапазоне частот. Исследованы два типа образцов конструкций: с модулями квадратной (рис. 1, *а*) и прямоугольной (рис. 1, *б*) форм, заполненными влагосодержащим волокнистым материалом. Размеры модулей составляют  $5\times5$  см и  $5\times25$  см для образцов с квадратными и прямоугольными модулями соответственно. Толщина конструкций составляет около 10 мм.

Экранирующие свойства разработанных конструкций оценивались путем измерения коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне частот  $0,7\dots17$  ГГц. Оценка экранирующих характеристик исследуемых образцов проводилась в лабораторных условиях с помощью измерительного комплекса SNA 0,01–18. При проведении измерений исследуемый образец экрана закреплялся между рупорами антенн измерительного тракта. В качестве источника тестового сигнала мощностью порядка 1 мВт использовался генератор качающейся частоты. В ходе измерений были получены частотные зависимости коэффициентов передачи  $S_{21}$  (по модулю равен эффективности экранирования электромагнитного излучения) и отражения  $S_{11}$ .

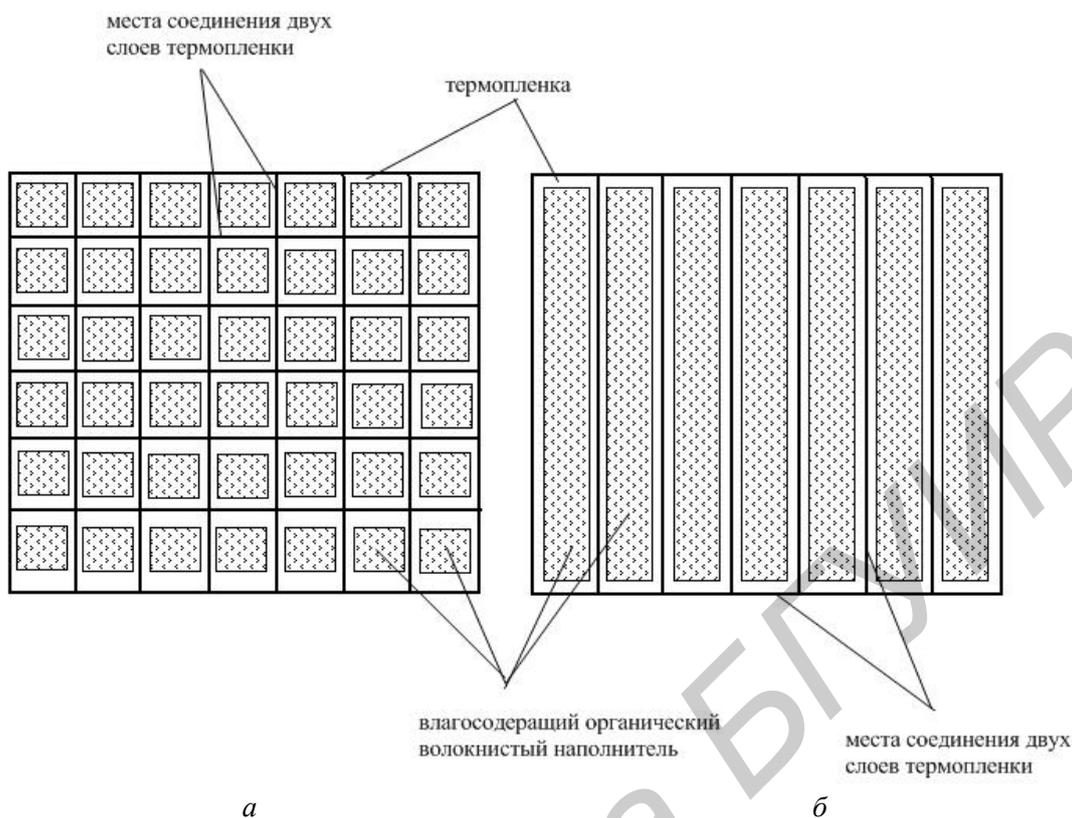


Рис. 1 Схематическое изображение конструкций радиопоглотителей ЭМИ на основе влагосодержащих волокнистых материалов: а – с квадратными модулями; б – с прямоугольными модулями

Расчетные формулы измерительного процесса приведены ниже:

$$S_{21} = \sqrt{\frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{пад}}}}, \quad (2)$$

где  $S_{21}$  – коэффициент передачи, дБ;  $U_{\text{пр}}$  – амплитудное значение напряжения прошедшего через образец ЭМИ, В.;  $U_{\text{пад}}$  – амплитудное значение напряжения падающей ЭМВ, В.

$$S_{11} = \sqrt{\frac{U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}}}}, \quad (3)$$

где  $S_{11}$  – коэффициент отражения, дБ;  $U_{\text{отр}}$  – амплитудное значение напряжения, отраженного от образца, В.;  $U_{\text{пад}}$  – амплитудное значение напряжения падающей ЭМВ, В.

В процессе измерений для сравнения за образцами устанавливался металлический отражатель (алюминиевая фольга) на диэлектрической подложке толщиной от 1,5 до 5 мм. Наличие слоя проводящего материала позволяет получить многослойную конструкцию с улучшенными характеристиками эффективности экранирования ЭМИ, а также имитировать использование разрабатываемой конструкции на металлической поверхности. Варьирование толщиной вспененного полимера позволяет выбрать оптимальный вариант многослойной конструкции с наилучшим согласованием параметров слоев.

### Результаты и их обсуждение

Коэффициент передачи ЭМИ для разработанных конструкций достигает –25 дБ для однослойных образцов и до –45 дБ для двухслойных конструкций с металлическим отражателем (см. рис. 2). Наименьшим коэффициентом передачи обладают образцы с прямоугольными влагосодержащими модулями. При этом направление расположения данных модулей в случае двухслойной конструкции на коэффициент передачи существенного влияния

не оказывает (рис. 2, б). Особый интерес представляет низкочастотная область экранирования в диапазоне 0,5...3 ГГц, где наименьший коэффициент передачи (менее -40 дБ) обеспечивает двухслойный образец. Однослойная конструкция более эффективна в частотном диапазоне 3,5...17 ГГц (рис. 2, а).

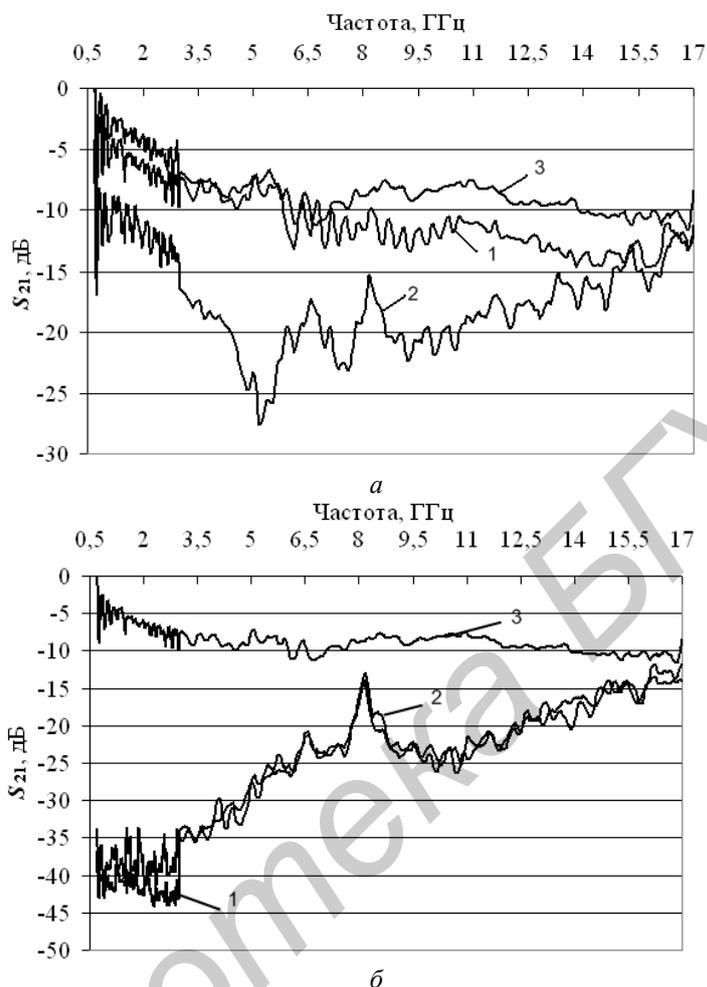


Рис. 2 Коэффициент передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц для разработанных образцов: а – однослойная конструкция; б – двухслойная конструкция с металлическим отражателем; 1 – образец с горизонтальным расположением прямоугольных модулей; 2 – образец с вертикальным расположением прямоугольных модулей; 3 – образец с квадратными влагосодержащими модулями

Критерием отнесения экранирующих материалов и конструкций к радиопоглотителям является снижение характеристики коэффициента отражения ниже -8 дБ. Результаты измерения показателя  $S_{11}$  представлены на рис. 3. Показано, что исследуемые образцы элементов конструкций экранов ЭМИ обеспечивают среднюю величину коэффициента отражения порядка -10 дБ. В исследуемом частотном диапазоне наблюдаются резонансные всплески коэффициента отражения на частотах порядка 2 и 8 ГГц. Однослойная конструкция позволяет получить минимальное значение коэффициента отражения -20...-24 дБ в частотном диапазоне 1...16 ГГц (рис. 3, б). Более равномерной характеристикой обладает образец с квадратными модулями, заполненными влагосодержащим волокнистым материалом.

Двухслойная конструкция с металлическим отражающим слоем позволяет снизить коэффициент отражения ЭМВ от поверхности экрана до -15 дБ (рис. 3, в, г). Характер частотных зависимостей коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц для однослойных и двухслойных конструкций похож, т.к. наибольшая доля отраженной энергии ЭМВ приходится на внешний, относительно источника излучения, влагосодержащий слой.

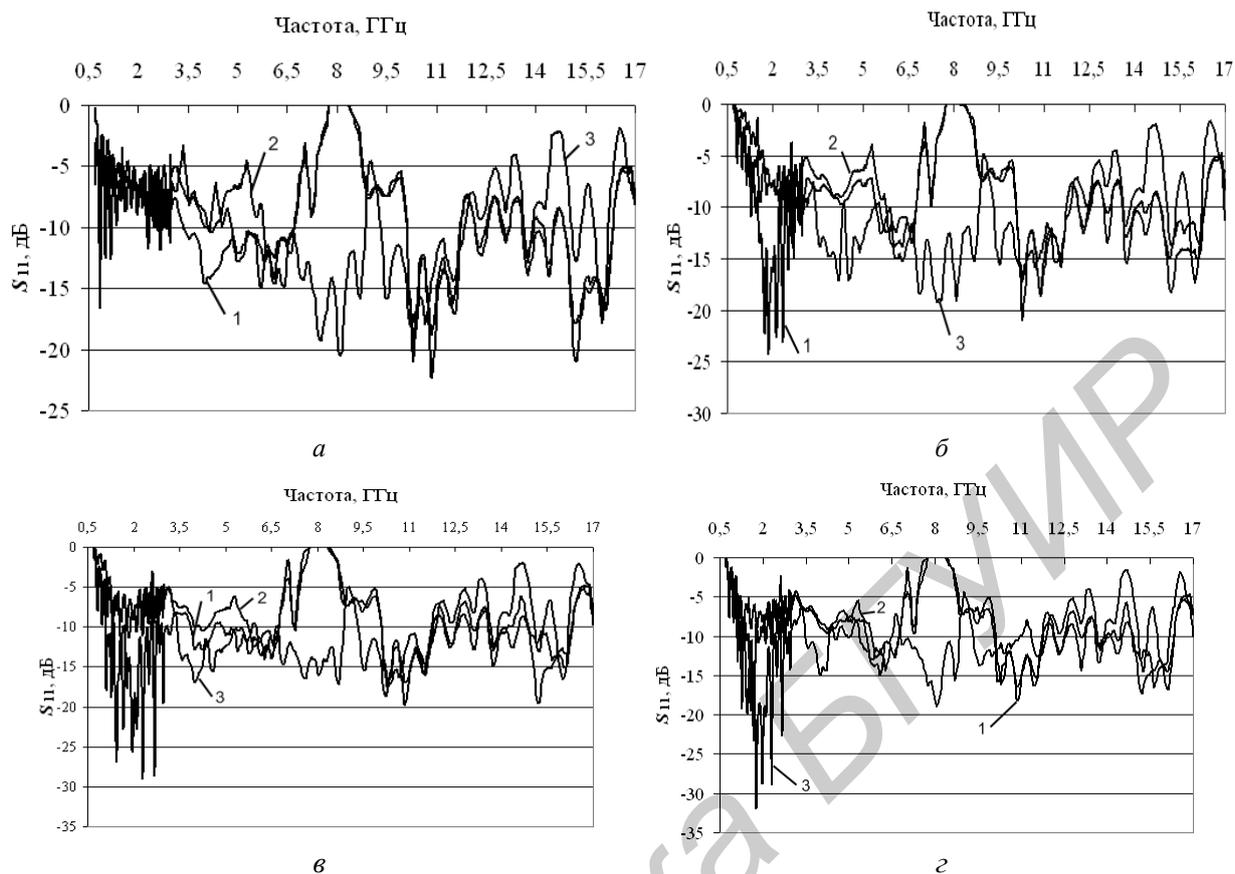


Рис. 3. Частотные характеристики коэффициента отражения ЭМИ однослойными конструкциями в диапазоне 0,7...17 ГГц: *а* – без металлического отражателя; *б* – с металлическим отражателем за образцом; двухслойных конструкций: *в* – без металлического отражателя; *г* – с металлическим отражателем за образцом; 1 – образец с горизонтальным расположением прямоугольных модулей; 2 – образец с вертикальным расположением прямоугольных модулей; 3 – образец с квадратными влагосодержащими модулями

### Заключение

Рассмотрены частотные характеристики коэффициентов передачи и отражения для образцов конструкций радиопоглотителей ЭМИ на основе влагосодержащих волокнистых материалов в диапазоне 0,7...17 ГГц. Представлены результаты измерения данных параметров для однослойных и двухслойных конструкций с металлическим отражающим слоем, а также с различными влагосодержащими модулями – квадратной и прямоугольной формы. Разработанные конструкции обладают эффективностью экранирования от 10 до 45 дБ. Наименьшей величиной коэффициента передачи обладают образцы с прямоугольными влагосодержащими модулями, что может быть связано с большей концентрацией влагосодержащего включения в объеме элемента конструкции. Для влагосодержащих материалов характерно достаточно высокое значение показателя отражения ЭМВ от поверхности. Однако предложенные образцы на основе волокнистых материалов из древесной стружки, пропитанной раствором, позволяют при высокой эффективности экранирования ЭМИ снизить коэффициент отражения до  $-15$  дБ в широком диапазоне частот 3,5...17 ГГц, что может быть обусловлено хлопьеподобной формой волокнистого наполнителя и формой расположения влагосодержащих модулей. Наименьшим коэффициентом отражения обладают конструкции с влагосодержащими модулями квадратной формы, что может быть связано с меньшей концентрацией влагосодержащего наполнителя в ограниченном объеме образца, а также с более равномерной периодичностью влагосодержащих модулей, разделенных слоем радиопрозрачного герметизирующего слоя.

Таким образом, рассмотренные влагосодержащие композиционные материалы на основе волокон растительного происхождения, пропитанных водным раствором хлорида кальция, с достаточной эффективностью могут быть использованы в качестве элементов как экранирующих, так и радиопоглощающих конструкций для защиты персонала и оборудования от нежелательного воздействия ЭМИ и утечки информации по техническим каналам в СВЧ-диапазоне.

## RADIOABSORBING STRUCTURES BASED ON COMPOSITE WATER-CONTAINING FIBER MATERIALS OF VEGETATION ORIGIN

H.A. PUKHIR, M.A. VILKOTSKIY, ABOUKRAA A.S. ABDULSSALAM, N.V. NASONOVA

### Abstract

Radioabsorbing structures are designed on the basis of water-containing fiber composites. The developed radioabsorbers are characterized by a low reflection coefficient in a wide frequency band, high processibility and availability of the components. Their shielding characteristics were studied in the frequency range of 0.7...17 GHz. It is shown that the developed structures are characterized by the shielding effectiveness up to 45 dB and the reflection coefficient about -15 dB in the studied frequency band.

### Список литературы

1. *Богуш В.А., Борботько Т.В., Гусинский А.В. и др.* Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты. Минск, 2003.
2. *Шапиро Д.Н.* Основы теории электромагнитного экранирования. Л., 1975.
3. СВЧ поглотители // НИП «ТРИМ». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.trimcom.ru/Geom\\_rus.htm](http://www.trimcom.ru/Geom_rus.htm). — Дата доступа: 16.01.2015.
4. *K. Kupfer* Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. New York, 2005.
5. *Trabelski S., Kraszewski A.W., Nelson S.O.* // Collection of papers. April, 1999. P. 178–183.
6. *Wisniewski A.* // Collection of papers. April, 1999. P. 143–147.
7. *Лыньков Л.М., Богуш В.А., Борботько Т.В. и др.* // Докл. БГУИР. 2004. Т. 2, № 3. С. 152–167.
8. *Лыньков Л.М., Махмуд М.Ш., Криштопова Е.А.* // Вест. ПГУ. Сер. Фундаментальные науки. 2012. № 4. С. 103–108.
9. *Inui T., Yoshiuchi S., Harada T., et al.* // Int. Symp. Electromagnetic Compatibility. Nagoya, 1989. Vol. 2. P. 775–779.
10. *Ковальчук Н.В., Насонова Н.В., Мухамед Али Альхамруни и др.* // Докл. БГУИР. 2011. №8 (62). С. 27–33.
11. *Хюккель В.* Теоретические основы органической химии. Том 2. Л., 1934.
12. *Робинсон Р., Стокс Р.* Растворы электролитов. М., 1963.
13. *Пухир Г.А., Насонова Н.В., Пулко Т.А.* // Матер. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 8–13 сент. 2013. С. 718–719.

УДК 621.383.92

## ОБНАРУЖЕНИЕ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ КВАНТОВОГО КАНАЛА СВЯЗИ

И.Р. ГУЛАКОВ, А.О. ЗЕНЕВИЧ, А.М. ТИМОФЕЕВ, А.Г. КОСАРИ

*Высший государственный колледж связи  
Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220114, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 26 ноября 2014*

Построена математическая модель квантового канала связи, содержащего в качестве приемного модуля счетчик фотонов, позволяющая учесть влияние квантовой эффективности регистрации, вероятности образования темновых импульсов приемного модуля легитимного пользователя, вероятности потери оптического излучения из-за его несанкционированного вывода из оптического волокна на пропускную способность квантового канала связи.

*Ключевые слова:* макроизгиб оптического волокна, канал утечки информации, счетчик фотонов, лавинный фотоприемник, пропускная способность.

### Введение

В настоящее время для передачи данных широкое применение находят оптические волокна [1]. В некоторых случаях при трансляции данных по таким каналам связи особенно важно обеспечивать конфиденциальность передаваемой информации. Канал утечки информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи, может быть создан путем формирования макроизгиба оптического волокна [2]. При этом несанкционированный доступ к передаваемой информации становится возможным за счет того, что при определенной величине макроизгиба волокна угол падения электромагнитной волны на границе раздела сердцевина-оболочка становится меньше угла полного внутреннего отражения, в результате чего оптическое излучение проходит сквозь обе границы раздела, и часть оптического излучения в месте изгиба оптического волокна выводится во внешнее пространство и регистрируется несанкционированным пользователем. Существуют устройства [3, 4], которые позволяют обнаруживать каналы утечки информации, созданные путем формирования макроизгиба волокна, однако они не позволяют выявлять несанкционированный доступ при выводе из оптического волокна небольшой части излучения, соответствующей не более десяти фотонам излучения за время передачи одного бита. В этих случаях для передачи конфиденциальной информации целесообразно создавать квантовый канал связи [5], в котором применяются оптические импульсы малой мощности, содержащие не более десяти фотонов для передачи одного бита информации. Наличие в квантовом канале утечки информации, реализуемой посредством макроизгиба оптического волокна, приведет к росту количества ошибок при передаче данных и уменьшит пропускную способность этого канала. Одной из основных характеристик счетчика фотонов является квантовая эффективность регистрации, однако до настоящего времени оценка влияния квантовой эффективности регистрации счетчика фотонов на обнаружение несанкционированного пользователя квантового канала связи отсутствует. В связи с этим целью данной работы являлось установить влияние квантовой эффективности регистрации счетчика фотонов на возможность обнаружить несанкционированное пользование квантовым каналом связи, осуществляемое посредством макроизгиба оптического волокна.

## Математическая модель одноквантовой системы передачи и приема данных

При построении математической модели квантового канала связи будем называть легитимных пользователей на передающей и приемной сторонах соответственно Алисой и Бобом, а Евой – нелегитимного пользователя.

Дальнейшие рассуждения будут основаны на том, что передача информации осуществляется двоичными символами («0» и «1»). Причем при передаче символа «1» одноквантовый оптический импульс передается в волокно, а при передаче символа «0» – излучение отсутствует. Приемный модуль Боба выполнен в виде счетчика фотонов, который регистрирует фотоны оптического излучения только в течение времени передачи синхроимпульса, генерируемого на передающей стороне только на время передачи каждого символа, аналогично, как в работе [6]. Синхроимпульсы используются для обеспечения согласованной работы передающей и приемной сторон.

Существует вероятность приема символа «0» при передаче символа «1»  $P(0/1)$  и вероятность приема символа «1» при передаче символа «0»  $P(1/0)$ , которые определяют вероятность ошибки передачи данных. Согласно [6], такие ошибки обусловлены несовершенством приемной аппаратуры и связаны с квантовой эффективностью регистрации счетчика фотонов  $\eta_p$ , меньшей единицы, и вероятностью появления темновых импульсов  $P_t$ , большей нуля. Другими ошибками передачи данных можно пренебречь.

Вначале рассмотрим случай, когда Ева в канале связи отсутствует. При этом численные значения вероятностей  $P(0/1)$  и  $P(1/0)$  будут равны соответственно

$$P(0/1) = 1 - \eta_p, P(1/0) = P_t. \quad (1)$$

Тогда вероятность приема символа «0» при передаче символа «0»  $P(0/0)$  и вероятность приема символа «1» при передаче символа «1»  $P(1/1)$  равны:

$$P(0/0) = 1 - P_t, P(1/1) = \eta_p. \quad (2)$$

Пропускная способность рассматриваемого квантового канала связи определяется по формуле [6]:

$$C_{\max}|_{A-B} = \left\{ -\left(1 - P_t/2 - \eta_p/2\right) \log_2 \left(1 - P_t/2 - \eta_p/2\right) - \left(P_t/2 + \eta_p/2\right) \log_2 \left(P_t/2 + \eta_p/2\right) + \right. \\ \left. + 0,5 \left[ \left(1 - P_t\right) \log_2 \left(1 - P_t\right) + P_t \log_2 P_t \right] + 0,5 \left[ \left(1 - \eta_p\right) \log_2 \left(1 - \eta_p\right) + \eta_p \log_2 \eta_p \right] \right\} / \tau_b, \quad (3)$$

где  $\tau_b$  – среднее время передачи одного бита.

Рассмотрим случай, когда в канале связи присутствует Ева, осуществляя несанкционированный съем данных путем формирования канала утечки информации при помощи макроизгиба оптического волокна. Обозначим вероятность выхода фотона излучения из оптического волокна в результате такого съема данных как  $P_{\text{пот}}$ . Будем считать, что используемое Евой оборудование для регистрации фотонов является идеальным. Получить выражение для расчета пропускной способности между легитимными пользователями в этом случае можно по методике, описанной в [6] с учетом того, что вероятности  $P(0/0)$ ,  $P(1/0)$ ,  $P(1/1)$  и  $P(0/1)$  запишутся в следующем виде:

$$P(0/0) = 1 - P_t, P(1/0) = P_t, P(1/1) = \eta_p (1 - P_{\text{пот}}), P(0/1) = 1 - \eta_p (1 - P_{\text{пот}}). \quad (4)$$

Таким образом, пропускная способность квантового канала связи на участке «Алиса-Боб» равна:

$$C_{\max}|_{A-E-B} = \left\{ -\left(1 - P_t/2 - \eta_p/2 + \eta_p P_{\text{пот}}/2\right) \log_2 \left(1 - P_t/2 - \eta_p/2 + \eta_p P_{\text{пот}}/2\right) - \right. \\ \left. - \left(P_t/2 + \eta_p/2 - \eta_p P_{\text{пот}}/2\right) \log_2 \left(P_t/2 + \eta_p/2 - \eta_p P_{\text{пот}}/2\right) + \right. \\ \left. + 0,5 \left[ \left(1 - P_t\right) \log_2 \left(1 - P_t\right) + P_t \log_2 P_t \right] + \right. \\ \left. + 0,5 \left[ \left(1 - \eta_p + \eta_p P_{\text{пот}}\right) \log_2 \left(1 - \eta_p + \eta_p P_{\text{пот}}\right) + \left(\eta_p - \eta_p P_{\text{пот}}\right) \log_2 \left(\eta_p - \eta_p P_{\text{пот}}\right) \right] \right\} / \tau_b. \quad (5)$$

Следует отметить, что выражение (3) также можно получить на основании формулы (5), подставив в (5)  $P_{\text{пот}} = 0$ .

Несмотря на то, что используемое Евой оборудование для регистрации фотонов является идеальным, вероятность ошибки при приеме данных Евой не равна нулю. Это объясняется тем, что вероятность выхода фотона излучения из оптического волокна в результате съема данных при помощи макроизгиба волокна зависит от его диаметра [5]. Из этого следует, что на участке «Алиса-Ева» при регистрации данных Евой вероятности ошибки при передаче символа «0» и символа «1» равны соответственно нулю и  $1 - P_{\text{пот}}$ , а вероятности правильного приема символа «0» и символа «1» – единице и  $P_{\text{пот}}$ . Пропускную способность квантового канала связи на участке «Алиса-Ева» будем называть пропускной способностью канала утечки информации, для расчета которой можно использовать методику [6], с учетом приведенных выше рассуждений.

Таким образом, пропускная способность канала утечки информации равна:

$$C_{\text{max}}|_{A-E} = \left\{ -(1 - P_{\text{пот}}/2) \log_2(1 - P_{\text{пот}}/2) - (P_{\text{пот}}/2) \log_2(P_{\text{пот}}/2) + 0,5 \left[ (1 - P_{\text{пот}}) \log_2(1 - P_{\text{пот}}) + P_{\text{пот}} \log_2 P_{\text{пот}} \right] \right\} / \tau_b. \quad (6)$$

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

В качестве объектов исследования использовались счетчики фотонов на лавинных фотодиодах ФД-115Л, лавинных фотоприемниках со структурой металл – резистивный слой – полупроводник, серийно выпускаемое одномодовое оптическое волокно G.652.

Общая длина оптического волокна составляла 398 м. Макроизгиб формировался на расстоянии 198 м от источника оптического излучения; в процессе проведения эксперимента это расстояние не изменялось. Для создания макроизгибов использовались цилиндры различных диаметров  $D$ , на которых формировался один виток оптического волокна.

Диапазон изменения температуры фотоприемника счетчика фотонов составлял  $150 \div 300$  К.

На рис. 1 приведены зависимости пропускной способности канала утечки информации от диаметра макроизгиба для длин волн оптического излучения, наиболее часто используемых при передаче данных по оптическому волокну. Все графики нормированы на величину  $1/\tau_b$ .

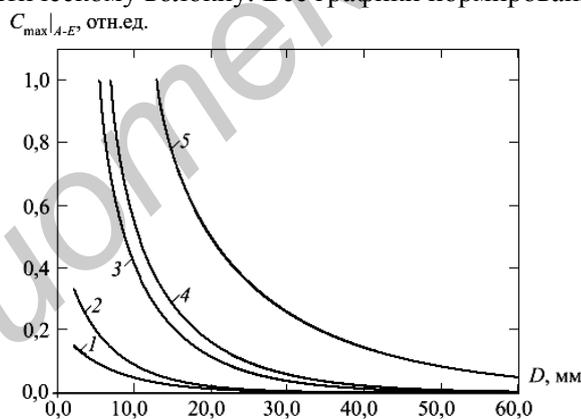


Рис. 1. Зависимость пропускной способности канала утечки информации от диаметра макроизгиба оптического волокна при длинах волн оптического излучения: 1 – 850 нм; 2 – 1310 нм; 3 – 1490 нм; 4 – 1550 нм; 5 – 1625 нм

Получено, что с уменьшением диаметра макроизгиба волокна увеличивается пропускная способность канала утечки информации. Наиболее сильно эта зависимость проявляется для длины волны 1625 нм и в меньшей мере – для длины волны 850 нм. С ростом длины волны оптического излучения увеличивается значение пропускной способности канала утечки информации. Таким образом, для обеспечения защиты информации от несанкционированного доступа, реализуемого посредством макроизгиба оптического волокна, для передачи данных целесообразно выбирать длину волны 850 нм, поскольку, в сравнении с другими исследуемыми длинами волн оптического излучения, для одного и того же диаметра макроизгиба количество информации, получаемой несанкционированным пользователем, будет наименьшим. В связи с этим далее все исследования проведены с использованием длины волны оптического излучения 850 нм.

Из формулы (5) видно, что пропускная способность канала связи на участке «Алиса-Боб» зависит от квантовой эффективности регистрации  $\eta_p$  и вероятности образования темновых

импульсов  $P_t$  счетчика фотонов. Согласно [6], уменьшение вероятностей ошибок в квантовом канале связи приводит к увеличению его пропускной способности. Таковыми вероятностями в рассматриваемом канале связи являются  $P(0/1)$  и  $P(1/0)$ , которые зависят соответственно от  $\eta_p$  и  $P_t$ . Из выражения (4) следует, что при постоянной величине  $P_{\text{пот}}$  с ростом  $\eta_p$  и с уменьшением  $P_t$  вероятности  $P(0/1)$  и  $P(1/0)$  уменьшаются, что приведет к росту  $C_{|A-E-B}$ . Повысить  $\eta_p$  и уменьшить  $P_t$  можно за счет снижения рабочей температуры фотоприемника, используемого в счетчике фотонов [7].

На рис. 2 представлена зависимость  $C_{|A-E-B}$  от вероятности  $P_{\text{пот}}$  для счетчика фотонов, построенного на базе лавинного фотодиода ФД-115Л, поскольку  $C_{|A-E-B}(P_{\text{пот}})$  для всех исследуемых фотоприемников имели схожий вид. Все графики нормированы на величину  $1/\tau_b$ .

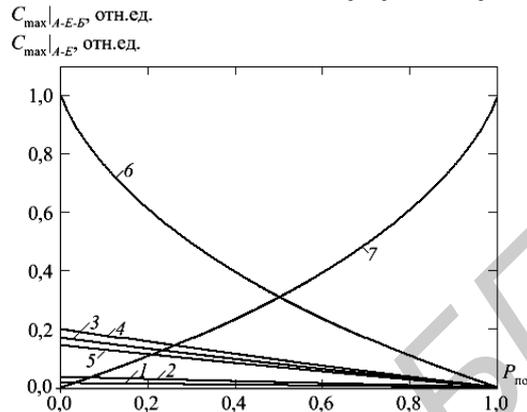


Рис. 2. Зависимость пропускной способности канала связи на участке «Алиса-Боб» (кривые 1–6) и канала утечки информации (кривая 7) от вероятности несанкционированного вывода оптического излучения из волокна: 1 –  $\eta_p = 0,03$ ,  $T = 300$  К; 2 –  $\eta_p = 0,07$ ,  $T = 263$  К; 3 –  $\eta_p = 0,30$ ,  $T = 233$  К; 4 –  $\eta_p = 0,35$ ,  $T = 193$  К; 5 –  $\eta_p = 0,26$ ,  $T = 150$  К; 6 –  $\eta_p = 1,00$  (для идеального случая, рассчитанного теоретически)

При проведении исследований средняя длительность времени передачи одного бита  $\tau_b$  оставалась неизменной и составляла 5 мкс. Это позволяло обеспечить вероятность появления темновых импульсов не более  $10^{-6}$ , которой при расчетах можно было пренебречь. Зависимости 6 и 7 рассчитаны согласно выражениям (5) и (6).

Как видно из приведенных зависимостей, с увеличением  $P_{\text{пот}}$  пропускная способность  $C_{\text{max}|A-E-B}$  уменьшается, а  $C_{\text{max}|A-E}$  растет. Такой характер изменения  $C_{\text{max}|A-E-B}(P_{\text{пот}})$  обусловлен тем, что осуществляемый Евой вывод мощности оптического излучения из волокна приводит к увеличению количества ошибочных регистраций символов «1» Бобом, за счет чего увеличивается энтропия потерь, и пропускная способность квантового канала связи на участке «Алиса-Боб» уменьшается. Напротив, увеличение  $P_{\text{пот}}$  уменьшает вероятность ошибки при приеме символов «1» и энтропию потерь канала связи «Алиса-Ева», поэтому  $C_{\text{max}|A-E}$  растет.

Из рис. 2 видно, что чем большую квантовую эффективность регистрации имеет счетчик фотонов, тем большей пропускной способностью обладает канал связи на участке «Алиса-Боб» при неизменной величине  $P_{\text{пот}}$ . Это объясняется тем, что при прочих равных условиях увеличение  $\eta_p$  приводит к увеличению вероятности  $P(1/1)$ , за счет чего снижается количество ошибочных регистраций символов «1» Бобом, и, следовательно, уменьшается энтропия потерь, как видно из формул (4) и (5).

Для случая, когда  $C_{\text{max}|A-E-B} = C_{\text{max}|A-E}$ , Еве будет известна вся информация, передаваемая от Алисы к Бобу. Из рис. 2 видно, что при  $\eta_p = 1$  точка пересечения зависимостей  $C_{\text{max}|A-E-B}(P_{\text{пот}})$  и  $C_{\text{max}|A-E}(P_{\text{пот}})$  соответствует значению вероятности  $P_{\text{пот}} = 0,5$ , однако с уменьшением квантовой эффективности счетчика фотонов эта точка сдвигается по оси  $P_{\text{пот}}$  в сторону нуля. Потеря информации в квантовом канале связи обусловлена выводом оптического излучения Евой через канал утечки информации. Оценить эту потерю можно с помощью коэффициента  $K$ , равного отношению  $C_{\text{max}|A-E-B}$  к  $C_{\text{max}|A-B}$ . В случае появления несанкционированного пользователя (Евы) в квантовом канале связи величина  $K$  становится меньшей единицы.

В таблице приведены значения  $K$  для различных квантовых эффективностей регистрации исследуемых фотоприемников, рассчитанные для  $P_{\text{пот}}$ , при которой выполняется условие  $C_{\text{max}|A-E-B} = C_{\text{max}|A-E}$ .

**Сравниваемые параметры квантового канала конфиденциальной волоконно-оптической связи**

Тип фотоприемника	Сравниваемые параметры	Рабочая температура, К				
		300	263	233	193	150
ФД-115Л	квантовая эффективность регистрации	0,03±0,01	0,07±0,01	0,30±0,03	0,35±0,04	0,26±0,03
	коэффициент $K$	1,0±0,3	0,9±0,1	0,8±0,1	0,7±0,1	0,8±0,1
	вероятность потерь $P_{пот}$	0,03	0,07	0,23	0,26	0,21
структура металл-резистивный слой-полупроводник	квантовая эффективность регистрации	0,04±0,01	0,06±0,01	0,30±0,03	0,27±0,03	0,15±0,02
	коэффициент $K$	1,0±0,2	0,9±0,2	0,8±0,1	0,8±0,1	0,9±0,1
	вероятность потерь $P_{пот}$	0,04	0,06	0,23	0,21	0,13

*Примечание: данные приведены для длительности передачи одного бита  $\tau_b = 5$  мкс, длины волны оптического излучения  $\lambda = 850$  нм и вероятности образования темновых импульсов  $P_t \leq 10^{-6}$ .*

Из представленных результатов видно, что с ростом квантовой эффективности регистрации уменьшается коэффициент  $K$  и увеличивается  $P_{пот}$ .

С учетом погрешности измерения квантовой эффективности регистрации и определения коэффициента  $K$  можно сделать вывод, что выявить наличие Евы в квантовом канале связи можно при значении  $\eta_p > 0,15$  с относительной погрешностью меньшей 13 %.

### Заключение

Построена математическая модель квантового канала связи, содержащего в качестве приемного модуля счетчик фотонов. Для этого канала связи получены выражения, с помощью которых можно определять его пропускную способность как на участке между легитимными пользователями, так и на участке между легитимной передающей стороной и нелегитимным пользователем. Выражения для оценки пропускной способности на участке между легитимными пользователями учитывают вероятность несанкционированного вывода мощности излучения из оптического волокна  $P_{пот}$ , а также такие параметры счетчика фотонов, как вероятность появления темновых импульсов  $P_t$  и квантовую эффективность регистрации  $\eta_p$ .

Установлено, что определить наличие Евы в квантовом канале можно при значении  $\eta_p > 0,15$  с относительной погрешностью меньшей 13 % и при вероятности образования темновых импульсов  $P_t \leq 10^{-6}$ .

*Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договоры №Т13-018, Т14М-130).*

### DETECTION OF UNAUTHORIZED USERS OF QUANTUM COMMUNICATION CHANNEL

I.R. GULAKOV, A.O. ZENEVICH, A.M. TIMOFEEV, A.G. KOSARI

#### Abstract

A mathematical model of the quantum communication channel has been built. It contains a photon counter as a receiving unit and allows to take into account how the quantum efficiency of detection, probability of dark pulses formation of the legitimate user receiver module, probability of optical radiation loss due to its unauthorized output from the optical fiber affect the throughput of a quantum communication channel.

### Список литературы

1. *Дмитриев С.А.* Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. М., 2010.
2. *Шубин В.В.* Способ обнаружения участков волоконно-оптической линии передачи с повышенным боковым излучением / Патент РФ № 2252405.
3. *Шубин В.В., Овечкин С.И., Ивченко С.Н.* Способ обнаружения медленного вывода оптического излучения через боковую поверхность волоконно-оптической линии связи / Патент РФ № 2251810.
4. *Попов С.Н., Шубин В.В.* Способ защиты информации от несанкционированного доступа в волоконно-оптических линиях связи / Патент РФ № 2234194.
5. *Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Тимофеев А.М. и др.* // Вестник связи. 2014. № 3(125). С. 46–49.
6. *Зеневич А.О., Комаров С.К., Тимофеев А.М.* // Электросвязь. 2010. № 10. С. 14–16.
7. *Гулаков И.Р., Зеневич А.О.* Фотоприемники квантовых систем: монография. Минск, 2012.

УДК 004.91+347.78.031

## ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Л.В. РУДИКОВА

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы  
Ожешко, 22, Гродно, 230023, Беларусь

Поступила в редакцию 2 октября 2014

Приводятся особенности архитектурной реализации системы, предназначенной для визуализации и обработки результатов спектрального анализа. Архитектурой системы предусмотрено наличие клиентов двух типов: десктопный клиент и клиентское приложение веб-браузера. Разработанное по предлагаемым принципам программное обеспечение позволит получать быстрые и точные результаты экспертизы, накапливать результаты спектрального анализа в базу данных для их последующей обработки, а также визуализировать, масштабировать и детализировать полученные спектры.

*Ключевые слова:* спектральный анализ, архитектура реализации, клиентское десктоп-приложение, приложение веб-браузера, база данных, сервисное приложение.

### Введение

При рассмотрении проблем, которые возникают при проведении лазерного спектрального микроанализа, можно выделить проблему идентификации и обработки эмиссионных спектров лазерной абляционной плазмы. Следует отметить, что некоторые особенности лазерной плазмы не позволяют полностью автоматизировать обработку спектров. В силу этого требуется тесное взаимодействие человека с программой, при помощи которой, спектр обрабатывается. Наличие графического интерфейса существенно упрощает и ускоряет работу с программой, а также делает ее интуитивно более понятной [1, 2].

Процесс обработки спектра можно разделить на несколько основных этапов.

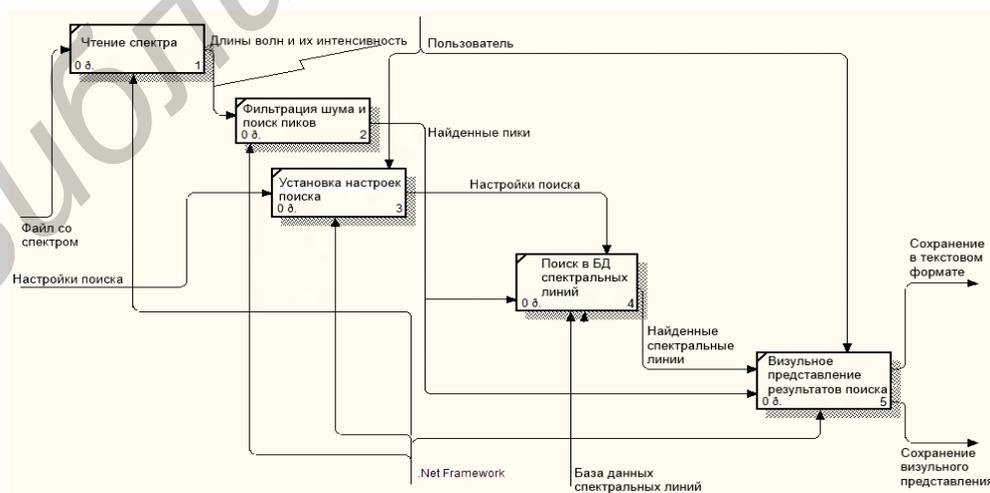


Рис. 1. Процесс обработки спектра

## Обработка спектра

Основное место в программном обеспечении, связанном с обработкой и визуализацией спектров, занимает поиск пиков. Отметим, что алгоритм поиска пиков основан на методе деконволюции сигналов и осуществляется в несколько этапов.

1. Вычисление фона сигнала. Результатом является информация, содержащая пики и фон. Данный метод основан на SNIP-алгоритме (Sensitive Nonlinear Iterative Peak):

$$V_p(i) = \min \left\{ V_{p-1}(i), \frac{[V_{p-1}(i+p) + V_{p-1}(i-p)]}{2} \right\}, \quad (1)$$

где  $p$  – номер итерации.

2. Вычисление сглаженного сигнала с помощью алгоритма, который базируется на дискретной цепи Маркова, которая имеет простое инвариантное распределение:

$$U_2 = \frac{P_{1,2}}{P_{2,1}} U_1, U_3 = \frac{P_{1,2}}{P_{2,1}} U_2 U_1, \dots, U_n = \frac{P_{n-1,n}}{P_{n,n-1}} U_{n-1} \dots U_2 U_1, \quad (2)$$

где  $U_1$  – определяется из нормализованного условия (3):

$$\sum_{i=1}^n U_1 = 1. \quad (3)$$

3. Вероятность изменения позиции пика от канала  $i$  к каналу  $i+1$ :

$$P_{i,i+1} = A_i \sum_{k=1}^m \exp \left( \frac{y(i \pm k) - y(i)}{y(i \pm k) + y(i)} \right), \quad (4)$$

где  $A_i$  – такая константа, что выполняется равенство:

$$P_{i,i-1} + P_{i,i+1} = 1. \quad (5)$$

4. Вычисляется вектор функции  $g$ , необходимой для решения уравнения свертки (6) (с учетом параметра функции поиска пиков):

$$f * g = h, \quad (6)$$

где  $h$  – записанный сигнал;  $f$  – восстановленный сигнал.

$g$  имеет вид:

$$G(i) = 1000 * e^{-\frac{[i-3*s]^2}{2*s^2}}, \quad (7)$$

где  $s$  – параметр функции поиска пиков.

Поиск пиков производится на восстановленном сигнале с учетом порогового значения, указанного в процентах. Пороговое значение высчитывается из значения наибольшего пика и означает, что пики, имеющие значение меньше порогового, не учитываются.

Для вычисления высоты и площади найденных пиков используется уровень фона, полученный ранее на первом этапе.

### Общая архитектура системы, связанной с визуализацией и обработкой результатов спектрального анализа

Для программного обеспечения, связанного с визуализацией и обработкой результатов спектрального анализа, была разработана 4-х уровневая архитектура, представленная на рис. 2.

Архитектурой системы предусмотрено наличие клиентов двух типов: десктопный клиент и клиентское приложение веб-браузера.



Рис. 2. Четырехуровневая архитектура универсальной системы, связанной с визуализацией и обработкой результатов спектрального анализа

Для централизованного доступа к системе предусмотрено веб-приложение, посредством которого могут быть реализованы следующие возможности.

1. Получение информации о типе организации, которой принадлежит данная система, типе исследуемых объектов и другой информации об организации.
2. Скачивание части библиотеки спектральных линий, собранной на основе исследований данной организации, если предусмотрен публичный доступ.
3. Предоставление веб-интерфейса для программирования. Данный API предоставляет возможности работы по поиску спектральных линий и функционал экспертных оценок, основанный на открытой части библиотеки спектральных линий данной организации, если таковая имеется.

Веб-приложение использует сервисы для доступа к бизнес-логике и использует реляционную БД MS SQL для хранения библиотек спектральных линий.

Для индивидуального пользования данной системой предусмотрено десктоп-приложение, которое предоставляет следующие возможности.

1. Загрузка и графическое отображение результатов измерений.
2. Поиск пиков и соответствующих спектральных линий в локальных файловых базах данных либо в централизованной БД.
3. Экспорт результатов работы в файл, изображение либо сохранение результатов в централизованную библиотеку спектральных линий.

Особенностью архитектуры десктоп-приложения является возможность доступа, как к уровню сервисов, так и к уровню бизнес-логики. Это позволяет легко преобразовать индивидуальное использование программы в централизованное. Для этого достаточно развернуть сервер базы данных и сервисы системы в интрасети.

Указанная особенность предполагает возможность хранения информации как в файлах на локальном компьютере, так и в централизованной библиотеке, основанной на реляционной базе данных MS SQL. Это позволяет, например, нескольким подразделениям в организации использовать соответствующие непересекающиеся хранилища информации, находящиеся в интрасети, а также составлять библиотеки спектральных линий для конкретного типа исследуемых объектов.

### **Общая архитектура реализации системы, связанной с визуализацией и обработкой результатов спектрального анализа**

Общая архитектура реализации системы визуализации и обработки результатов спектрального анализа представлена на рис. 3. Система представляется в виде трех уровней,

имеющих минимальные связи между собой. Перечислим уровни, составляющие систему: база данных (Database); Back-end, представленный сервисным приложением, и пользовательское приложение (Front-end).

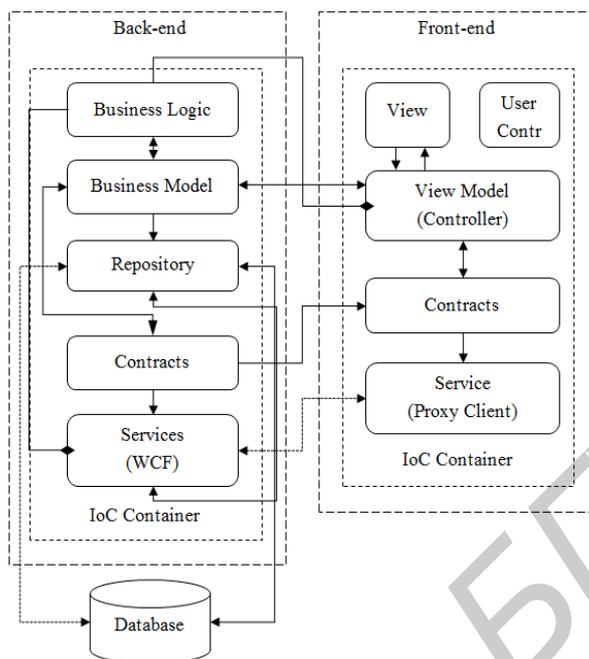


Рис. 3. Общая архитектура реализации

Для разработки предлагаемого программного обеспечения, поддерживающего лазерную экспрессную экспертизу, выбраны следующие технологии и инструменты разработки: платформа .Net Framework; объектно-ориентированный язык C#; СУБД MS SQL Server; Microsoft Enterprise Library.

Рассмотрим выделенные уровни и их компоненты более подробно.

**База данных (Database).** Данный уровень представляет собой отдельный сервер, на котором развернута СУБД. Уровень базы данных связан с сервисным проецированием бизнес-моделей на реляционные сущности БД с помощью репозитория (компонент Repository). Репозиторий также ответственен за работу с данными (сохранение, обновление, удаление, выборка). Основой репозитория является ADO.NET Entity Framework технология. Данная технология позволяет незаметно для разработчика преобразовывать LINQ-запросы и другие выражения в эквивалентные SQL-запросы и обратно – результаты выполнения запросов к объектам бизнес сущностей.

**Сервисное приложение (Back-end).** Сервисное приложение представлено WCF-сервисами. Для уменьшения зависимостей между компонентами данного уровня используется IoC-контейнер.

Уровень сервисного приложения включает в себя следующие компоненты.

1. Бизнес-логика (Business Logic). Реализация логики по работе со спектрами, логика экспертной системы, логика работы с бизнес-сущностями и др.

2. Бизнес-модели (Business Model). Определены сущности, отражающие предметную область в виде объектов системы.

3. Репозиторий (Repository). Реализация логики по работе с данными, формирование запросов к БД, проецирование бизнес-моделей на сущности БД, преобразование запросов в эквивалентные SQL-запросы и обратное преобразование результатов выполнения запросов к объектам бизнес-сущностей с использованием технологии ADO.NET Entity Framework, выбор провайдеров, в зависимости от типа БД.

4. Контракты (Contracts). Описание операций, реализуемых сервисом.

5. Сервисы (WCF Services). Реализация контрактов, предоставление конечных точек сервиса, определение протоколов, адресов, типов шифрования передачи данных и др.

*Пользовательское приложение (Front-end).* Уровень пользовательского приложения имеет зависимость от сервисного приложения в виде контрактов, реализованных сервисным приложением. Пользовательское приложение также включает компонент бизнес-моделей, для отображения информации, запрошенной у сервисного приложения.

Уровень пользовательского приложения включает в себя следующие компоненты: пользовательское представление (View); пользовательские элементы управления (User Controls); модель представления (View Model); контракты (Contracts) и сервисы (Service Proxy Client). Пользовательское приложение реализовано в виде двух клиентов: десктопного клиента и клиентского приложения веб-браузера.

Главное назначение десктопного клиента – быстро обрабатывать зарегистрированные спектры и предоставлять необходимые данные в удобном для пользователя виде (рис. 4).

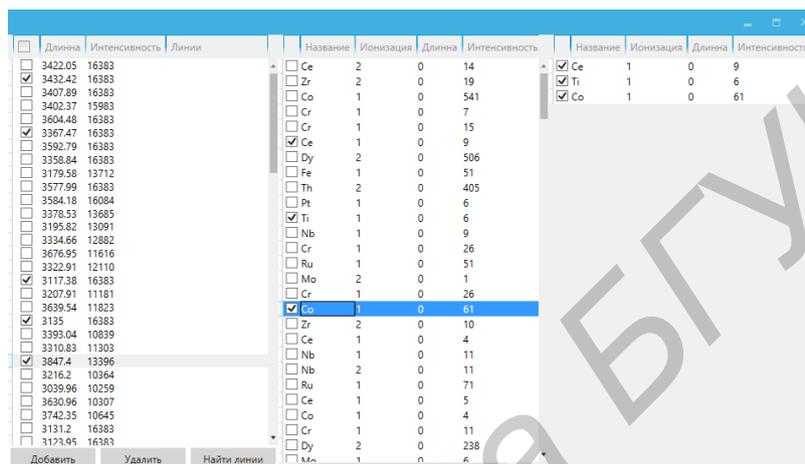


Рис. 4. Клиентское десктоп-приложение: окно задания параметров поиска спектральных линий

Разработанное приложение обеспечивает следующие возможности: считывание файлов, содержащих зарегистрированные спектры, группировка и сохранение их в истории; поиск пиков с возможностью отсека пиков по высоте и ширине; возможность настройки параметров шумоподавления для более точного определения границ пиков; возможность выбора различных баз данных (на данный момент NIST и max форматы) и поиск спектральных линий с возможностью настройки поиска; сохранение проделанной работы в виде графического изображения с подписанными линиями либо в базу данных, содержащую накопленные результаты работы других пользователей посредством сервисов.

Для уменьшения зависимостей между компонентами используется Unity Application Block (Unity). Unity реализует паттерн Dependency Injection (Внедрение зависимости). Таким образом, клиентское десктоп приложение зависит только от интерфейсов (контрактов), а не от самой реализации. Благодаря этому данное приложение легко расширяемо, даже сторонними модулями.

В разработанном приложении имеется две точки расширения функциональности: чтение файлов, содержащих зарегистрированные спектры и подключение различных баз данных спектральных линий. Расширение функциональности доступно посредством реализации определенных интерфейсов (ISpectrumFileReader (листинг 1) и ISpectrumLinesRepository (листинг 2), соответственно), которые доступны в динамически загружаемых библиотеках SpectrumAnalyser.Data.Files.SpectrumFileReaderContracts.dll и SpectrumAnalyser.Data.Files.SpectrumDatabaseContracts.dll соответственно, и подключением реализованных модулей (модули должны находиться в одной папке с приложением и быть названы SpectrumAnalyser.Data.Files.\*.dll). Модули расширения функционала должны быть написаны на языках семейства .Net 4.0.

### Листинг 1. Описание интерфейса ISpectrumFileReader

```
public interface ISpectrumFileReader
{
    SpectrumFile ReadSpectrumFile(FileInfo fileInfo);
    string SpectrumFileType { get; }
    IList<string> AcceptableExtensions { get; }
}
```

### Листинг 2. Описание интерфейса ISpectrumLinesRepository

```
public interface ISpectrumLinesRepository
{
    IList<Peak> FillMatchedPeaks(IList<Peak> peaks, SpectrumDbConnection
    connection, LinesSearchSettings linesSearchSettings);
    string ConnectionType { get; }
}
```

Свойства ConnectionType и SpectrumFileType должны быть уникальными в пределах всех реализаций соответствующих классов.

Данные модули загружаются при запуске приложения и регистрируются в Unity Container. Пример загрузки модулей поиска линий в спектральных базах приведен в листинге 3.

### Листинг 3. Загрузка модулей поиска линий в файловых БД

```
var currentLocation = Directory.GetCurrentDirectory();
var repositoryFiles =
    Directory.GetFiles(currentLocation, "SpectrumAnalyser.Data.Files.*.dll");
foreach (var repositoryFile in repositoryFiles)
{
    Assembly assembly = Assembly.LoadFile(repositoryFile);
    var allTypes = assembly.GetTypes().ToList();
    foreach (var allType in allTypes)
    {
        var fileReaderTypes = allType.GetInterfaces().Where(x =>
            x.GetTypeInfo().AsType() == typeof(ISpectrumFileReader));
        if (fileReaderTypes.Any())
        {
            var spectrumDataBaseInstance =
                (ISpectrumFileReader)Activator.CreateInstance(allType);
            UnityContainer.RegisterInstance(typeof (ISpectrumFileReader),
                spectrumDataBaseInstance.SpectrumFileType,
                spectrumDataBaseInstance);
        }
        var spectrumDataBaseTypes = allType.GetInterfaces().Where(x =>
            x.GetTypeInfo().AsType() == typeof (ISpectrumLinesRepository));
        if (spectrumDataBaseTypes.Any())
        {
            var spectrumDataBaseInstance = (ISpectrumLinesRepository)
                Activator.CreateInstance(allType);
            UnityContainer.RegisterInstance(typeof
                (ISpectrumLinesRepository),
                spectrumDataBaseInstance.ConnectionType
                spectrumDataBaseInstance);
        }
    }
}
```

После того как модули были зарегистрированы в Unity Container, их можно использовать в любой части кода, где доступен UnityContainer. Так как загрузки модулей поиска линий в спектральных базах регистрируются несколько раз по одному интерфейсу, то был введен уникальный параметр для данных модулей – тип базы. Одновременно в Unity Container может находиться только один модуль определенного типа базы данных.

*Клиентское приложение веб-браузера* реализовано с использованием технологии ХВАР (XAML Browser Application) и представляет собой полноценное WPF-приложение с некоторыми особенностями:

– приложение может быть встроено в HTML-страницу (с помощью тега <iframe>) либо загружено по прямому адресу и занимать всю область веб-страницы;

- приложение имеет ограниченные права в целях предотвращения выполнения потенциально опасного кода;
- приложение не требует инсталляции – при первой загрузке приложение кэшируется, но если приложение было обновлено на сервере, то на клиентской машине приложение кэшируется заново, таким образом клиент всегда работает с последней версией приложения;
- приложение может быть запущено только в браузерах Internet Explorer или Firefox;
- приложение имеет черты как веб-приложения (должно быть развернуто на сервере), так и многофункционального десктоп-приложения (использование преимуществ WPF).

Аналогично клиентскому десктоп-приложению, назначением приложения веб-браузера является быстрая обработка зарегистрированных спектров и предоставление данных в удобном для пользователя виде. Однако в сравнении с десктоп-приложением веб-приложение имеет ряд отличий. Во-первых, в качестве базы данных спектральных линий используется обобщенная библиотека спектральных линий (в десктоп-приложении возможно использование файловых БД). Во-вторых, конфигурация приложения хранится в базе данных (в десктоп-приложении используется конфигурационный файл). Приложение веб-браузера и десктоп-приложение имеют общую кодовую базу (пользовательские элементы управления, модели представления, конвертеры и др.), которая вынесена в отдельный проект. Отличием является запуск приложения, т.к. он производится в веб-браузере, а не в окне.

### **Заключение**

Приведены особенности архитектурной реализации системы, предназначенной для визуализации и обработки результатов спектрального анализа. Разработанное по предлагаемым архитектурным решениям программное обеспечение позволяет получать быстрые и точные результаты экспертизы, накапливать результаты спектрального анализа в базу данных для их последующей обработки, а также визуализировать, масштабировать и детализировать полученные спектры. Несомненно, предлагаемая разработка является актуальной и будет востребована при проведении экспертиз широкого круга объектов как в различных отраслях народного хозяйства Республики Беларусь, так и в научных исследованиях.

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

## **ARCHITECTURAL FEATURES OF THE IMAGING AND TREATMENT IMPLEMENTATION OF SPECTRAL ANALYSIS RESULTS**

L.V. RUDIKOVA

### **Abstract**

The architectural features of the implementation of a system for processing and visualization of results of spectral analysis is described. Architecture provides for a system of two types of clients: a desktop client and the client application is a web browser. Developed on the proposed principles software can afford to get fast and accurate results of the examination, to accumulate the results of spectral analysis in the database for further processing, as well as visualize, scale and detail the spectra.

### **Список литературы**

1. Рудикова Л.В. // Матер. IX Междунар. науч. конф. «Лазерная физика и оптические технологии». Гродно, 30 мая–2 июня 2012 г. С. 115–118.
2. Рудикова Л.В. // Докл. БГУИР. 2013. №3 (73). С. 26–32.

УДК 519.2:005

## ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ПРОГНОЗИРУЕМОСТИ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.В. ОВСЯННИКОВ

*Белорусский государственный университет  
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь*

*Поступила в редакцию 10 октября 2014*

Приведены необходимые теоретические сведения, обеспечивающие получения алгоритмов параметрической оценки информационной прогнозируемости стохастических процессов. Рассмотрены примеры алгоритмов оценивания информационной прогнозируемости для процессов, описываемых оптимальными разностными схемами, эквивалентными прогностическим моделям в виде стохастических дифференциальных уравнений.

*Ключевые слова:* информационная прогнозируемость, стохастический процесс, одношаговая плотность перехода, алгоритм оценки прогнозируемости.

### Введение

Введенная в работах [1, 2] функция информационной прогнозируемости (ИП), в общем случае, нестационарного стохастического процесса и его параметров, определяется изменением во времени количества информации Фишера относительно этих параметров или самого процесса в целом. Удобство такого подхода к определению прогнозируемости, в отличие от классических спектрально-корреляционных и энтропийных методов, состоит в следующем. Во-первых, в его естественной связи с информацией Фишера и, соответственно, алгоритмами оценивания, качественными и количественными характеристиками этих алгоритмов. Во-вторых, функция ИП строго положительна и имеет конкретное численное выражение для любого будущего момента времени. В-третьих, этот подход применим и к ИП стохастических систем, поведение которых описывается соответствующими стохастическими процессами.

Особый интерес представляет взаимосвязь функции ИП с величиной горизонта прогностической модели процесса, заданной стохастическим дифференциальным уравнением (СДУ) или нестационарной плотностью. Если предположить, что такая модель известна с точностью до постоянных коэффициентов, то вычисленная функция ИП количественно точно, с заданной достоверностью будет определять информацию о процессе в любые будущие моменты времени, соответствующие заданному горизонту прогностической модели.

В том случае, когда априорные данные о прогностической модели ограничены ее видом, требуется решать задачу параметрического оценивания (фильтрации) неизвестных коэффициентов модели по результатам текущих наблюдений. В рамках этой задачи нашли применение методы, работающие на коротких временных участках, в частности, адаптивные методы [3,4] и методы с использованием  $\varepsilon$ -стационарности наблюдаемой части временного ряда [5]. Однако, в первом случае рассматриваются лишь линейные разностные схемы с адаптацией коэффициентов экспоненциального сглаживания прогностических моделей, а во втором требуется решение дополнительной задачи по определению границ участка  $\varepsilon$ -стационарности [6] для построения соответствующих эволюционных уравнений выборочной функции распределения. В связи с этим в данной работе для оценки неизвестных коэффициентов параметрической прогностической модели предлагается использовать выборочную многомерную плотность вероятности (ВМП), сформированную из одношаговых

плотностей перехода (ОПП) марковского процесса.

Цель работы состоит в исследовании и получении теоретических инструментов, обеспечивающих определение информационной прогнозируемости стохастических процессов с использованием алгоритмов оценки параметров прогностической модели.

### Теоретические инструменты параметрической оценки информационной прогнозируемости стохастического процесса

Будем рассматривать процесс, модель которого в непрерывном времени представляется СДУ:  $\dot{y}(t) + a(t, y) = g(t)\zeta(t)$ , где  $a(t, \xi)$ ,  $g(t)$  – известные детерминированные функции удовлетворяющие условию Липшица,  $\zeta(t)$  – нормальный белый шум с нулевым средним  $\langle \zeta(t) \rangle = 0$  и дельтаобразной корреляционной функцией  $\langle \zeta(t)\zeta(t') \rangle = N\delta(t'-t)/2$ ,  $N$  – односторонняя спектральная плотность. Оптимальная разностная схема, при понимании СДУ в форме Ито, имеет вид [7]

$$y_{i+1} = y_i - \Delta a_i + \Delta g_i \zeta_i, \quad i = \overline{1, k}, \quad (1)$$

где  $\Delta = t_{i+1} - t_i$  малый интервал времени, на котором слева и справа интегрируется СДУ,  $a_i = a(t_i, y_i)$ ,  $\zeta_i = (1/\Delta) \int_{t_i}^{t_i+\Delta} \zeta(t) dt$ ,  $b(t_i) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} (N/2\Delta) \int_{t_i}^{t_i+\Delta} g^2(t) dt$  – коэффициент диффузии (в случае  $g = \text{const}$  этот коэффициент равен  $b = Ng^2/2$ ),  $M_i = y_i - \Delta a_i$  – математическое ожидание,  $D_i = b(t_i)\Delta$  – дисперсия. Глобальная среднеквадратическая погрешность разностной схемы (1) определяется величиной [7]:  $\sigma \leq \Delta \left( \int_0^T M \left[ (a'_y g(t))^2 \right] dt \right)^{1/2}$ ,  $T = k\Delta$ . В дальнейшем, там где это не вызывает сомнений, зависимость функций от аргументов опускается.

При наблюдении на интервале времени  $[t_1; t_k]$  имеется последовательность  $Y = [y_1, \dots, y_k]$  и соответствующая ей ВМП  $P_k = P(Y|X)$ , где  $X = \{x_q\}$ ,  $q = \overline{1, Q}$  – набор независимых параметров ВМП. В качестве такого набора параметров ВМП могут выступать, например, математическое ожидание процесса, его дисперсия, любой другой параметр, зависящий от времени.

Согласно работам [1,2] ИП одного из параметров  $x_q$  ВМП  $P_k$ , в общем случае, нестационарного стохастического процесса определяется выражением

$$IP_{x_q}(t_k) = \left\langle \left( \partial \ln P_k / \partial x_q \right)^2 \right\rangle_Y, \quad (2)$$

а ИП процесса в целом есть неотрицательная функция

$$IP_Y(t_k) = \left\langle \left( \partial \ln P_k / \partial t_k \right)^2 \right\rangle_Y = \sum_q x_q^2 IP_{x_q}(t_k). \quad (3)$$

Таким образом, оценка ИП состоит в последовательном вычислении ВМП  $P_k$  и, далее, непосредственном использовании формул (2) и (3). Наличие априорной информации об элементах уравнения (1) или параметрах ВМП приводит соответственно к параметрическим или непараметрическим алгоритмам. В этой статье рассматриваются только параметрические алгоритмы. В этом случае ВМП удобно представить в виде

$$P_k = C_k^{-1} \exp \left( - \sum_{i=0}^{k-1} B_{i+1,i} \right), \quad (4)$$

где  $B_{i+1,i} = B[y_{i+1}, y_i, X_i]$  – семейство известных параметрических функций,  $X_i = X(t_i, \Theta)$  – значение параметра ВМП в  $i$ -тый момент времени,  $\Theta$  – набор неизвестных параметров плотности, требующих оценки,  $P_1$  – плотность вероятности начальной координаты,

$B_{1,0} = B[y_1, X_1]$ ,  $C_k$  – нормирующий множитель. Если выбрать функции  $B_{i+1,i} = -\ln(c_{i+1,i} \pi_{i+1,i})$ , где  $\pi_{i+1,i}$  – одношаговая плотность перехода,  $c_{i+1,i}$  – нормирующие множители, связь между выражением (4) и выборочным эмпирическим функционалом (ВЭФ) определяется зависимостью  $W_k = k^{-1} \left[ \sum_{i=0}^{k-1} B_{i+1,i} - \ln C_k^{-1} \right]$ . В этом случае функция  $B_{i+1,i}$  представляет собой частную информационную функцию потерь. Положив  $C_k = \left( \prod_{i=0}^{k-1} c_{i+1,i} \right)$ , получим

$$P_k = \prod_{i=0}^{k-1} \pi_{i+1,i} \quad (5)$$

и, следовательно, ВЭФ принимает вид  $W_k = -\ln(P_k) / k$ .

Теперь, с учетом (5), входящие в формулу (2) компоненты можно представить в виде  $\ln P_k = \sum_{i=0}^{k-1} \ln \pi_{i+1,i}$ ,

$$\left( \frac{\partial \ln P_k}{\partial x} \right)^2 = \left( \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\partial \ln \pi_{i+1,i}}{\partial x_i} \right)^2 = \sum_{i=0}^{k-1} \left( \frac{\partial \ln \pi_{i+1,i}}{\partial x_i} \right)^2 + 2 \sum_{i=0}^{k-2} \sum_{j=i+1}^{k-1} \frac{\partial \ln \pi_{i+1,i}}{\partial x_i} \frac{\partial \ln \pi_{j+1,j}}{\partial x_j}.$$

На основании последних формул, рекуррентная формула вычисления информационной прогнозируемости (2) следующая:  $IP_{x_q}(t_k) = IP_{x_q}(t_{k-1}) + IP_{x_q}(\Delta t_k)$ , где одношаговая ИП

$$IP_{x_q}(\Delta t_k) = \left\langle \left( \frac{\partial \ln \pi_{k,k-1}}{\partial x_{k-1}} \right)^2 \right\rangle_Y + \left\langle 2 \sum_{i=0}^{k-2} \frac{\partial \ln \pi_{i+1,i}}{\partial x_i} \frac{\partial \ln \pi_{k,k-1}}{\partial x_{k-1}} \right\rangle_Y.$$

В качестве задаваемой (или считающейся известной) ОПП, используется плотность формальной конструкции – обобщенное нормальное распределение

$$\pi_{i+1,i} = B(u) \exp\left(-A(u) \left( |y_{i+1} - M_i| / \sqrt{D_i} \right)^u \right), \quad u \geq 0,5, \quad (6)$$

где  $A(u) = (\Gamma(3/u) \Gamma^{-1}(1/u))^{u/2}$ ,  $B(u) = A(u)^{1/u} / (2\sqrt{D_i} \Gamma(1+1/u))$ ,  $\Gamma(z)$  – гамма-функция. Наиболее часто такие модели используются с параметром  $u \in \{0,5; 1; 2\}$ .

Далее, для иллюстрации излагаемого подхода, ограничимся рассмотрением задачи оценки прогнозируемости параметров гауссовского процесса (математического ожидания и дисперсии), являющейся, пожалуй, самой распространенной в рамках задачи прогнозируемости, т.е.  $x = [M_i, D_i]$  и  $u = 2$ . Формула (5) примет следующий известный вид

$$P_k = \left[ (2\pi)^k \det(D_k) \right]^{-1/2} \exp\left(-\frac{1}{2} (Y - M_k)^T D_k^{-1} (Y - M_k) \right), \quad (7)$$

где вектор  $M_k = \{M_i\}$ , матрица  $D_k = \text{diag}\{D_i\}$ ,  $D_i = f(t_i, d)$   $i = \overline{1, k}$ ,  $d = \{d_v\}$  – набор неизвестных параметров функции масштаба (дисперсии)  $v = \overline{0, V}$ . Тогда, для прогнозируемости математического ожидания, справедлива формула

$$IP_x(t_k) = \sum_{i=0}^{k-1} \int \int_{y_{i+1} y_i} \left( \frac{\partial \ln \pi_{i+1,i}}{\partial x} \right)^2 P(y_i, y_{i+1}) dy_i dy_{i+1}, \quad x = [M_i, D_i].$$

Таким образом, для ОПП (6) с параметром  $u = 2$ , на основании последних выражений, получаем:

$$IP_M(t_{k+m}) = \text{tr}(D_{k+m}^{-1}) = \sum_{i=1}^k D_{i+m}^{-1}, \quad (8)$$

$$IP_D(t_{k+m}) = 0,5 \sum_{i=1}^k D_{i+m}^{-2}, \quad m = 0, 1, \dots \quad (9)$$

Здесь индекс  $m$  означает прогнозируемость соответствующих параметров стохастического процесса по результатам его наблюдения на интервале  $[t_1, \dots, t_k]$  на будущие моменты времени  $t_{k+m}$ . На интервале  $[t_1, \dots, t_k]$  формируется оценка вектора неизвестных  $\Theta_k^* = d_k^*$ , входящих в функции  $D$ . Таким образом, задача оценки прогнозируемости параметров  $[M, D]$  и самого стохастического процесса в целом у сводится к оценке выборочной дисперсии  $D^*$ , точнее коэффициентов  $d^*$ . Такую оценку можно получить, используя стандартные статистические процедуры, применяемые к формулам (6), (7) и ВЭФ  $W_k$ .

Далее необходимо сделать следующее важное замечание. Поскольку для выборочных моментов нестационарных рядов отсутствуют утверждения об их состоятельности как оценок моментов соответствующих распределений, то нет необходимости определять их так, чтобы они давали несмещенную оценку, как в случае стационарных рядов [5]. При этом использование таких выборочных моментов не предполагает их асимптотической несмещенности, т.к. асимптотическая сходимость не определена для таких процессов ни в слабом смысле, ни по вероятности. Однако в данной работе неизвестные функции  $D_i$ , входящие в формулы (8), (9), считаются параметрически заданными, оценке подлежат только неизвестные коэффициенты  $d$ , и, в этом случае, применение метода максимального правдоподобия приводит к оценкам, которые, как и все оценки этого вида, являются состоятельными, асимптотически эффективными и асимптотически нормальными [8, 9].

Метод максимального правдоподобия дает систему оценок для вектора  $d$  в точке  $d = d^*$ :

$$\frac{\partial W_k}{\partial d_i} = \frac{\partial W_k}{\partial D_k} \frac{\partial D_k}{\partial d_i} = 0, \quad \frac{\partial W_k}{\partial D_k} = \frac{\partial W_k}{\partial D_k} = \frac{1}{2} \det(D_k)^{-1} - \frac{1}{2} (Y - M_k)^T D_k^{-2} (Y - M_k). \quad (10)$$

Рассмотрим пример оценки прогнозируемости для стохастического процесса следующего вида:  $\dot{y}(t) + \mu y(t) = \sqrt{gt} \zeta(t)$ ,  $t > 0$ ,  $y(t_1) = y_1$  – начальное значение координаты,  $\mu > 0$  – известный параметр,  $g > 0$  – неизвестный параметр. Оптимальная разностная схема, эквивалентная приведенному СДУ:  $y_{i+1} = (1 - \Delta\mu)y_i + \Delta\sqrt{gt_i} \zeta_i$ . Математическое ожидание и дисперсия ОПП соответственно равны  $M_i = (1 - \Delta\mu)y_i$ ,  $D_i = dt_i$ ,  $d = gN\Delta/2$ . Тогда, с учетом соотношений (10), получаем в явном виде оценку

$$d_k^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{(y_{i+1} - M_i)^2}{t_i}, \quad (11)$$

или в случае  $\Delta \ll 1$

$$d_k^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{(y_{i+1} - ry_i)^2}{t_i}, \quad r = \exp(-\Delta\mu), \quad (12)$$

откуда неизвестное значение  $g$  равно:

$$g_k^* = \frac{2}{N\Delta k} \sum_{i=1}^k \frac{(y_{i+1} - ry_i)^2}{t_i}.$$

Теперь, с учетом определенных величин, оценки (8), (9) примут окончательный вид

$$IP_M^*(t_{k+m}) = (d_k^*)^{-1} tr(t_{k+m}^{-1}) = (d_k^*)^{-1} \sum_{i=1}^k t_{i+m}^{-1}, \quad (13)$$

$$IP_D^*(t_{k+m}) = 0,5(d_k^*)^{-2} \sum_{i=1}^k t_{i+m}^{-2}, \quad m = 0, 1, \dots \quad (14)$$

Если положить  $t_i = i\Delta$ , то оценки (13) и (14) примут вид

$$IP_M^*(t_{k+m}) = (\Delta d_k^*)^{-1} [H(k+m) - H(m)], \quad (15)$$

$$IP_D^*(t_{k+m}) = 0,5(\Delta d_k^*)^{-2} [\Psi_1(1+m) - \Psi_1(1+k+m)], \quad (16)$$

где  $\Psi_n(z) = \Psi^{(n)}(z)$ ,  $\Psi(z) = \Gamma'_z(z) / \Gamma(z)$ ,  $H(n)$  –  $n$ -ое гармоническое число.

Отметим, разность  $H(k+m) - H(m)$  представляет собой скользящее по  $m$  временное окно, в котором производится суммирование частичного гармонического ряда длиной  $k$  элементов. При использовании известной приближенной формулы Эйлера, формула (15) может быть заменена на следующую  $IP_M^*(t_{k+m}) \approx (\Delta d_k^*)^{-1} \ln(1 + k/m)$ .

Прогнозируемость стохастического процесса в целом, определяемая формулой (3), на основании (13) и (14) равна

$$IP_Y(t_{k+m}) = \sum_q \dot{x}_q^2 IP_{x_q}(t_k) = 0,5 \sum_{i=1}^k t_{i+m}^{-2}, \quad m=0,1,\dots,$$

и, если  $t_i = i\Delta$ , то

$$IP_Y^*(t_{k+m}) = 0,5(\Delta)^{-2} [\Psi_1(1+m) - \Psi_1(1+k+m)], \quad m=0,1,\dots \quad (17)$$

Однако оценки типа (11) и (12) в явном виде, возможны лишь для ограниченного класса СДУ. В практически важных и более реалистичных случаях приходится прибегать к методам последовательного поиска решения. Так, например, рассмотрим СДУ более общего вида:

$\dot{y}(t) + \mu y(t) = \sqrt{\sum_{v=0}^V g_v t^v} \zeta(t)$ ,  $y(t_1) = y_1$  – начальное значение координаты,  $\mu > 0$  – известные параметры,  $g_0, g_1 > 0$  – неизвестный параметр. Такого рода СДУ могут быть использованы для описания процессов с медленными нестационарными изменениями, процессов установления, процессов ухода из контрольной зоны, процессов, описывающих метрологические характеристики аппаратно-технических средств в теории надежности. Оптимальная разностная схема, эквивалентная приведенному СДУ:  $y_{i+1} = (1 - \Delta\mu)y_i + \Delta\sqrt{\sum_{v=0}^V g_v t_i^v} \zeta_i$ . Математическое ожидание и дисперсия ОПП равны  $M_i = (1 - \Delta\mu)y_i$ ,  $D_i = \sum_{v=0}^V d_v t_i^v$ ,  $d_v = g_v N \Delta / 2$ ,  $v = \overline{0, V}$ .

Тогда на основании соотношений (10) получаем систему уравнений для точки  $d = d^*$ :

$$\frac{\partial W_k}{\partial d_v} = -\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{\partial \ln \pi_{i+1,i}}{\partial d_v} \Big|_{d=d^*} = -\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k t_i^v D_i^{-1} [(y_{i+1} - r y_i)^2 D_i^{-1} - 1] \Big|_{d=d^*} = 0, \quad \Delta \ll 1, \quad v = \overline{0, V}.$$

Для решения этого уравнения можно воспользоваться известными методами стохастической аппроксимации, структура которых, в общем случае, имеет вид

$$d_{i+1}^* = d_{i+1}^0 - \mathbf{K}_{i+1} \frac{\partial \ln \pi_{i+1,i}}{\partial d_v} \Big|_{d=d^*}, \quad i = \overline{1, k-1} \quad (18)$$

где  $d_{i+1}^0$  – найденное одним из известных способов [8,10] предварительное значение оценки;  $\mathbf{K}_{i+1}$  – матрица, определяющая конкретный вид стохастической аппроксимации [8]; начальные условия для уравнения (18)  $d_1^0$ ,  $\mathbf{K}_1$  выбираются исходя из имеющейся в наличии априорной информации. Рекуррентные оценки максимального правдоподобия (18) при общих условиях регулярности состоятельны, асимптотически эффективны и асимптотически нормальны [9]. Уравнения (18) образуют замкнутую систему оценки параметров  $d_v^*$ .

### Моделирование алгоритмов оценки прогнозируемости стохастического процесса

Исследуем оценку прогнозируемости стохастического процесса, описанного выше:  $\dot{y}(t) + \mu y(t) = \sqrt{gt} \zeta(t)$ . Для оценки параметра масштаба  $d_k^*$  удобно воспользоваться последовательным алгоритмом экспоненциального сглаживания, эквивалентным (11), (12):

$$d_{i+1}^* = d_i^* + \frac{1}{i+1} \left( \frac{(y_{i+1} - r y_i)^2}{t_i} - d_i^* \right), \quad i = \overline{1, k-1}. \quad (19)$$

На рис. 1 представлены результаты оценки функции прогнозируемости математического ожидания  $IP_M^*(t_{k+m})$  (формула (15);  $\Delta = 0,1$ ;  $\mu = 1$ ) в сопоставлении с функцией  $IP_M(t_{k+m})$  (при известном  $d = 1$ ) для двух значений количества шагов прогноза  $m = 100$  (кривые 1, 3) и  $m = 500$  (кривые 2, 4) при изменении объема накопленных данных по

которым производилась оценка  $d_k^*$  ( $k = \overline{1, 2000}$ ). Кривые 3 и 4 получены с использованием алгоритма оценки (19). На рисунке 2 приведены зависимости прогнозируемости стохастического процесса в целом, полученные по формуле (17). Кривая 1 соответствует величине накопления  $k = 50$ , а кривая 2 –  $k = 100$ . Изменение прогнозируемости показано на интервале прогнозных значений индекса  $m = \overline{50, 400}$ .

Полученные в ходе моделирования результаты физически обоснованы. Во-первых, при одинаковых объемах накопления данных о стохастическом процессе (величина  $k$ ) с увеличением индекса  $m$  ИП математического ожидания уменьшается (рис. 1). Во-вторых, оценка ИП, полученная на основе приведенных алгоритмов, адекватна теоретической (рис. 1). В-третьих, с увеличением интервала наблюдения (величина  $k$ ) возрастает и величина ИП (рис. 2).

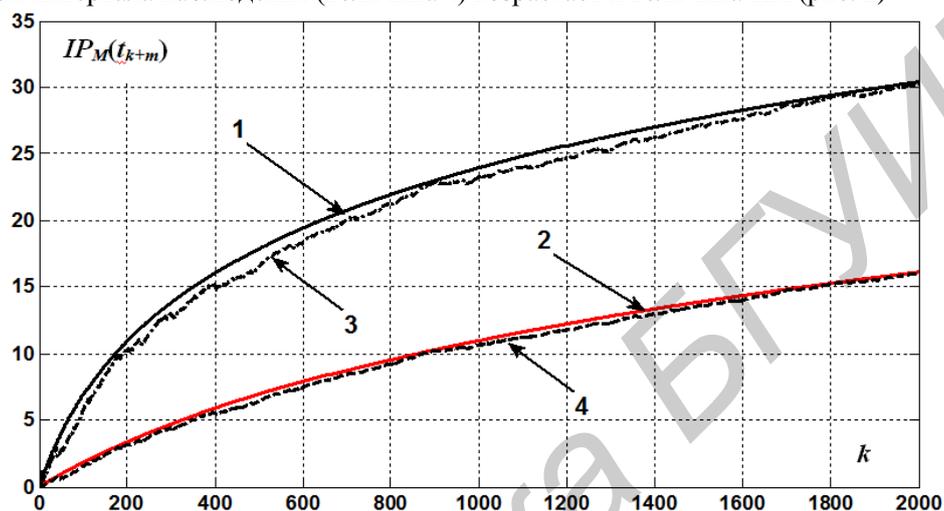


Рис.1. Информационная прогнозируемость математического ожидания: 1 –  $IP_M(t_{k+100})$ ; 2 –  $IP_M(t_{k+500})$ ; 3 –  $IP_M^*(t_{k+100})$ ; 4 –  $IP_M^*(t_{k+500})$ .

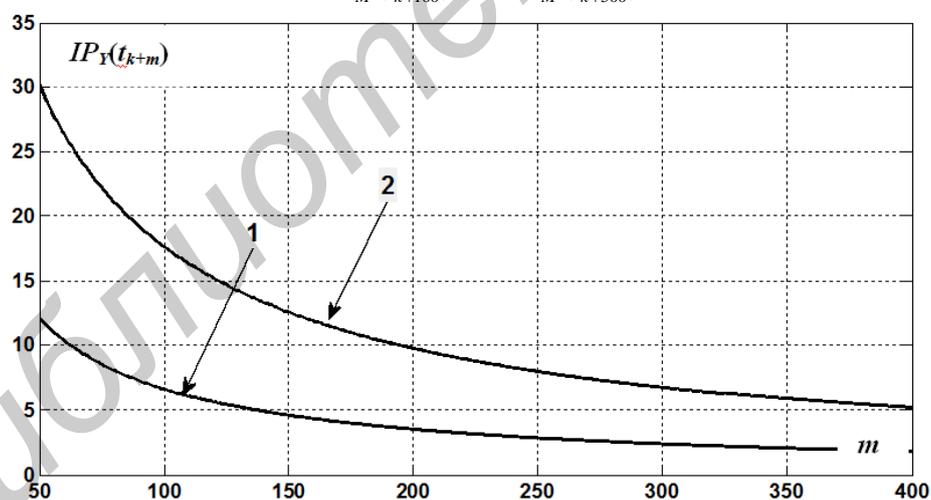


Рис.2. Информационная прогнозируемость процесса: 1 –  $IP_Y(t_{50+m})$ ; 2 –  $IP_Y(t_{100+m})$

### Заключение

Рассмотрены вопросы параметрической оценки информационной прогнозируемости стохастических процессов. Показано, что эта оценка связана с оценкой параметров ВМП, формируемой по результатам наблюдений. Выбор вида ОПП, как компонента ВМП, может быть осуществлен из практических соображений простоты вычислений и адекватности представления реальной ситуации. ОПП являются удобными аналитическими моделями с физически понятными при их использовании результатами.

С теоретической точки зрения оценка информационной прогнозируемости интересна и

как классификационный параметр стохастического процесса, изменяющийся во времени, и как параметр, функционально связанный с самим прогнозируемым процессом. Практическая значимость этой оценки, осуществляемой в реальном времени, состоит в том, что она может способствовать выбору наиболее адекватного метода прогнозирования или адаптивной его настройке.

## ASSESSMENT OF INFORMATION PREDICTABILITY OF STOCHASTIC PROCESSES

A.V. AUSIANNIKAU

### Abstract

The necessary theoretical information for parameter estimation algorithms informational predictability of stochastic processes are given. We consider examples of algorithms for estimating the predictability of information for the processes described by the optimal difference schemes, equivalent prognostic models in the form of stochastic differential equations are considered.

### Список литературы

1. *Овсянников А.В.* // Докл. БГУИР. 2014, № 6 (84). С. 48–54.
2. *Овсянников А.В., Козел В.М.* // Докл. БГУИР. 2014. № 8 (86). С. 48–53.
3. *Лукашин Ю.П.* Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. М., 2003.
4. *Давнис В.В., Тинякова В.И.* Адаптивные модели: анализ и прогноз в экономических системах. Воронеж, 2006.
5. *Орлов Ю.Н., Осминин К.П.* Нестационарные временные ряды: Методы прогнозирования с примерами анализа финансовых и сырьевых рынков. М., 2011.
6. *Орлов Ю.Н., Осминин К.П.* // Информационные технологии и вычислительные системы. 2008. № 3. С. 3–13.
7. *Никитин Н.Н., Разевиг В.Д.* // Журнал вычислит. матем. и математич. физики. 1978. Т 18, № 1. С.106–117.
8. *Цыпкин Я.З.* Информационная теория идентификации. М., 1995.
9. *Ибрагимов И.А., Хасьминский Р.З.* Асимптотическая теория оценивания. М., 1979.
10. *Тартаковский Г.П.* Теория информационных систем. М., 2005.

УДК [004.42:616]:159.59

## **ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА**

Н.Л. БОБРОВА

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

*Поступила в редакцию 15 октября 2014*

Приведена структура программно-аппаратного комплекса, предназначенного для проведения психофизиологического исследования, позволяющего автоматизировать и оптимизировать процедуру проведения обследований. Одним из компонентов программной системы является система поддержки и принятия решений, реализованная на основе разработанных алгоритмов.

*Ключевые слова:* психофизиологическое состояние, визуальные стимулы, скорость реакции, функциональная готовность, система поддержки и принятия решений.

### **Введение**

Установлено, что неэффективность профессиональной деятельности примерно на 80 % обусловлена физиологическими, психическими и социально-психологическими особенностями работников. Некоторые работники быстро усваивают трудовые навыки и достигают профессионального совершенства, у других же процесс овладения профессией затягивается, и как следствие – работодатель несет убытки, а человек теряет к профессии интерес и меняет вид деятельности. В настоящее время эта проблема достаточно актуальна, поскольку значительная конкуренция на рынке труда побуждает людей осваивать порой совершенно неподходящую для них профессию [1].

Поэтому процессы профессионального становления и управления профессиональной деятельностью персонала требуют специальных знаний и умений в области выявления психофизиологических механизмов оптимального обеспечения трудовых функций. Это делает возможным своевременно определить степень профессиональной пригодности человека к конкретному виду деятельности посредством всестороннего изучения его личности: изучения уровня соответствия физических качеств и психофизиологических особенностей индивида к профессиональным требованиям. В настоящее время для изучения и контроля психофизиологических особенностей индивида все больше и больше привлекают технические средства, в частности ЭВМ.

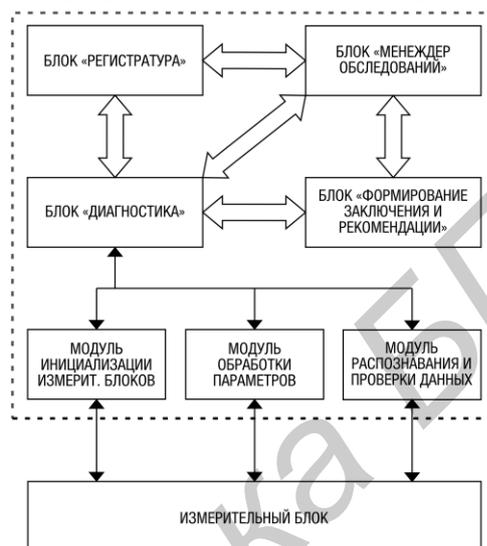
### **Методика эксперимента**

Программный комплекс предназначен для проведения психофизиологического исследования, включающего предъявление визуальных стимулов и измерение скорости реакции, и определения функциональной готовности. Одним из компонентов программной системы является система поддержки и принятия решений, реализованная на основе разработанных алгоритмов.

Выбор методик, которые могут быть использованы для обследования психофизиологического состояния организма человека, должен быть обусловлен диагностическими возможностями методов, их безопасностью и комфортностью их

проведения, а также малым временем, требуемым на проведение измерений. Для отбора методик были сформулированы следующие критерии: неинвазивность; портативность; актуальность использования; время обследования; возможность проведения обследования тренером; инструктором или спортивным врачом; отсутствие специфических требований к помещению; возможность использования в полевых условиях, на сборах; возможность автономной работы (без внешних источников питания); представление результатов в формализованном виде; предпосылки к широкому внедрению метода (сертификаты, документация) [2].

Программный комплекс включает следующие блоки: блок «Регистратура», блок «Менеджер обследований», блок «Диагностика», блок «Формирование заключения и рекомендаций». Схема построения программного обеспечения представлена на рисунке.



Структурная схема организации программного обеспечения

Блок «Регистратура» позволяет регистрировать новых испытуемых, вносить и корректировать данные карточек из базы данных, вести список посещений и организовывать статистический анализ по базе данных. Блок «Менеджер обследований» содержит информацию об обследуемых, результаты проведенной диагностики и сформулированные заключения и рекомендации. Блок «Диагностика» предназначен для проведения измерений и работает с аппаратными средствами диагностики, входящими в состав комплекса. Блок «Формирование заключения и рекомендаций» осуществляет анализ данных согласно разработанной системе поддержки и принятия решений и вывод общего заключения о состоянии организма человека.

Психофизиологическое тестирование для комплексного контроля функционального состояния центральной нервной системы включает теппинг-тест, оценку показателей простой (ПЗМР) и сложной зрительно-моторной реакции (СЗМР), реакции на движущийся объект (РДО).

*Реализация методики «Простая зрительно-моторная реакция» (ПЗМР).* При появлении сигнала (сигналы появляются в разных местах монитора) необходимо как можно быстрее нажать на клавишу. Система должна регистрировать время реакции на каждый сигнал (фигуру красного цвета). Оценка результатов производится на основании среднего значения времени реакции: чем оно меньше, тем выше скорость реагирования и тем более подвижной является нервная система, тем лучше сенсорно-моторная реакция, тем выше уровень функциональных возможностей центральной нервной системы.

*Реализация методики «Сложная зрительно-моторная реакция» (СЗМР).* При появлении сигнала (сигналы появляются в разных местах монитора) необходимо как можно быстрее нажать на соответствующую клавишу, не допуская ошибок. Система должна регистрировать время реакции на каждый сигнал (фигуры разных цветов) и правильность фиксации. Оценка результатов производится на основании среднего значения времени реакции: чем оно меньше, тем выше скорость реагирования и тем более подвижной является нервная

система, тем лучше сенсорно-моторная реакция, тем лучше уровень функциональных возможностей центральной нервной системы. В отличие от простой реакции, реакция различения осуществляется на один определенный стимул из нескольких разнообразных стимулов. Поэтому процесс обработки сенсорной информации центральной нервной системой происходит не только по принципу наличия либо отсутствия сигнала, но и по принципу различения сигналов.

*Реализация методики теппинг-теста.* Разбить область для тестирования на 6 частей. По очереди, в каждой части, кликать мышью максимально быстро. Передвижение по частям тестируемой области осуществлять по часовой стрелке через каждые 10 с. В процессе тестирования замерять количество кликов в каждой области. По результатам построить график. На основании построенного графика делать вывод о типе нервной системы.

Для оценки результатов, полученных по каждой методике, будут использованы методы, приведенные ниже.

*Простая зрительно-моторная реакция.* Было выделено пять классов, отличающихся друг от друга функциональным состоянием центральной нервной системы (ЦНС) (табл. 1). Охарактеризуем каждый из полученных классов.

Таблица 1. Результаты классификации по результатам ПЗМР

Показатели	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5
среднее время реакции, мс	339,7±20,69	317,3±2,37	276,54±0,99	246,4±0,79	225,9±1,27
среднее квадратичное отклонение, мс	157,1±30,93	102,0±5,16	63,38±1,54	50,20±1,63	39,72±1,15

1 класс – низкий уровень функциональных возможностей ЦНС. По тесту: быстроедействие низкое, при стабильности реакций ниже средних значений. Преобладание процессов торможения. Состояние ЦНС неустойчивое, неблагоприятное для деятельности

2 класс – сниженный уровень функциональных возможностей ЦНС. По тесту: быстроедействие ниже средних значений при средней стабильности реакций. Преобладание процессов торможения. Состояние неблагоприятное для деятельности.

3 класс – средний уровень активации ЦНС. По тесту: быстроедействие и стабильность реакций средние. Состояние регуляторных механизмов устойчивое.

4 класс – уровень функциональных возможностей ЦНС высокий. Преобладание процессов возбуждения. Быстроедействие выше средних значений при средней стабильности реакций.

5 класс – уровень функциональных возможностей ЦНС высокий. Быстроедействие высокое, при средней стабильности реакций. Преобладание процессов возбуждения. У лиц 4 и 5 классов - состояние благоприятное для деятельности.

*Сложная зрительно-моторная реакция.* По результатам теста «Сложная зрительно-моторная реакция» аналогично было выделено пять классов функционального состояния ЦНС по уровню сенсорных реакций (таблица 2).

Характеристика выделенных классов:

1 класс – низкий уровень сенсорных реакций, безошибочность низкая. При быстроедействии выше средних значений, стабильность реакции ниже среднего.

2 класс – уровень сенсорных реакций ниже среднего, безошибочность ниже среднего. Быстроедействие выше среднего, при стабильности реакций ниже среднего.

Таблица 2. Результаты классификации по результатам сложной зрительно-моторной реакции

Показатели	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5
Среднее время реакции, мс	583,9±17,64	606,9±11,02	606,3±6,104	580,0±8,767	524,4±8,561
Среднее квадратичное отклонение, мс	171,7±10,24	172,9±6,689	154,6±2,954	116,8±2,545	99,43±3,075
Доля точных реакций, %	88,87±0,51	94,40±0,17	97,47±0,10	98,90±0,13	99,61±0,11

3 класс – средний уровень сенсорных реакций, безошибочность средняя. Быстроедействие выше средних значений, при стабильности реакций ниже среднего.

4 класс – уровень сенсорных реакций выше среднего, безошибочность выше средних значений. Быстроедействие выше средних значений, при средней стабильности реакций.

5 класс – высокий уровень сенсорных реакций, безошибочность высокая, при

высоком быстродействии и стабильности реакции выше средних значений.

*Темпинг-тест.* Анализ результатов исходит из того, что сила нервных процессов является показателем работоспособности нервных клеток и нервной системы в целом. Сильная нервная система выдерживает большую по величине и длительности нагрузку, чем слабая. Опыт проводится последовательно сначала правой, а затем левой рукой. Полученные в результате варианты динамики максимального темпа движения рук могут быть условно разделены на пять типов:

- выпуклый тип: темп нарастает до максимального в первые 10–15 сек работы; в последующем, к 25–30 сек, он может снизиться ниже исходного уровня (т. е. наблюдавшегося в первые 5 сек работы). Этот тип кривой свидетельствует о наличии у испытуемого сильной нервной системы;

- ровный тип: максимальный темп удерживается примерно на одном уровне в течение всего времени работы. Этот тип-кривой характеризует нервную систему испытуемого как нервную систему средней силы;

- нисходящий тип: максимальный темп снижается уже со второго 5-секундного отрезка и остается на сниженном уровне в течение всей работы. Этот тип кривой свидетельствует о слабости нервной системы испытуемого;

- промежуточный тип: темп работы снижается после первых 10–15 сек. Этот тип расценивается как промежуточный между средней и слабой силой нервной системы — средне-слабая нервная система;

- вогнутый тип: первоначальное снижение максимального темпа сменяется затем кратковременным возрастанием темпа до исходного уровня. Вследствие способности к кратковременной мобилизации такие испытуемые также относятся к группе лиц со средне-слабой нервной системой.

### **Результаты и их обсуждение**

Программно-аппаратный комплекс экспресс-диагностики психофизиологических показателей организма человека может быть использован в сфере профессиональной деятельности (в организациях и на предприятиях) для решения следующих задач:

- психофизиологическая диагностика профессионально значимых особенностей организма (свойств нервной системы и опорно-двигательного аппарата);

- контроль функционального состояния организма перед работой и в ее процессе;

- разработка оптимальных режимов труда, отдыха и спортивных тренировок; оценка утомляемости;

- психологическая диагностика профессионально значимых качеств личности;

- профотбор: диагностика профессиональных возможностей и соответствия особенностей личности требованиям профессии;

- диагностика индивидуального стиля деятельности и профессионального «выгорания»;

- социальная психодиагностика: выявление структуры и психологического климата группы; диагностика межличностных отношений;

- оценка профессиональных возможностей с целью профотбора и профориентации, экспертизы трудоспособности, обследование людей с ограниченными возможностями для оценки степени ограничений способности к обучению или выполнению какой-либо деятельности.

### **Заключение**

Разработанный компьютерный комплекс предназначен для комплексной оценки психофизиологических и психологических свойств и функций организма здоровых, а также имеющих заболевания людей по результатам выполнения тестовых заданий. Алгоритмы работы и структура программного обеспечения комплекса позволяют автоматизировать и оптимизировать процедуру проведения обследований психофизиологического состояния организма человека.

# **HARDWARE-SOFTWARE EXPRESS DIAGNOSTICS COMPLEX OF THE HUMAN BODY PSYCHO-PHYSIOLOGICAL INDICATORS**

N.L. BOBROVA

## **Abstract**

The structure of the hardware-software complex intended for conducting psychophysiological research, allowing to automate and optimize the procedure for conducting surveys. One of the components of a software system is a support system and decision making implemented on the basis of the developed algorithms.

## **Список литературы**

1. *Куликов Л.В.* // Психические состояния. Хрестоматия. 2000. С. 11–43.
2. *Чекирда И.Ф.* // Материалы Всеросс. науч. конф. «Спортивный мониторинг и постмониторинговые программы». Москва, 2004. С. 67–68.

Библиотека БГУИР

УДК 621.315.4/61

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ХРИЗОТИЛОВЫХ АСБЕСТОВ

В.Б. СОКОЛОВ, С.В. ДРОБОТ, С.Э. САВАНОВИЧ

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

*Поступила в редакцию 05 декабря 2014*

Приводятся результаты исследований характеристик отражения и ослабления электромагнитного излучения в диапазоне частот 2...18 ГГц радиопоглощающими композиционными материалами на основе хризотилловых асбестов. Показана целесообразность использования этих материалов для изготовления широкодиапазонных экранов ЭМИ.

*Ключевые слова:* композиционные экраны, коэффициент отражения электромагнитного излучения, коэффициент передачи электромагнитного излучения, мощность электромагнитного излучения, хризотилловый асбест.

### Введение

Активное развитие информационных систем, систем связи и навигации приводит к расширению используемого частотного диапазона. Электромагнитное излучение (ЭМИ), формируемое радиоэлектронными средствами, воздействует как на технические объекты, так и на биологические – прежде всего на человека. Современный этап развития общества характеризуется также существенным возрастанием актуальности проблем обеспечения безопасности во многих сферах жизнедеятельности, в число которых входит как информационная сфера, так и сфера обеспечения выполнения задач вооруженными силами. Поскольку для сбора конфиденциальных сведений, как правило, используются технические средства перехвата, то одним из важных направлений деятельности любого государства является защита информации от утечки по техническим каналам, которые образуются, например, за счет побочных электромагнитных излучений и наводок, создаваемых функционирующими в широком частотном диапазоне средствами обработки данных [1]. Все эти направления деятельности реализуются посредством разработки эффективных, широкодиапазонных, технологичных и удобных в эксплуатации экранов электромагнитных излучений (ЭМИ), использующих в своей конструкции специальные материалы.

В настоящее время существует несколько способов реализации экранов ЭМИ [2]. Первый заключается в создании четвертьволновых конструкций, в которых слой поглощающего материала располагается на расстоянии  $\lambda/4$  перед проводящей поверхностью. Принцип работы таких экранов основан на явлении суперпозиции волн. В случае, когда волны, отраженные от поверхностей верхнего слоя и основы находятся в противофазе и одинаковы по амплитуде, происходит их взаимная компенсация. К недостаткам конструкций данного типа относятся узкополосность, ухудшение поглощающих свойств при наклонном падении электромагнитной волны, зависимость от поляризации и необходимость увеличения толщины при уменьшении частоты ЭМИ [1].

Для расширения рабочего диапазона частот используются экраны ЭМИ градиентного типа, характеристики которых ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\text{tg } \delta$ ) увеличиваются по мере проникновения ЭМИ вглубь материала. Недостатками этих конструкций являются сложность изготовления и необходимость

использования радиопоглощающих материалов с толщиной кратной длине волны в свободном пространстве, что становится критичным для задач снижения отражений в области частот ниже 1 ГГц, особенно при ограничении на массогабаритные характеристики экрана.

Наибольшее распространение получили радиопоглощающие экраны многослойной конструкции с различными наполнителями, герметизированными, как правило, разнообразными полимерными материалами. Основой подобных конструкций в большинстве случаев являются машиновязанные полотна из синтетических и натуральных волокон [2]. При этом основной проблемой является надежная фиксация входящих в композицию активных составляющих на несущей матрице, а также удержание влаги, заполняющей свободные промежутки волокнистой фибрильной матрицы полотна [2]. Использование конструкций экранов ЭМИ на практике связано с проблемой огнестойкости материалов, из которых они выполняются. Решение данной проблемы возможно при использовании в качестве материала матрицы волокнистого наноканального минерала водного силиката магния  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$  – хризотилового асбеста. Химический состав хризотил-асбеста: окись магния ( $MgO$ ) 38–41 %, окись алюминия ( $Al_2O_3$ ) 1–1,5 %, окись и закись железа ( $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ) 0,3–4%, двуокись кремния ( $SiO_2$ ) 41–43 %, вода ( $H_2O$ ) 13–14 %. Средние значения модуля упругости хризотил-асбеста колеблются от 16104 до 21104 МПа. Хризотильный асбест имеет нестандартную кристаллическую структуру, состоящую из слоев, ограниченных с внутренней стороны кремнекислородной сеткой, а с внешней стороны – сеткой гидроокиси магния. В силу различия размеров внутренней и внешней сеток, слои хризотилового асбеста свертываются в цилиндрические трубки с кремнекислородным слоем на внутренней стороне, благодаря чему волокна прекрасно удерживают влагу. Удаление структурно-связанной (кристаллизационной воды) возможно при 350–450 °С. Кроме того, большая удельная поверхность хризотилового асбеста будет способствовать размещению большего количества частиц в объеме материала.

Наиболее простой способ изготовления экранов ЭМИ заключается во введении в материал электропроводящего компонента – порошкообразного металла. Для введения и фиксации частиц металла на поверхности волокон хризотилового асбеста был выбран метод холодного газодинамического напыления (ХГДН). Метод разработан на основе открытого в 80-х гг. прошлого столетия эффекта закрепления твердых частиц, движущихся со сверхзвуковой скоростью, на поверхности при соударении с ней. Технология нанесения покрытий включает в себя нагрев сжатого газа (воздуха), подачу его в сопло и формирование в этом сопле сверхзвукового воздушного потока, подачу в этот поток порошкового материала, ускорение этого материала в сопле сверхзвуковым потоком воздуха и направление его на поверхность обрабатываемого изделия. В качестве порошковых материалов используются порошки металлов, сплавов или их механические смеси с керамическими порошками. При этом путем изменения режимов работы оборудования можно либо проводить эрозионную обработку поверхности изделия, либо наносить металлические покрытия требуемых составов. Изменением режимов можно также менять пористость и толщину напыляемого покрытия. В качестве напыляемых материалов использовались металлы (никель, медь) в порошкообразном виде [3].

### Методика проведения эксперимента

Для проведения исследований использовались образцы, изготовленные методом ХГДН порошков никеля и меди на поверхность хризотилового асбеста. Предварительно сформированную газопорошковую смесь с частицами размером 0,01–50 мкм (истекающую из дозатора) ускоряли в сверхзвуковом холодном или подогретом потоке воздуха или иного газа (гелий, азот), с температурой существенно меньшей температуры плавления материала частиц ( $T_0 = 0,4–0,7T_{pm}$ ) и направляли на напыляемую поверхность. В результате ударного взаимодействия частиц металлов с преградой на последней сформировалось покрытие из пластически деформированных частиц напыляемого порошка. Холодное газодинамическое металлов выполняли на установке «ДИМЕТ–405». Основные технические характеристики установки (оборудование сертифицировано по системе ГОСТ Р. Сертификат соответствия N РОСС RU.ТН02.Н00580):

- типы покрытия: алюминиевые, медные, цинковые, никелевые, баббитовые;
- энергопотребление: 220 В 3,3 кВт;

- давление потребляемого воздуха: 0,6–1,0 МПа (6–10 атм);
- расход сжатого воздуха: 0,4 м<sup>3</sup>/мин;
- производительность по массе наносимого покрытия: 1–6 г/мин (0,3–3 см<sup>3</sup>/мин);
- 5 температурных режимов.

Исследовались текстильные асботкани толщиной 2,5–5,0 мм, изготовленные из волокон хризотилового асбеста 0 группы ГОСТ 12871-93. Исследуемый материал представляет собой волокнистую структуру из плотно упакованных трубчатых волокон с внешним диаметром 300–500 А и внутренним диаметром 20–150 А. Пористость материала (объем каналов к общему объему) составляет 5–6 %.

Для исследования экранирующих характеристик созданных экранов ЭМИ использовался панорамный измеритель коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01-18, работающий по принципу раздельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отражающей волн. С помощью данного измерителя могут проводиться однократные, непрерывные, *N*-шаговые измерения, а также измерения с усреднением результата (от 2 до 32 раз). В данной работе проводились измерения с усреднением результата (число усреднений – 3).

Измерения включали в себя три этапа. На первом этапе осуществлялась калибровка, во время проведения которой устанавливался оптимальный уровень мощности для работы детекторов измерителя. В данной модификации измерителя калибровка выполнялась автоматически. Второй этап заключался в измерении коэффициентов передачи и влиянии состава напыляемого материала на коэффициент передачи  $S_{21}$  композитных конструкций экранов. Третий этап заключался в измерении коэффициентов отражения и исследовании влияния состава напыляемого материала на коэффициент отражения  $S_{11}$  композитных конструкций экранов.

Эффективность экранирования ЭМИ материалом оценивалась соотношением между напряженностями электрического поля в точке пространства при отсутствии и наличии в ней этого материала и характеризовалась коэффициентами отражения и передачи ЭМИ.

### Результаты и их обсуждение

Частотные зависимости коэффициентов отражения ( $S_{11}$ ) и передачи ЭМИ ( $S_{21}$ ) для подготовленных образцов приведены на соответствующих рисунках. На основе анализа результатов измерений показано, что листовой хризотилковый асбест характеризуется ослаблением не более 1 дБ (рис. 1) в диапазоне частот 2...18 ГГц. Использование такого материала в четвертьволновых конструкциях экранов, приводит к значительному увеличению коэффициента ослабления до 40 дБ в исследуемом диапазоне длин волн (рис. 2).

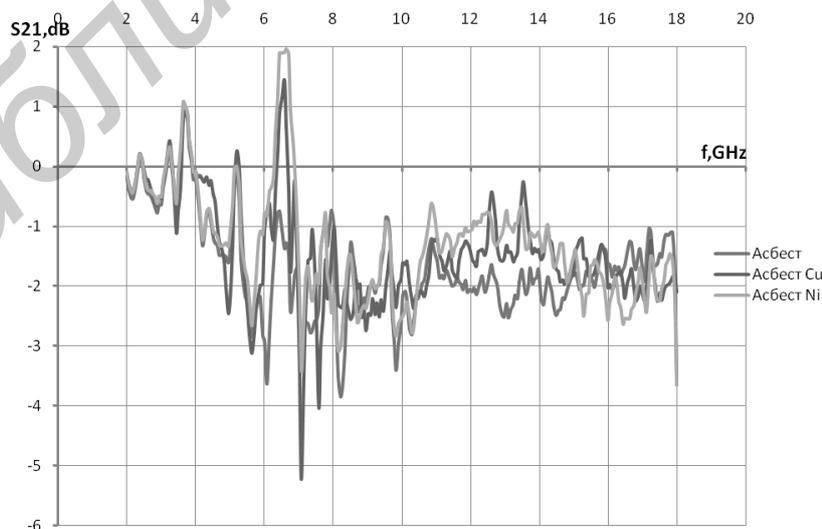


Рис. 1. Зависимость коэффициента ослабления (передачи) электромагнитных экранов из листового хризотилового асбеста и из листового хризотилового асбеста с напылением меди или никеля

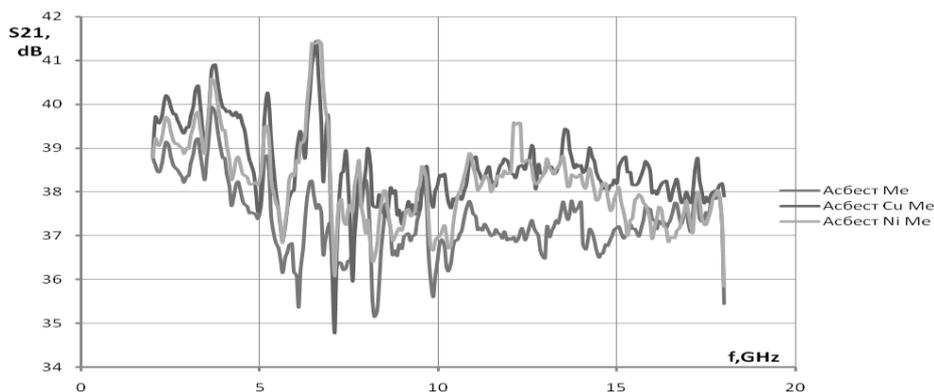


Рис. 2. Зависимость коэффициента ослабления (передачи) электромагнитных экранов из листового хризотилового асбеста и из листового хризотилового асбеста с напылением меди или никеля с металлической подложкой (четвертьволновая конструкция экрана)

При проведении исследования экранирующих характеристик синтезированных материалов установлено, что напыление на листовую хризотилловый асбест меди или никеля незначительно изменяет коэффициент ослабления материала в диапазоне частот 2...18 ГГц. Листовой хризотилловый асбест с напыленным на него порошком меди характеризуется ослаблением не более 2 дБ (рис. 1) в диапазоне частот 2...18 ГГц. При посадке на поверхность асбеста порошкообразного никеля, коэффициент ослабления находится в диапазоне от -4 до 2 дБ (рис. 1), как и в случае использования меди, а применение полученного материала в многослойных конструкциях экранов ЭМИ, где в качестве второго слоя используется металлический отражатель, позволяет получить коэффициент ослабления до 42 дБ в диапазоне частот 2...18 ГГц (рис. 2).

Установлено, что напыление на поверхность асбеста меди позволяет снизить коэффициент отражения асбеста до -19 дБ (рис. 3) при ослаблении не более 4 дБ (рис. 1), а использование синтезированного материала в четвертьволновой конструкции экрана ЭМИ – до -10 дБ (рис. 3) при ослаблении до 41 дБ (рис. 2) в диапазоне частот 2...18 ГГц. При напылении на поверхность асбеста порошкообразного никеля, коэффициент отражения материала снижается до -19 дБ (рис. 4) при ослаблении не более 4 дБ (рис. 1), как и в случае напыления меди, а применение полученного материала в многослойных конструкциях экранов ЭМИ, где в качестве второго слоя используется металлический отражатель – до -7 дБ, при ослаблении до 41 дБ в диапазоне частот 2...18 ГГц. Установлено, что напыление никеля на поверхность листового асбеста обеспечивает снижение коэффициента отражения исходного материала на частотах менее 6 ГГц, чего не наблюдается у медьсодержащего асбеста. А на частотах 10...12 ГГц медьсодержащий материал обеспечивает большее снижение коэффициента отражения (от -16 до -12 дБ), чем никельсодержащий асбест (от -12 до -9 дБ) (см. рис. 5).

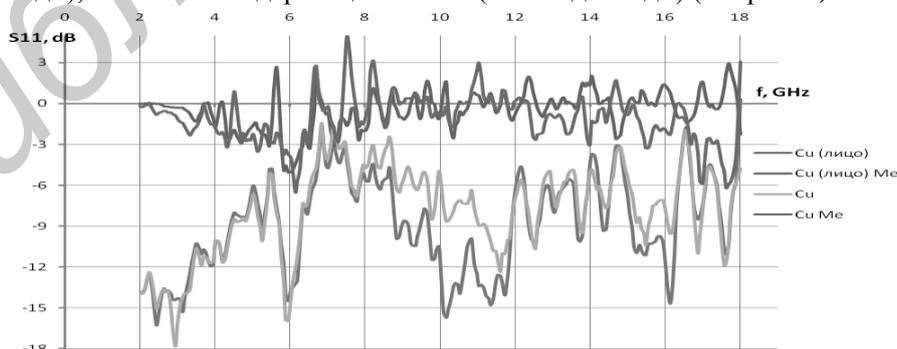


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения электромагнитных экранов из листового хризотилового асбеста с напылением меди

Метод холодного газодинамического напыления металлов позволяет получать многослойные радиопоглощающие покрытия, которые могут наноситься практически на любые поверхности, в том числе на внутреннюю часть корпусов экранируемых средств.

Показано, что многослойные конструкции экранов (структуры медь-никель или никель-медь, напыляемых послойно) обеспечивают ослабление электромагнитного излучения до 30 дБ в диапазоне частот 2...18 ГГц при коэффициенте отражения  $-4...-10$  дБ.

Количество и чередование напыляемых слоев позволяют получать заданные значения коэффициентов отражения. Таким образом, при использовании данного метода формируется радиопоглощающее покрытие с требуемыми экранирующими свойствами для снижения уровней побочных электромагнитных излучений и наводок средств вычислительной техники.

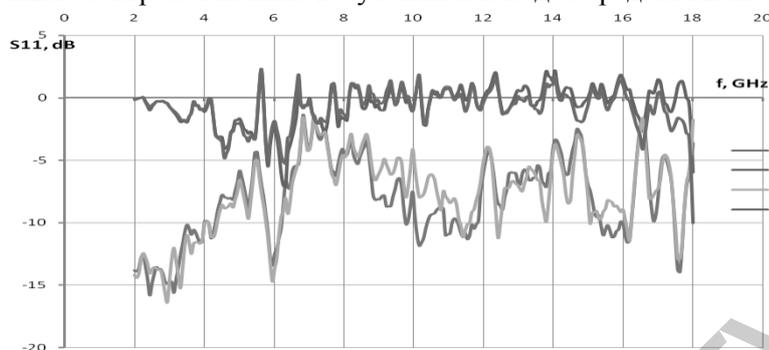


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения электромагнитных экранов из листового хризотилового асбеста с напылением никеля

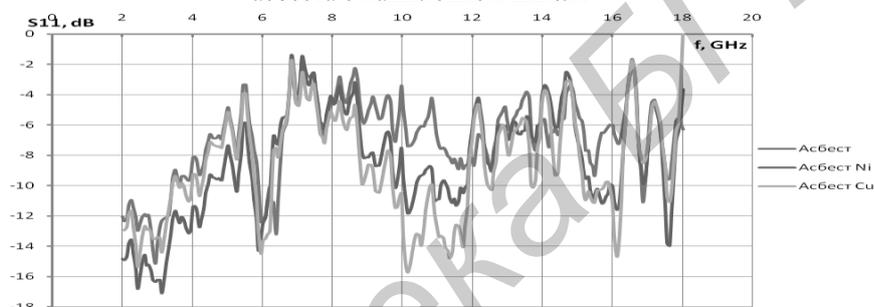


Рис.5. Зависимость коэффициента отражения электромагнитных экранов из листового хризотилового асбеста с напылением меди или никеля

Разница в радиопоглощающих характеристиках химически модифицированного минерала обусловлена выбором осаждаемого металла: вместе с ростом электропроводности, увеличиваются значения ослабления и коэффициента отражения. Этот фактор может быть использован для создания композиционных поглотителей ЭМИ с заданными функциональными характеристиками путем подбора вида металлических включений, их концентрации и очередности.

## STUDY OF ELECTROMAGNETIC RADIATION INTERACTION WITH MATERIALS BASED ON CHRYSOTILE ASBESTOS

V.B. SOKOLOV, S.V. DROBOT, S.E. SAVANOVICH

### Abstract

The research results of radioabsorbing composite materials based on chrysotile asbestos electromagnetic radiation reflection and attenuation characteristics in the frequency range 2...18 GHz are studied. The expediency of use of these materials for manufacturing of wide screens EME is shown.

### Список литературы

1. Лыньков Л.М., Чембрович В.Е., Борботько Т.В. // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, № 2/1. С. 29–35.
2. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты. / Под общ. ред. Л.М. Лынькова. Минск, 2003.
3. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / Под ред. В.М. Фомина. М., 2010.

УДК 621.396.96

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ДИСКРЕТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧ СОПРОВОЖДЕНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, СОВЕРШАЮЩИХ СПИРАЛЬНЫЙ МАНЕВР

А.С. СОЛОНАР, П.А. ХМАРСКИЙ

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

Поступила в редакцию 28 июля 2014

Представлена модель движения баллистического объекта, совершающего спиральный маневр при вхождении в атмосферу. Рассмотрены особенности построения модификаций фильтров Калмана при косвенных измерениях и ансцентного фильтра Калмана при сопровождении баллистических объектов, входящих в атмосферу. Проведен сопоставительный анализ результатов фильтрации рассматриваемых модификаций фильтров.

*Ключевые слова:* сопровождение баллистических объектов, фильтр Калмана при косвенных измерениях, нелинейная фильтрация, ансцентный фильтр Калмана, вхождение в атмосферу, спиральный маневр.

### Введение

Алгоритмы сопровождения баллистических объектов (БО) реализуются с большей вычислительной сложностью, чем алгоритмы сопровождения аэродинамических летательных аппаратов [1–4]. Движение БО за пределами атмосферы хорошо предсказуемо, так как там объект не может маневрировать, поскольку единственной силой, действующей на него, является гравитация [1, 5–8]. Наиболее сложным участком сопровождения является атмосферный, где поведение БО становится менее предсказуемым из-за асимметрии в конструкции БО, которая может вызвать движение по спирали [1, 5, 6]. Кроме того, возникающие замедления могут восприниматься как маневр [1, 6]. Обеспечение более высокой точности измерения траекторных параметров БО достигается совершенствованием алгоритмов сопровождения.

Из открытых публикаций зарубежных и отечественных авторов [1–10] известно, что для сопровождения БО наиболее распространено использование модификаций фильтра Калмана при косвенных измерениях (ФК) [1, 8, 11–13]. Такие фильтры успешно применяются как для сопровождения аэродинамических летательных аппаратов, так и БО. Однако эти фильтры могут иметь большие ошибки сопровождения и несостоятельную оценку при оценивании траекторных параметров БО, совершающих сложный маневр [1, 4, 7]. Учет особенностей динамики БО возможен при использовании ансцентного фильтра Калмана (АФК), реализующего метод нелинейной фильтрации [14, 15].

Целью статьи является проведение сопоставительного анализа результатов фильтрации АФК и модификаций ФК для случая сопровождения БО, совершающего спиральный маневр при возвращении в атмосферу.

### Постановка задачи

*Начальные условия.* Будем считать, что наблюдается БО, входящий в атмосферу; интервал обновления данных равен  $T$ ; вектор наблюдаемых параметров БО  $\theta$  содержит разовые

оценки дальности  $\hat{r}$ , азимута  $\hat{\beta}$  и угла места  $\hat{\epsilon}$ , формируемые трехкоординатной радиолокационной станцией (РЛС). Ошибки наблюдения распределены по гауссовскому закону и определяются корреляционной матрицей ошибок измерения:

$$\mathbf{R}_\theta = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\beta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\epsilon^2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\beta$ ,  $\sigma_\epsilon$  – СКО гауссовских ошибок наблюдения  $\hat{r}$ ,  $\hat{\beta}$  и  $\hat{\epsilon}$ .

*Задачи:* 1) рассмотреть модель движения БО, совершающего спиральный маневр при возвращении в атмосферу; 2) рассмотреть особенности построения модификаций фильтров Калмана при косвенных измерениях и ансамблевого фильтра Калмана при сопровождении БО; 3) методами математического моделирования провести сопоставление суммарных ошибок измерения местоположения БО для АФК и модификаций ФК.

### Модель движения БО, совершающего спиральный маневр

При синтезе фильтров сопровождения БО чаще всего рассматриваются следующие модели движения:

- 1) модель движения со случайным маневром в виде гауссовского белого шума [2, 8, 12, 13];
- 2) модель движения со случайным маневром в виде винеровского процесса [2];
- 3) модель движения БО, входящего в атмосферу [2, 6];
- 4) модель движения БО, совершающего спиральный маневр при вхождении в атмосферу [4].

Первые две модели движения подходят для сопровождения как маневрирующих, так и не маневрирующих аэродинамических летательных аппаратов и БО. Несоответствие моделей задающего воздействия БО моделям, положенным в основу синтеза фильтра, неизбежно приведет к появлению переходных процессов и росту ошибки измерения координат и параметров движения БО. Использование третьей и четвертой моделей позволяет учитывать некоторые специфические характеристики движения БО при синтезе измерителей. Особый интерес представляет собой четвертая модель, позволяющая учитывать спиральный маневр БО при вхождении в атмосферу. Данная модель была впервые предложена учеными Американского института аэронавтики и астронавтики в работе [4].

*Уравнения движения БО.* Уравнения движения объекта приводятся в системе координат Север-Восток-Низ (*North-East-Down*), изображенной на рис.1, а. Земля считается сферической и не вращающейся.

Ускорения БО  $a_x$ ,  $a_z$ ,  $a_y$  представляются как сумма гравитационной и аэродинамической составляющих:  $a_x = G_x + A_x$ ,  $a_z = G_z + A_z$ ,  $a_y = G_y + A_y$ ,

где  $G_{x,y,z}$  и  $A_{x,z,y}$  – гравитационные и аэродинамические составляющие ускорения  $x$ ,  $z$ ,  $y$ .

Гравитационная составляющая ускорения БО учитывается следующим образом [1,2]:

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_z \\ G_y \end{bmatrix} = \frac{\mu}{(x^2 + z^2 + (y - R_T)^2)^{3/2}} \begin{bmatrix} x \\ z \\ y - R_T \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\mu = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$  – гравитационная постоянная Земли,  $R_T \approx 6371 \text{ км}$  – радиус Земли.

Аэродинамические силы, воздействующие на БО, могут быть разделены на две основные составляющие: силу сопротивления вдоль вектора скорости и нормальную силу, воздействующую на БО перпендикулярно вектору скорости. Спиральное движение может быть аппроксимировано нормальным вектором ускорений, вращающимся с некоторой скоростью в перпендикулярной плоскости. Аэродинамические составляющие ускорения представляются при помощи следующих уравнений [1]:

$$\begin{pmatrix} A_x \\ A_z \\ A_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma \cos \chi & -\sin \chi & \sin \gamma \cos \chi \\ \cos \gamma \sin \chi & \cos \chi & \sin \gamma \sin \chi \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix} \frac{\rho |V_T|^2 S}{2m} \begin{pmatrix} -C_D \\ C_N \cos \varphi \\ C_N \sin \varphi \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $\gamma = \arctan\left(\frac{-V_y}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}}\right)$ ,  $\chi = \arctan\left(\frac{V_z}{V_x}\right)$  – горизонтальный и вертикальный углы наклона

вектора скорости (см. рис.1);  $\varphi$  – угол вращения БО, зависящий от времени так, что скорость его изменения равна круговой частоте вращения  $\omega$ :  $\dot{\varphi} = \omega$ ;  $\vec{V}_T$  – полный вектор скорости БО;  $S$  и  $m$  – площадь сечения мишени и масса БО;  $\rho$  – атмосферная плотность воздуха;  $C_D$ ,  $C_N$  – коэффициенты сопротивления и подъемной силы. Псевдокод алгоритма расчета траектории БО приведен на рис. 1, б.

Для различных типов БО круговая частота  $\omega$  и коэффициенты  $C_D$ ,  $C_N$  зависят от формы объекта, размеров и массы. Для наблюдателя эти параметры являются неизвестными.

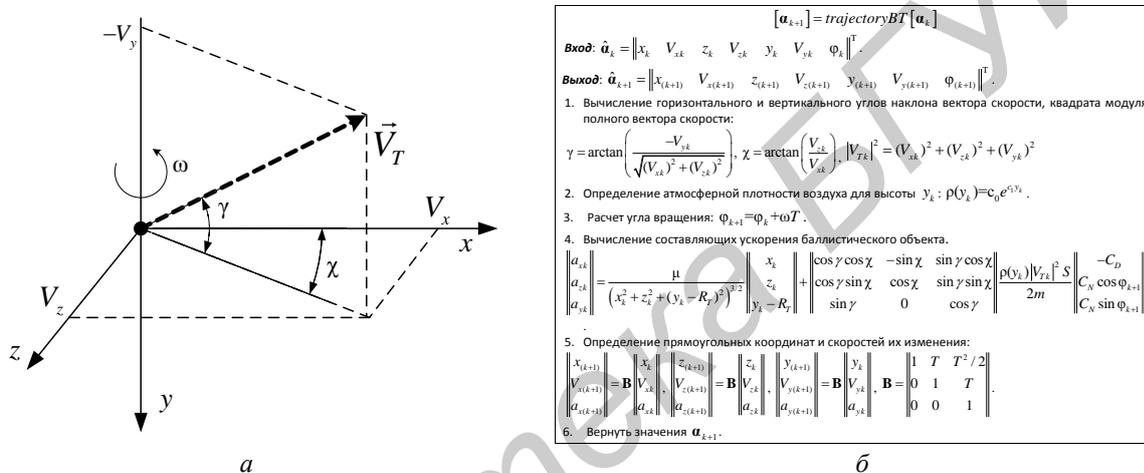


Рис. 1. Система координат БО (а) и псевдокод алгоритма расчета траектории БО (б)

### Модель движения БО для алгоритма фильтрации

Модель движения, приведенная на рис.1, б, учитывает траекторные параметры БО (местоположение и скорость) и априорно неизвестные параметры: аэродинамические коэффициенты  $C_D$ ,  $C_N$ , массу  $m$ , площадь сечения мишени  $S$ , угол вращения  $\varphi$  и круговую частоту вращения  $\omega$ . Использование радиолокационных измерений не позволяет однозначно оценить все эти параметры. Для снижения количества неизвестных параметров вводят модифицированные коэффициенты сопротивления и подъемной силы [1]:  $C_{Dm} = SC_D / m$ ,  $C_{Lm} = SC_L / m$ .

Более того, вводятся две новые составляющие вектора состояния:  $Z_1$ ,  $Z_2$ , называемые гармоническими параметрами состояния, которые определяются следующим образом –  $Z_1 = C_{Lm} \cos(\omega t + \varphi_0)$ ,  $Z_2 = C_{Lm} \sin(\omega t + \varphi_0)$ . Эти параметры описываются соответствующим

уравнением динамики: 
$$\begin{pmatrix} \dot{Z}_1 \\ \dot{Z}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{pmatrix}.$$

Зависимость атмосферной плотности воздуха от высоты  $y$  определяется экспоненциальной функцией  $\rho(y) = c_0 e^{c_1 y}$ , где  $c_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_1 = 1,694 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ .

С учетом введенных коэффициентов расширенный вектор состояния будет иметь вид:

$$\hat{a} = \left\| \hat{x} \ \hat{V}_x \ \hat{z} \ \hat{V}_z \ \hat{y} \ \hat{V}_y \ \hat{Z}_1 \ \hat{Z}_2 \ \hat{C}_{Dm} \ \hat{\omega} \right\|^T. \quad (4)$$

Ускорение БО будет вычисляться согласно выражению

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_z \\ a_y \end{bmatrix} = \frac{\mu}{(x^2 + z^2 + (y - R_T)^2)^{3/2}} \begin{bmatrix} x \\ z \\ y - R_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \chi & -\sin \chi & \sin \gamma \cos \chi \\ \cos \gamma \sin \chi & \cos \chi & \sin \gamma \sin \chi \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \frac{c_0 e^{c_1 y} |V_T|^2}{2} \begin{bmatrix} -C_{Dm} \\ Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Законы изменений во времени оценок модифицированного коэффициента сопротивления  $\hat{C}_{Dm}$  и круговой частоты  $\hat{\omega}$  считаются винеровскими. Псевдокод расчета модели движения БО для алгоритма фильтрации приведен на рис. 2.

$[\mathbf{a}_{k+1}] = \text{extrBT}[\mathbf{a}_k]$

**Вход:**  $\mathbf{a}_k = \begin{bmatrix} x_k & V_{xk} & z_k & V_{zk} & y_k & V_{yk} & Z_{1k} & Z_{2k} & C_{Dmk} & \omega_k \end{bmatrix}^T$ .

**Выход:**  $\mathbf{a}_{k+1} = \begin{bmatrix} x_{k+1} & V_{x(k+1)} & z_{k+1} & V_{z(k+1)} & y_{k+1} & V_{y(k+1)} & Z_{1(k+1)} & Z_{2(k+1)} & C_{Dm(k+1)} & \omega_{(k+1)} \end{bmatrix}^T$ .

- Вычисление горизонтального и вертикального углов наклона вектора скорости:  

$$\gamma = \arctan\left(\frac{-V_{yk}}{\sqrt{(V_{xk})^2 + (V_{zk})^2}}\right), \chi = \arctan\left(\frac{V_{zk}}{V_{xk}}\right), |V_{Tk}|^2 = (V_{xk})^2 + (V_{zk})^2 + (V_{yk})^2.$$
- Модифицированный коэффициент сопротивления считается постоянным:  $C_{Dm(k+1)} = C_{Dmk}$ .
- Нахождение гармонических параметров состояния:  

$$Z_{1(k+1)} = Z_{2k} \omega T + Z_{1k}; Z_{2(k+1)} = -Z_{1(k+1)} \omega T + Z_{2k}.$$
- Вычисление составляющих ускорения баллистического объекта:  

$$\begin{bmatrix} a_{xk} \\ a_{zk} \\ a_{yk} \end{bmatrix} = \frac{\mu}{(x_k^2 + z_k^2 + (y_k - R_T)^2)^{3/2}} \begin{bmatrix} x_k \\ z_k \\ y_k - R_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \chi & -\sin \chi & \sin \gamma \cos \chi \\ \cos \gamma \sin \chi & \cos \chi & \sin \gamma \sin \chi \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \frac{c_0 e^{c_1 y_k} |V_{Tk}|^2}{2} \begin{bmatrix} -C_{Dm(k+1)} \\ Z_{1(k+1)} \\ Z_{2(k+1)} \end{bmatrix}.$$
- Определение прямоугольных координат и скоростей их изменения:  

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ V_{x(k+1)} \\ a_{x(k+1)} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} x_k \\ V_{xk} \\ a_{xk} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} z_{k+1} \\ V_{z(k+1)} \\ a_{z(k+1)} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} z_k \\ V_{zk} \\ a_{zk} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} y_{k+1} \\ V_{y(k+1)} \\ a_{y(k+1)} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} y_k \\ V_{yk} \\ a_{yk} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$
- Вернуть значения  $\mathbf{a}_{k+1}$ .

Рис. 2. Псевдокод алгоритма расчета модели движения БО для алгоритма фильтрации

### Особенности построения некоторых модификаций фильтров Калмана при сопровождении БО

1. *Фильтр Калмана при наблюдении прямоугольных координат с коррелированными ошибками наблюдения* [11]. В этой модификации оценка вектора состояния  $\hat{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{V}_x & \hat{a}_x & \hat{z} & \hat{V}_z & \hat{a}_z & \hat{y} & \hat{V}_y & \hat{a}_y \end{bmatrix}^T$  формируется по результатам наблюдения разовых оценок прямоугольных координат  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{xzy} = \begin{bmatrix} \hat{x}_f & \hat{z}_f & \hat{y}_f \end{bmatrix}^T$ . Для пересчета оценки вектора наблюдения из полярной системы координат в прямоугольную применяется вектор-функция  $\mathbf{h}_{\theta_{xzy}}(\boldsymbol{\theta})$ :

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{xzy} = \begin{bmatrix} \hat{x}_f & \hat{z}_f & \hat{y}_f \end{bmatrix}^T = \mathbf{h}_{\theta_{xzy}}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \hat{r} \sin(\hat{\beta}) \sin(\hat{\epsilon}) & \hat{r} \cos(\hat{\beta}) \sin(\hat{\epsilon}) & \hat{r} \cos(\hat{\epsilon}) \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

При этом необходимо пересчитать корреляционную матрицу ошибок текущих измерений  $\mathbf{R}_\theta$  в прямоугольную систему координат при помощи выражения [8, 11–13]:

$$\mathbf{R}_f = \mathbf{H}_{xzy} \mathbf{R}_\theta \mathbf{H}_{xzy}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{11} & \mathbf{R}_{12} & \mathbf{R}_{13} \\ \mathbf{R}_{12} & \mathbf{R}_{22} & \mathbf{R}_{23} \\ \mathbf{R}_{13} & \mathbf{R}_{23} & \mathbf{R}_{33} \end{bmatrix}, \mathbf{H}_{xzy} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\beta}) \sin(\hat{\epsilon}) & -\hat{r} \sin(\hat{\beta}) \sin(\hat{\epsilon}) & \hat{r} \cos(\hat{\beta}) \cos(\hat{\epsilon}) \\ \sin(\hat{\beta}) \sin(\hat{\epsilon}) & \hat{r} \cos(\hat{\beta}) \sin(\hat{\epsilon}) & \hat{r} \sin(\hat{\beta}) \sin(\hat{\epsilon}) \\ \cos(\hat{\epsilon}) & 0 & -\hat{r} \sin(\hat{\epsilon}) \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{R}_{11} = \sigma_\beta^2 \hat{r}^2 (\cos^2(\hat{\beta}) \cos^2(\hat{\epsilon}) + \sin^2(\hat{\beta}) \sin^2(\hat{\epsilon})) + \sigma_r^2 \cos^2(\hat{\beta}) \sin^2(\hat{\epsilon})$ ,  $\mathbf{R}_{33} = \sigma_\beta^2 \hat{r}^2 \sin^2(\hat{\epsilon}) + \sigma_r^2 \cos^2(\hat{\epsilon})$ ,

$$\mathbf{R}_{12} = \frac{\sigma_\beta^2 \hat{r}^2 \sin(2\hat{\beta}) \cos(2\hat{\beta})}{2} + \frac{\sigma_r^2 \sin(2\hat{\beta})}{2} \sin^2(\hat{\epsilon}), \quad \mathbf{R}_{13} = \frac{\sin(2\hat{\epsilon}) \cos(\hat{\beta})}{2} (\sigma_r^2 - \sigma_\beta^2),$$

$$\mathbf{R}_{22} = \sigma_\beta^2 \hat{r}^2 (\cos^2(\hat{\beta}) \sin^2(\hat{\epsilon}) + \sin^2(\hat{\beta}) \cos^2(\hat{\epsilon})) + \sigma_r^2 \sin^2(\hat{\beta}) \sin^2(\hat{\epsilon}), \quad \mathbf{R}_{23} = \frac{\sin(2\hat{\epsilon}) \sin(\hat{\beta})}{2} (\sigma_r^2 - \sigma_\beta^2).$$

Неслучайная динамическая матрица пересчета приращения вектора состояния:

$$\mathbf{B} = \begin{Bmatrix} \mathbf{b} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{b} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{b} \end{Bmatrix}, \text{ где } \mathbf{0}_{3 \times 3} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{Bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}. \quad (7)$$

Матрица пересчета случайных приращений вектора состояния:

$$\mathbf{S} = \begin{Bmatrix} T^3/6 & T^2/2 & T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T^3/6 & T^2/2 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T^3/6 & T^2/2 & T \end{Bmatrix}.$$

$$\text{Матрица статистического пересчета: } \mathbf{H} = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{Bmatrix}.$$

Дисперсия случайного маневра  $\sigma_M^2$  характеризует случайный маневр по трем прямоугольным координатам.

2. *Фильтр Калмана при наблюдении прямоугольных координат с независимыми ошибками наблюдения* [11]. В данной модификации оценки полярных координат также пересчитываются в прямоугольные с помощью (6), но при этом принято, что ошибки наблюдения  $\hat{x}_f, \hat{z}_f, \hat{y}_f$  между собой не коррелированы. Подобное допущение позволяет фильтровать прямоугольные координаты  $x, y, z$  отдельно при помощи трех идентичных ФК.

В этих фильтрах:

– корреляционная матрица флуктуационных ошибок текущих измерений будет представлена матрицами единичного размера: для ФК (канал  $x$ )  $\mathbf{R}_{fx} = R_{11}$ ; для ФК (канал  $z$ )

$\mathbf{R}_{fz} = R_{22}$ ; для ФК (канал  $y$ )  $\mathbf{R}_{fy} = R_{33}$ ;

– матрица статического пересчета:  $\mathbf{H} = \|1 \ 0 \ 0\|$ ;

– неслучайная динамическая матрица пересчета приращения вектора состояния соответствует выражению (7);

$$\text{– матрица пересчета случайных приращений вектора состояния } \mathbf{S} = \begin{Bmatrix} T^3/6 & 0 & 0 \\ T^2/2 & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 \end{Bmatrix}.$$

– дисперсия случайного маневра  $\sigma_M^2$  будет одинаковой для  $x, y, z$ .

3. *Ансцентный фильтр Калмана*. Реализация ансцентного фильтра Калмана подробно описана в работах [14, 15]. Особенности реализации ансцентного фильтра Калмана при сопровождении БО определяют: вектор состояния (4); корреляционную матрицу ошибок измерений  $\mathbf{R}_0$ ; функцию экстраполяции (рис. 2); функцию пересчета вектора состояния в

$$\text{систему координат вектора наблюдения: } \boldsymbol{\theta} = \begin{Bmatrix} r \\ \beta \\ \varepsilon \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sqrt{x^2 + z^2 + y^2} \\ \arctan(z/x) + (\pi/2)[2 - \text{sgn}(x) - \text{sgn}(x)\text{sgn}(z)] \\ \arctan(\sqrt{x^2 + z^2}/y) + \pi[1 - \text{sgn}(y)] \end{Bmatrix}.$$

Матрица случайного дискретного маневра будет складываться из трех составляющих:

$$\mathbf{M} = \mathbf{S}_0 \mathbf{Q}_a \mathbf{S}_0^T + \mathbf{S}_1 \mathbf{Q}_z \mathbf{S}_1^T + \mathbf{S}_2 \mathbf{Q}_\omega \mathbf{S}_2^T, \text{ где } \mathbf{S}_0 = \begin{Bmatrix} T^2/2 & T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T^2/2 & T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T^2/2 & T & 0 & 0 \end{Bmatrix},$$

$$\mathbf{S}_1 = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T & \omega T^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega T^2/2 & T & 0 & 0 \end{Bmatrix}, \mathbf{S}_2 = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T \end{Bmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_a = \begin{Bmatrix} \sigma_a^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_a^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_a^2 \end{Bmatrix}, \mathbf{Q}_z = \begin{Bmatrix} \sigma_z^2 & 0 \\ 0 & \sigma_z^2 \end{Bmatrix}, \mathbf{Q}_\omega = \begin{Bmatrix} \sigma_{Cdm}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\Omega^2 \end{Bmatrix}.$$

Дисперсии случайных маневров  $\sigma_a^2$ ,  $\sigma_z^2$ ,  $\sigma_{C_{dm}}^2$ ,  $\sigma_\Omega^2$  характеризуют случайные маневры по трем прямоугольным координатам, гармоническим параметрам состояния  $Z_1$  и  $Z_2$ , модифицированному коэффициенту сопротивления  $C_{Dm}$  и круговой частоте  $\omega$ , соответственно [1].

### Результаты сопоставительного анализа

Сопоставительное моделирование результатов фильтрации АФК и модификаций ФК проводилось при помощи комплекса математического моделирования. Комплекс формировал входное воздействие в виде суммы задающего и возмущающего воздействия. Задающее воздействие представляло собой атмосферный участок траектории БО, совершающего спиральный маневр. Возмущающее воздействие на каждом интервале обновления данных задавалось в виде случайных ошибок измерений полярных координат, с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей ошибок измерения (1). Условия проведения моделирования соответствуют работе [3] для случая с постоянной круговой частотой (модельный эксперимент № 1) и круговой частотой, изменяющейся по линейному закону (модельный эксперимент № 2).

*Показатели качества.* Показателем качества АФК и модификаций ФК являлось СКО суммарной ошибки измерения местоположения  $\Delta_\Sigma(k)$ , и ее среднее значение  $\bar{\Delta}_\Sigma(k)$ , которые вычислялись

согласно выражениям: 
$$\Delta_\Sigma(k) = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{оп}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{оп}}} \left( [x_{Tj}(k) - x_{\Phi j}(k)]^2 + [z_{Tj}(k) - z_{\Phi j}(k)]^2 + [y_{Tj}(k) - y_{\Phi j}(k)]^2 \right)},$$

$$\bar{\Delta}_\Sigma = \frac{\sum_{k=1}^N \Delta_\Sigma(k)}{N}$$
 где  $N_{\text{оп}}$  – количество проведенных опытов (под одним опытом понимается результат фильтрации траектории в течение 350 интервалов обновления данных);  $k$  – номер шага наблюдения;  $x_{Tj}(k)$ ,  $z_{Tj}(k)$ ,  $y_{Tj}(k)$  – требуемые значения фазовых координат;  $x_{\Phi j}(k)$ ,  $z_{\Phi j}(k)$ ,  $y_{\Phi j}(k)$  – фильтрованные значения фазовых координат;  $N$  – количество измерений в одном опыте. Значения  $\Delta_\Sigma(k)$  нормировались к СКО текущих оценок для 5000 проведенных опытов. На рис. 3, а–б представлены значения суммарной ошибки измерения местоположения для модельных экспериментов № 1 и № 2.

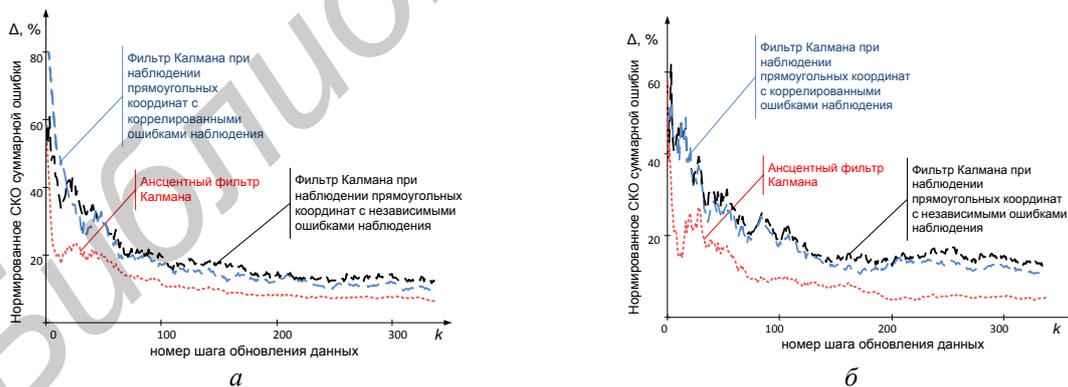


Рис. 3. Результаты сопоставительного моделирования: а – модельный эксперимент № 1; б – модельный эксперимент № 2

*Результаты моделирования.* Анализ рис. 3, а, б и данных таблицы показывает, что все предложенные алгоритмы фильтрации позволяют уменьшить ошибку измерения. Ансцентный фильтр Калмана имеет лучшие показатели качества, чем модификации ФК (в случае с постоянной частотой вращения: до 15 % относительно фильтра Калмана при наблюдении прямоугольных координат с коррелированными ошибками наблюдения и до 10 % относительно фильтра Калмана при наблюдении прямоугольных координат с независимыми ошибками наблюдения; в случае с переменной частотой вращения: до 21 % относительно

фильтра Калмана при наблюдении прямоугольных координат с коррелированными ошибками наблюдения и до 18 % относительно фильтра Калмана при наблюдении прямоугольных координат с независимыми ошибками наблюдения). Это объясняется использованием в АФК алгоритма экстраполяции, учитывающего спиральное вращение БО при возвращении в плотные слои атмосферы.

#### Результаты математического моделирования

Среднее значение суммарной ошибки $\bar{\Delta}_\Sigma$ , м	Разовая ошибка	Ансцентный фильтр Калмана	Фильтр Калмана при наблюдении прямоугольных координат с независимыми ошибками наблюдения	Фильтр Калмана при наблюдении прямоугольных координат с коррелированными ошибками наблюдения
Модельный эксперимент №1. Постоянная круговая частота	62,366	9,74	17,186	15,035
Модельный эксперимент №2. Переменная круговая частота	61,681	10,473	27,02	25,349

#### Заключение

В ходе проведенных исследований была рассмотрена модель движения БО, совершающего спиральный маневр при вхождении в атмосферу; представлены особенности построения модификаций ФК и АФК при сопровождении БО. Модель БО рассмотрена в первой части, особенности построений фильтров перечислены во второй части. В третьей части проанализировано качество измерений координат БО в различных модификациях фильтров. Результаты математического моделирования демонстрируют преимущество АФК в сравнении с рассматриваемыми модификациями ФК при наблюдении маневрирующего БО.

## FILTERING FEATURES FOR TRACKING OF SPIRALING REENTRY VEHICLES

A.S. SOLONAR, P.A. KHMARSKI

#### Abstract

The target dynamics model for tracking of spiraling reentry vehicles is considered. The features of Extended Kalman filter modification and Unscented Kalman filter are listed. The estimation performance of Extended Kalman filter modification and Unscented Kalman filter is compared.

#### Список литературы

1. Kim J., Vaddi S., Menon P., Ohlmeyer E. // IEEE transaction on A&ES. 2012. Vol. 48. №1. P. 313–328.
2. Ohlmeyer E., Menon P., Kim J. // AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. 2010.
3. Kim J., Vaddi S., Menon P., Ohlmeyer E. // AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. 2010.
4. Vaddi S., Menon P., Ohlmeyer E. // AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 2007.
5. Moon K.R., Kim T.H., Song T.L. // JASS. 2012. Vol. 29. № 4. P. 363–374.
6. Zarchan P. // IEEE Position, Location, and Navigation Symposium, San Diego, CA, 2000.
7. Farina A., Ristic B., Benvenuti D. // IEEE transaction on A&ES. 2002. Vol. 38. № 3. P. 854–867.
8. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М., 1974.
9. Солонар А.С., Хмарский П.А. // Матер. МНТК, приуроченной к 50-летию МРТИ-БГУИР. Минск, 18–19 марта 2014. С. 78–79.
10. Солонар А.С., Хмарский П.А. // Тез. докл. 30 НТК «Агат-Системы управления», 2013.
11. Солонар А.С., Хмарский П.А. // Докл. БГУИР. 2012. № 7. С. 47–53.
12. Шурман Я.Д. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. М., 2007.
13. Blackman S. Design and analysis of modern tracking systems. Boston, London, 1999.
14. Julier S., Uhlmann J. // IEEE Trans. on Automatic Control. 2000. Vol. 45. № 3. P. 477–482.
15. Солонар А.С., Хмарский П.А. // Докл. БГУИР. 2013. № 2. С. 79–86.

УДК 539.216:546.824-31

## КООПЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАПРОСОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫМИ ДАННЫМИ

П.Ю. ПИНЮТА, В.В. БАХТИЗИН

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

*Поступила в редакцию 28 июля 2014*

Рассмотрен ряд методов планирования задач. Произведен их сравнительный анализ с точки зрения адаптации к системам управления идентификационными данными. Предложен кооперационный метод планирования запросов в системах управления идентификационными данными. Для уменьшения количества блокировок запросов предложен алгоритм подсчета наилучшего момента запуска долгосрочных запросов на основе истории запросов к целевой системе. Приведены результаты экспериментального исследования.

Ключевые слова: идентификационные данные, кооперационный метод планирования, распределение задач.

### Введение

Одним из главных элементов информационной инфраструктуры является система управления идентификационными данными (СУИД). Она обеспечивает ролевое управление доступом к ресурсам на основе единой политики безопасности и должностных обязанностей сотрудника. Безопасность любого крупного бизнеса опирается на централизованное управление идентификационными данными совместно с корпоративной стратегией безопасности, обеспечением защиты корпоративных сетей и межсетевых взаимодействий [1].

Внедрение на предприятии СУИД позволяет в значительной степени минимизировать риски, связанные с корпоративной безопасностью. С ростом числа корпоративных приложений некоторые запросы СУИД способны заблокировать работу целевой системы (ЦС) на некоторое время. Под ЦС следует понимать систему, дающую авторизованному пользователю определенные права и привилегии. Количество пользователей может варьироваться от сотен до нескольких десятков тысяч. ЦС делегирует СУИД механизмы управления идентификационными данными пользователей. Процесс передачи этих механизмов называется интеграцией ЦС в СУИД. Примерами ЦС служат операционные системы, базы данных, системы электронного документооборота и т.п.

При использовании современных СУИД риск простоя оборудования и персонала остается высоким. Для его уменьшения в статье предлагается кооперационный метод планирования запросов в СУИД.

### Теоретический анализ

Каждый запрос, пришедший от пользователя, делится на две категории: краткосрочный и долгосрочный. Под краткосрочным запросом понимается такой запрос, время выполнения которого незначительно, до одной минуты, а приоритет выполнения низкий. Например, добавление, удаление, блокирование пользователя, выделение ресурсов пользователю и т. д.

Приоритет долгосрочного запроса выше. Его обработка занимает больше ресурсного времени ЦС (от нескольких минут до нескольких дней в зависимости от типа ЦС и количества

пользователей). Это связано с тем, что для обработки запроса требуется опрос большого числа серверов со значительным числом пользователей. Одним из главных требований к выполнению подобных запросов является требование к непрерывности работы долгосрочных запросов. Оно продиктовано тем, что изменение идентификационных данных в ЦС во время работы долгосрочных запросов крайне нежелательно. Примерами таких запросов могут являться аудит ЦС, генерация различных отчетов и т.п.

В настоящее время на предприятиях при управлении проектами, организации мультизадачности, разработке программного обеспечения, тестировании широко применяется планирование. Однако внедрение в СУИД методов планирования из большинства областей является нецелесообразным. Например, такие методы области управления проектами, как мозговой штурм, диаграммы Ишикавы, диаграммы Ганта, анализ критического пути (PERT графы), необходимы для упрощения работы сотрудников, но не автоматизации всего процесса планирования [2]. По этой причине их адаптация и внедрение в СУИД непродуктивны.

Для операционных систем все разработанные методы планирования основываются на следующих трех алгоритмах [3]: невытесняющем, вытесняющем, кооперационном. Они изначально разрабатывались с целью автоматического управления процессами в компьютерах. Рассмотрим возможность адаптации указанных алгоритмов планирования к СУИД.

Суть работы невытесняющего алгоритма планирования заключается в следующем. Один процесс загружается на выполнение. Ресурс освобождается только после полного выполнения данного процесса [4]. В контексте СУИД это видится как недостаток, так как запросы часто требуют согласования с пользователями. Следовательно, все остальные запросы из очереди будут находиться в состоянии ожидания, и общая скорость работы снизится.

Альтернативным невытесняющему алгоритму планирования является вытесняющий алгоритм. При его использовании операционная система сама передает управление от одной выполняемой программы другой в случае появления некоторых событий [4]. Отдельно стоит отметить, что момент передачи ресурсного времени от одной задачи другой не зависит от состояния выполняемой задачи. Это означает, что она может быть прервана в любой момент времени. При адаптации к СУИД указанная особенность алгоритма крайне негативно влияет на работу с ЦС. При поступлении нового запроса выполняющийся может быть прерван. А это противоречит требованию к непрерывности работы долгосрочных запросов.

Основное отличие кооперационного алгоритма от вытесняющего заключается в том, что следующая задача выполняется только после того, как текущая явно объявит себя готовой отдать ресурсное время [4]. Таким образом, следующая задача из очереди выполняется только после того, как текущая либо завершится, либо приостановится в связи с синхронизацией с каким-либо объектом. Применение данного алгоритма в классическом виде связано с монополизацией процессора, что, в общем, является недостатком. Однако с точки зрения СУИД это становится достоинством: управляющий процесс блокирует работу всех запросов к ЦС, удовлетворяя требование к непрерывности работы долгосрочных запросов.

На основе кооперационного алгоритма был предложен кооперационный метод планирования запросов к ЦС в СУИД. Его суть заключается в следующем. Любой запрос монополизует ЦС, блокируя выполнение других запросов. Освобождение ЦС происходит при завершении обработки запроса либо его приостановке. Так как разные категории запросов имеют различный приоритет, а обработка долгосрочного запроса не может быть прервана другим запросом, число блокировок краткосрочных запросов в период выполнения долгосрочного запроса должно быть минимальным. Для этого момент запуска долгосрочных запросов необходимо смещать. При этом он должен определяться наименьшим количеством заблокированных задач за время от начала до завершения работы долгосрочного запроса. С этой целью следует выбирать такой момент времени, при котором предполагаемая загрузка ЦС минимальна. Для расчета указанного момента предлагается алгоритм подсчета наилучшего момента запуска долгосрочных запросов на основе истории запросов к ЦС. Согласно данному алгоритму, наилучший момент времени определяется выражением:

$$\frac{\sum_{i=1}^N W_{\Pi}(\tau + \frac{T_{\Pi}}{N} \cdot i)}{N} \rightarrow \min_{\tau \in [0, T_{\Pi}]}, \quad (1)$$

где  $W_{\Pi}(\tau + \frac{T_{\Pi}}{N} \cdot i)$  – функция предполагаемой на основе истории запросов загрузки ЦС;  $T_{\Pi}$  – предполагаемое время, необходимое для выполнения долгосрочного запроса;  $\tau$  – момент времени запуска долгосрочного запроса;  $N$  – количество разбиений временного отрезка  $[\tau, \tau + T_{\Pi}]$ ;  $T_{\text{д}}$  – наибольший допустимый момент времени запуска долгосрочного запроса. Момент времени окончания обработки долгосрочного запроса может быть больше  $T_{\text{д}}$ .

В качестве метода минимизации функции выбран метод перебора, так как его применение для данной задачи является наиболее простым. Алгоритм подсчета наилучшего момента запуска долгосрочных запросов выглядит следующим образом:

- 1) выбрать некоторое число  $n$ , и разделить отрезок  $[0, T_{\text{д}}]$  на  $n$  равных частей;
- 2) инициализировать счетчик  $m = 0$  и значение  $\tau_m = (T_{\text{д}} \cdot m) / n$ ;
- 3) если  $m = n$ , перейти к шагу 6. Иначе к шагу 4;
- 4) если для всех  $\tau_k = (T_{\text{д}} \cdot k) / n$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, n$  выполняется условие:

$$\frac{\sum_{i=1}^N W_{\Pi}(\tau_m + \frac{T_{\Pi}}{N} \cdot i)}{N} \leq \frac{\sum_{i=1}^N W_{\Pi}(\tau_k + \frac{T_{\Pi}}{N} \cdot i)}{N} \quad (2)$$

перейти к шагу 6; иначе к шагу 5;

- 5) увеличить на 1 счётчик  $m$ . Обновить значение  $\tau_m = (T_{\text{д}} \cdot m) / n$ . Перейти к шагу 3;
- 6) момент времени  $\tau_m$  является искомым значением. Завершить алгоритм.

Для развертывания СУИД с разработанным кооперационным методом планирования запросов к ЦС следует выполнить следующие действия: 1) установить СУИД; 2) интегрировать в нее ЦС; 3) сформировать историю загрузки ЦС. Под историей загрузки понимается зависимость количества запросов, запущенных ранее, от времени. Последнее действие производится автоматически в течение некоторого времени после интеграции ЦС в СУИД. Это необходимо для корректного функционирования алгоритма. Если данная история не сформирована, то улучшенная СУИД будет работать так же, как и не улучшенная. Таким образом, достоинства разработанного метода проявляются по прошествии некоторого времени.

### Методика эксперимента

Для проведения эксперимента необходимо развернуть СУИД. В качестве ЦС был выбран домен Windows. Количество пользователей ЦС составляет 1000. Домен расположен в одном часовом поясе, пользователи работают в одну смену. Пусть рабочее время пользователей с 9 до 18 ч. В ходе эксперимента следует выполнить следующие действия.

1. Запуск в рабочие часы краткосрочных запросов на предоставление пользователям некоторых прав. Частота запускаемых краткосрочных запросов выражается формулой:

$$f(t) = \begin{cases} C, & t \in [9, 18] \\ 0, & t \notin [9, 18] \end{cases}, \quad (3)$$

где  $f(t)$  – частота запускаемых краткосрочных запросов;  $t$  – текущее время;  $C$  – константа, равная 60 запросов в час для данного эксперимента.

2. Запуск аудита ЦС. Время обработки данного запроса составляет около одного часа для данной ЦС. Момент запуска определяется началом рабочего дня администратора ЦС.

3. Сбор данных о заблокированных запросах. Фиксация количества запросов в очереди в момент времени  $t$ , где  $t$  находится на отрезке  $[0, 24]$ .

4. Определение реальной загрузки ЦС. Для этого необходимо выявить, какой процент времени в течение промежутка  $\Delta t$  ЦС обрабатывала запросы. Для вычисления значения реальной загрузки ЦС следует использовать следующую формулу:

$$W_p(t) = \frac{\sum_{i=1}^K W_3(t + \frac{\Delta t}{K} \cdot i)}{K} \cdot 100 \% \quad (4)$$

где  $W_p(t)$  – реальная нагрузка ЦС;  $t$  – текущее время;  $\Delta t$  – промежуток времени;  $w_3(t + \frac{\Delta t}{K} \cdot i)$  – функция загрузки ЦС, принимающее значение 1, если ЦС обрабатывает запрос в указанный момент времени, или 0, если запросов на обработке нет;  $K$  – количество разбиений временного отрезка  $[t, t + \Delta t]$ .

5. Развертывание СУИД с разработанным методом планирования запросов к ЦС и повторение шагов 2, 3, 4 алгоритма эксперимента, используя улучшенную СУИД.

### Анализ результатов эксперимента

На рис. 1 изображен график зависимости количества заблокированных запросов ( $L$ ) от времени суток ( $t$ ) для СУИД без улучшений. На этом графике заметен резкий рост количества заблокированных запросов в период работы аудита. После окончания обработки аудита ЦС была загружена ещё около часа, так как она обрабатывала запросы из очереди, сформировавшейся за время работы аудита. Как итог, для несложной и небольшой ЦС время ожидания предоставления прав некоторым пользователям составило более одного часа.

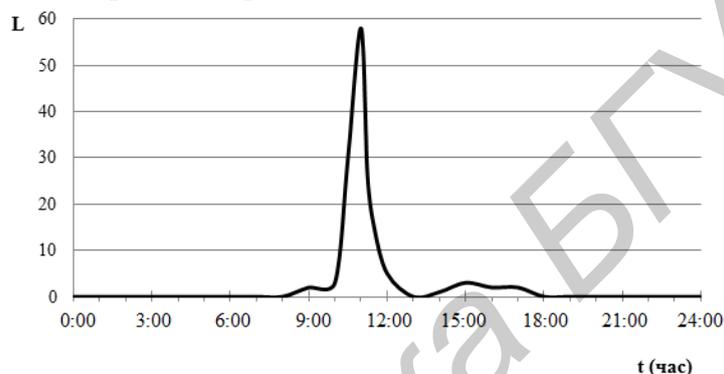


Рис. 1. График зависимости количества заблокированных запросов от времени суток

Применяя формулу (4) к полученным данным, была получена зависимость загрузки ЦС от времени суток. График указанной зависимости представлен на рис. 2. Как видно на графике, при обработке краткосрочных запросов загрузка ЦС не превышает 3%. В момент фактического запуска аудита (10:00) заметен всплеск загрузки ЦС. После завершения обработки этого запроса ЦС продолжала быть загруженной в течение одного часа, обрабатывая запросы из очереди.

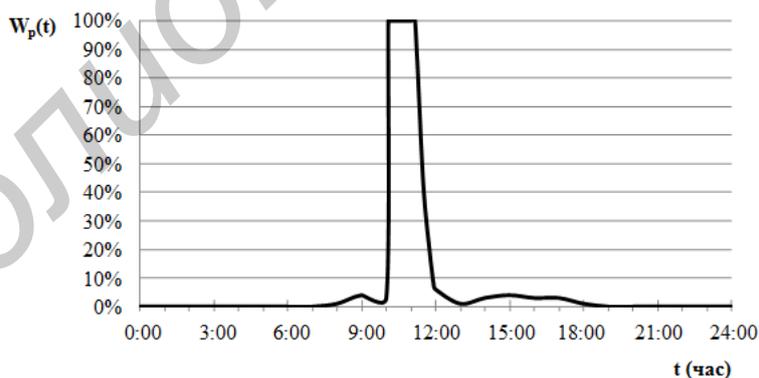


Рис. 2. График зависимости загрузки ЦС от времени суток

В ходе следующей части эксперимента с применением улучшенной СУИД были получены данные, значительно отличающиеся от описанных ранее. График зависимости количества заблокированных запросов от времени суток изображен на рис. 3.

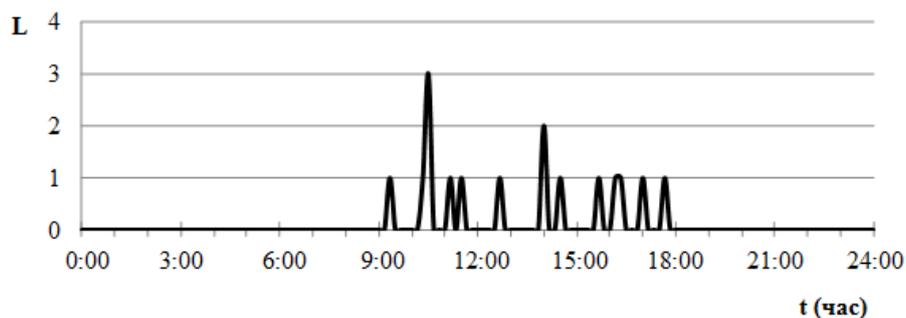


Рис. 3. График зависимости количества заблокированных запросов от времени суток с применением улучшенной системы управления идентификационными данными

При рассмотрении данного графика легко обнаружить, что отсутствует большая очередь в момент инициирования долгосрочного запроса администратором ЦС. Это связано с тем, что, применяя разработанный метод, СУИД сместила момент запуска обработки долгосрочного запроса на более позднее время. Данный запрос выполнялся в такое время, когда число заблокированных краткосрочных запросов ожидалось минимальным. Таким образом, продолжительность обработки всех краткосрочных запросов находилась в рамках обычных значений, то есть до одной минуты.

Для демонстрации позитивных изменений целесообразно показать зависимость загрузки ЦС. Полученный график изображен на рис. 4.

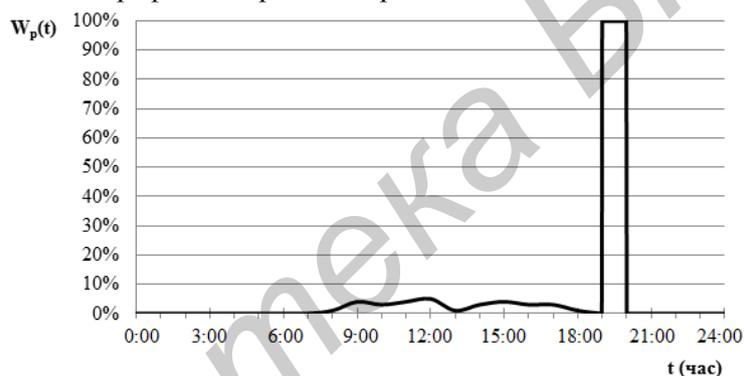


Рис. 4. График зависимости загрузки ЦС от времени суток с применением улучшенной системы управления идентификационными данными

На приведенном графике видно, что загрузка ЦС в момент фактического запуска обработки долгосрочного запроса (19:00) резко поднимается до 100 % так же, как и на рис. 2. Однако в отличие от ранее полученного графика, сразу после завершения обработки долгосрочного запроса, загрузка резко упала до нуля. Данный факт положительно влияет на общую производительность ЦС, так как период максимальной загрузки ЦС занимает значительно меньший промежуток времени. Тем самым у ЦС остаётся больше ресурсов на выполнение своих основных функций.

### Заключение

В ходе эксперимента была рассмотрена простая ЦС с небольшим количеством пользователей. Сотрудники работают в одну смену. Распределение моментов времени запуска краткосрочных запросов не учитывало социальных, культурных и других факторов. Эксперимент показал, что для описанной ЦС применение разработанного кооперационного метода планирования в СУИД уменьшает время ожидания сотрудниками запрошенных ресурсов. Данный факт положительно влияет на производительность труда на предприятии, так как персоналу больше не требуется ожидать окончания работы долгосрочных запросов, таких как аудит ЦС. Так же применение разработанного метода уменьшает период максимальной загрузки ЦС, что минимизирует влияние на выполнение непосредственных функций ЦС.

# COOPERATIVE METHOD OF REQUEST PLANNING IN IDENTITY MANAGEMENT SYSTEMS

P.Yu. PINIUTA, V.V. BAKHTIZIN

## Abstract

A number of planning methods was reviewed. The comparative analysis of the methods from the identity management adaptation point of view was produced. Cooperative method of request planing was created. Algorithm of best longterm request execuion time calculation was created for minimization of blocked requests. It was based on history of requests to a target system. The results of experimental research were shown.

## Список литературы

1. *Birch D.* Digital Identity Management: Technological, Business and Social Im. ВКР, 2007.
2. *Федюкин В.К.* Управление качеством процессов. СПб, 2005.
3. *Таненбаум Э.* Современные операционные системы: 3-е изд. СПб, 2010.
4. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Сетевые операционные системы: учебник для вузов. СПб, 2008.

УДК 303.725.23

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ В ИССЛЕДОВАНИИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

И.В. КОВАЛЕНКО, С.А. ПОТТОСИНА

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

*Поступила в редакцию 26 августа 2014*

Проанализированы процесс и этапы исследования факторов, влияющих на работоспособность социально-экономических систем. Обозначена область применения структурной функции, используемая методика опирается на аппарат многозначной логики, в ходе анализа рассматриваются лингвистические переменные. Особое внимание уделено исследованию чувствительности структурной функции на изменение одного или нескольких атрибутов.

*Ключевые слова:* работоспособность, отказ, многозначная логика, структурная функция, чувствительность структурной функции.

### Введение

В настоящее время существуют различные подходы к оценке рисков. Особый интерес представляет теория многозначной логики, определяющая современный подход к описанию бизнес-процессов, в которых присутствует неопределенность.

Несомненным достоинством многозначной логики является использование качественных (лингвистических) переменных вместо количественных. Как правило, не всегда есть возможность количественно оценить тот или иной фактор, поэтому использование качественных переменных дает дополнительные возможности в оценке исследуемых факторов. Преобразование количественных показателей в качественные называется дискретизацией. Оно предусматривает соотнесение комбинации значений нескольких показателей к  $m$ -уровневой шкале. В общем случае дискретизация не приводит к снижению достоверности значений используемых в СППР атрибутов. Более того, дискретизация позволяет соединить в одной модели как количественные, так и качественные показатели, что говорит о более полном и достоверном исследовании модели.

Для установления функциональной зависимости между входящими лингвистическими параметрами модели и выходящим параметром – работоспособностью всей системы необходимо построить специальную функцию, которая получила название структурной функции. Структурная функция устанавливает однозначное соответствие между возможными состояниями работоспособности элементов и работоспособностью системы [1–3]:

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \varphi(x): \{0, \dots, m-1\}^n \longrightarrow \{0, \dots, m-1\} \quad (1)$$

Одной из задач данной статьи является описание процесса создания структурной функции на примере регистрации абитуриентов на централизованное тестирование и анализ чувствительности полученной функции.

## Построение структурной функции

Для построения структурной функции необходимо четко и ясно представлять структуру процесса и состав задействованных в нем лиц.

С 2009 г. в Республике Беларусь внедрена новая процедура регистрации абитуриентов на централизованное тестирование на базе автоматизированной информационной системы. Это позволило упорядочить организацию регистрации и вести ее по принципу одного окна. Преимуществом данного введения является сокращение времени на регистрацию одного абитуриента за счет автоматизации всех этапов работы с документами. Кроме того, база данных позволяет оператору в пункте регистрации увидеть все свободные места во всех пунктах тестирования в пределах всей страны. Так как данная система является единственной возможностью записи абитуриентов на ЦТ, важно изучить факторы, влияющие на работы данной системы, а также другие факторы, влияющие на работоспособность процесса записи абитуриентов на централизованное тестирование в целом.

Основными этапами построения структурной функции работоспособности процесса записи на ЦТ абитуриентов являются:

- 1) определение переменных, включаемых в математическую модель;
- 2) группировка входящих переменных и нахождение промежуточных переменных на основе экспертной базы правил;
- 3) расчет структурной функции на основе полученных промежуточных переменных.

На рис. 1 представлена графическая интерпретация структурной функции процесса записи абитуриентов на централизованное тестирование.

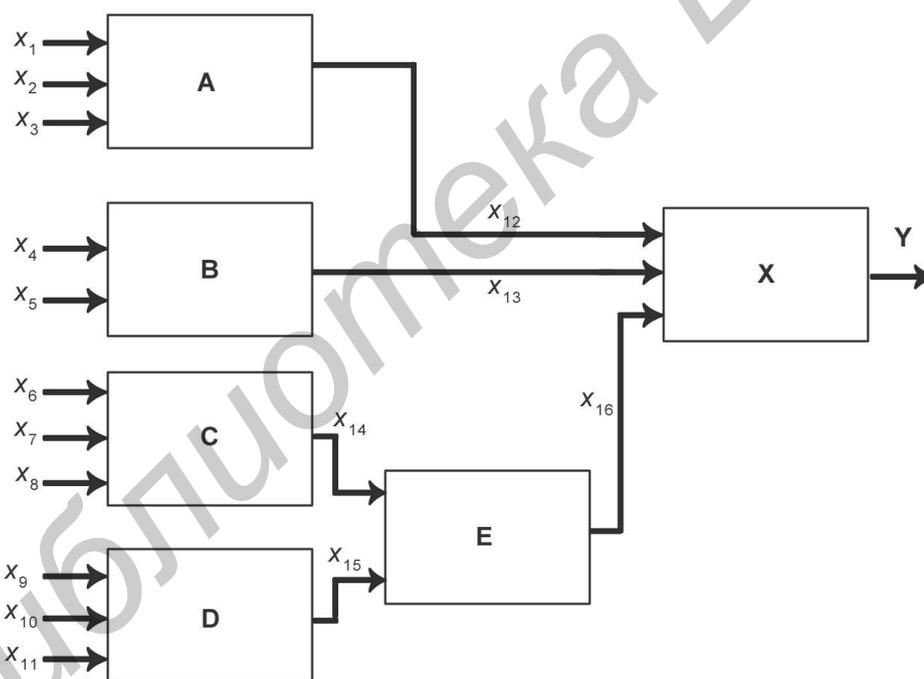


Рис. 1. Схема структурной функции процесса регистрации абитуриентов на централизованное тестирование

Анализируя влияние внутренних и внешних составляющих на рассматриваемый организационный процесс, были установлены следующие параметры: качество связи, качество используемого оборудования, число отключений электроэнергии, качество программного кода, качество БД и запросов к ней, квалификация операторов, квалификация ответственных, формирование аудиторного фонда, качество подготовительной работы, скорость реагирования службы поддержки, организация сервиса и технической поддержки. Безусловно, этот список переменных неполный, были отобраны основные факторы влияния. В табл. 1 приведены переменные и их значения с необходимыми расшифровками.

Таблица 1. Входные характеристики процесса записи абитуриентов на централизованное тестирование

Наименование атрибута	Значение атрибута и его описание		
	0	1	2
Качество связи ( $x_1$ )	Высокое	Среднее (кратковременные неполадки)	Низкое (постоянные сбои)
Качество используемого оборудования ( $x_2$ )	Высокое	Среднее	Низкое
Число отключений электроэнергии ( $x_3$ )	от 0 до 1	от 1 до 2, продолжительность 5–10 мин	от 3 до 4 (максимальная продолжительность день)
Качество программного кода ( $x_4$ )	Высокое (ошибок при использовании ПО не обнаружено)	Среднее (были незначительные ошибки, не влияющие на функционирование по в целом)	Низкое (ошибки, влияющие на функционал ПО)
Качество БД и запросов к ней ( $x_5$ )	Высокое	Среднее	Низкое
Квалификация операторов ( $x_6$ )	Высокая	Средняя	Низкая
Квалификация ответственных ( $x_7$ )	Высокая	Средняя	Низкая
Формирование аудиторного фонда ( $x_8$ )	Высокое (учтен опыт предыдущих лет, правильно оценено необходимое количество посадочных мест)	Среднее (был допущен ряд устранимых организационных промахов)	Низкое (неправильная оценка количества посадочных мест)
Качество подготовительной работы ( $x_9$ )	Высокое (проведены подготовительные курсы)	Низкое (отсутствие подготовительных курсов)	
Скорость реагирования службы поддержки ( $x_{10}$ )	Исправление ошибок, неполадок в течение 1 ч	Исправление ошибок, неполадок в течение 4 ч	Исправление ошибок, неполадок в течение 8 ч
Организация сервиса и технической поддержки ( $x_{11}$ )	Отличное (своевременная помощь в решение всех организационных вопросов)	Среднее (дозвониться по интересующему вопросу получилось только после $n$ -раза)	Низкое (отсутствие службы поддержки)
Работоспособность системы в целом ( $y$ )	Работоспособная система (регистрация прошла без накладок)	Работоспособная система с частичным отказом (были накладки, однако все абитуриенты зарегистрированы)	Неработоспособная система (не все желающие смогли пройти регистрацию)

Группируются переменные по признакам принадлежности к классам: оборудование, ПО, организация. Это проводится для того, чтобы уменьшить вычислительную сложность структурной функции. После разбиения переменных на группы производится расчет промежуточных переменных на основе экспертной базы правил. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

$x_1$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
$x_2$	0	0	0	1	2	1	1	2	2	0	0	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1	2	2	
$x_3$	0	1	2	0	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
$X_A=x_{12}$	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	2	1	1	2	1	2	2
$x_4$	0	0	0	1	1	1	2	2	2																		
$x_5$	0	1	2	1	1	2	0	1	2																		
$X_B=x_{13}$	0	1	2	1	1	2	2	2	2																		
$x_6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$x_7$	0	0	0	1	2	1	1	2	2	0	0	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1	2	2	2
$x_8$	0	1	2	0	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
$X_C=x_{14}$	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	2	1	1	2	1	2	2
$x_9$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1									
$x_{10}$	0	0	0	1	2	1	1	2	2	0	0	0	1	1	1	2	2	2									
$x_{11}$	0	1	2	0	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2									
$X_D=x_{15}$	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1									
$x_{14}$	0	0	1	1	2	2																					
$x_{15}$	0	1	0	1	0	1																					
$X_E=x_{16}$	0	1	1	1	2	2																					

Рис. 2. Расчет промежуточных переменных

На базе найденных промежуточных переменных рассчитывается вектор-значений  $X$ . Результаты расчетов приведены на рис. 3.

$x_{12}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$x_{13}$	0	0	0	1	2	1	1	2	2	0	0	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1	2	2	2
$x_{16}$	0	1	2	0	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
$X$	0	0	1	0	1	1	1	1	2	0	0	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	2	2	2

Рис. 3. Расчет промежуточных переменных

Таким образом, результатом построения структурной функции процесса записи абитуриентов на централизованное тестирование стал вектор-столбец  $X$ , интерпретируемый как столбец таблицы истинности на упорядоченных наборах переменных.  $X=[001\ 011\ 112\ 001\ 112\ 112\ 112\ 222]$ . Далее полученная структурная функция может быть использована для определения работоспособности исследуемого процесса при заданных входных параметрах. Например, если известно, что качество оборудования и ПО, используемого при записи на тестирования, на высоком уровне, однако, квалификация операторов и ответственных – на низком уровне, а служба технической поддержки имеет средний показатель качества, то это может привести к потере данных и неработоспособности системы в целом (не все желающие смогут записаться на централизованное тестирование).

### Анализ чувствительности структурной функции

Одним из вариантов использования структурной функции является анализ влияния изменения значений исходных атрибутов на результирующий атрибут. В основу этого подхода положен тезис о том, что наибольшее внимание при анализе должно уделяться тем факторам, которые существеннее других способны повлиять на работоспособность системы или процесса и являются самыми рискованными с точки зрения достижения цели их существования. Знание чувствительности работоспособности к факторам позволяет оптимизировать величину и направление усилий менеджмента по организации социально-экономических процессов.

Для исследования чувствительности структурной функции используется полученный вектор-столбец  $X$ , а также промежуточные вектора  $X_A$ ,  $X_B$ ,  $X_C$ ,  $X_D$ ,  $X_E$ . Требуется исследовать чувствительность структурной функции на изменение (увеличение) значения атрибута  $x_{13}$  (качество ПО) с 0 на 1, при априори заданных значениях исходных атрибутов  $x_3 = 0$  (число отключений электроэнергии),  $x_4 = 0$  (качество программного кода),  $x_9 = 1$  (качество предварительной подготовительной работы).

Введем ряд обозначений. Условием наблюдения изменения результирующего атрибута, обусловленного сменой значения атрибута  $x$  с  $a$  на  $b$ , называется набор  $t_1, \dots, t_i, \dots, t_n$ ,  $t_i \in (0, \dots, m-1)$  значений исходных атрибутов  $x_1, \dots, x_i, \dots, x_n$ , при котором значения до изменения  $f(t_1, \dots, t_i, \dots, t_n)$  и после изменения  $f \cdot (t_1, \dots, t_i, \dots, t_n)$  различны.

Изменение значения  $m$ -уровневого атрибута с  $p$  на  $q$  будем записывать в виде  $D_{p \rightarrow q}$  ( $p, q \in \{0, \dots, m-1\}, p \neq q$ ).

Теоретико-множественную операцию разности множеств  $M \setminus Y$ , где  $M = \{0, \dots, m-1\}$  и  $Y \subseteq M$  будем обозначать в виде  $U_Y$ .

Для анализа влияния изменения отдельных переменных на результирующий фактор используется модифицированный метод Спиллмана для анализа чувствительности структурной функции, реализованной на  $m$ -уровневых компонентах [4].

1. Определить для исследуемого  $s$ -го атрибута изменение значений (начальная  $DD$ -последовательность).

2. Определить  $m$ -уровневые компоненты, находящиеся на пути транспортировки изменения от места возникновения до результирующего атрибута.

3. Вычислить  $DD$ -кубы для этих компонентов.

4. Выполнить операции пересечения начальной  $DD$ -последовательности с  $DD$ -кубами для компонентов, стоящих на пути транспортировки изменения (прямая фаза). Результатом является  $DD$ -последовательность.

5. Доопределить  $DD$ -последовательности исходными значениями компонентов, не лежащих на пути активизации (обратная фаза).

Вычисление  $DD$ -кубов проводится последовательно:

1. Вычислить отличную от нуля направленную логическую производную функции  $m$ -значной логики  $\partial \mathbf{X}(j \rightarrow k) / \partial x_i(a \rightarrow b)$  для  $j, k, a, b = 0, \dots, m-1; a \neq b; i = 1, \dots, n$  [5].

2. Определить номера  $t$  компонент вектора  $\partial \mathbf{X}(j \rightarrow k) / \partial x_i(a \rightarrow b)$ , равных  $(m-1)$ .

3. Записать  $DD$ -куб, используя параметры изменения  $j, k, a, b$  и  $m$ -значные представления номеров  $t = (t_1, \dots, t_{i-1}, t_{i+1}, \dots, t_n)_m$  по правилу:

а)  $i$ -му компоненту  $DD$ -куба соответствует запись  $D_{a \rightarrow b}$ , а последнему,  $(n+1)$ -му, -  $D_{j \rightarrow k}$ ;

б) поставить в соответствие  $l$ -му ( $l = 1, \dots, n, l \neq i$ ) компоненту  $DD$ -куба множество  $Y_l = \{0, \dots, m-1\} \setminus t_i$ ;

в) представить  $l$ -й компонент  $DD$ -куба символом  $U_{Y_l}$ .

На пути транспортировки заданного изменения  $D_{0 \rightarrow 1}$  аргумента  $x_{13}$  находится компонент  $\mathbf{X}$ . Заранее сформируем для этого компонента  $DD$ -кубы и запишем их в табл. 2.

Таблица 2.  $DD$ -кубы для компонента  $\mathbf{X}$

Отличная от нуля направленная логическая производная	$DD$ -куб		
	Исходные атрибуты		Результирующий
$x_{17} = f_{\mathbf{X}}(x_{12}, x_{13}, x_{16}), \mathbf{X} = [001\ 011\ 112\ 001\ 112\ 112\ 112\ 112\ 222]$			
$\partial \mathbf{X}(0 \rightarrow 1) / \partial x_{12}(0 \rightarrow 1)$	$D_{0 \rightarrow 1}$	1 0	$D_{0 \rightarrow 1}$
$\partial \mathbf{X}(1 \rightarrow 2) / \partial x_{12}(0 \rightarrow 1)$	$D_{0 \rightarrow 1}$	1 2	$D_{1 \rightarrow 2}$
$\partial \mathbf{X}(0 \rightarrow 1) / \partial x_{12}(0 \rightarrow 2)$	$D_{0 \rightarrow 2}$	0 $U_1$	$D_{0 \rightarrow 1}$
	$D_{0 \rightarrow 2}$	1 0	$D_{0 \rightarrow 1}$
$\partial \mathbf{X}(1 \rightarrow 2) / \partial x_{12}(0 \rightarrow 2)$	$D_{0 \rightarrow 2}$	$U_1$ 2	$D_{1 \rightarrow 2}$
	$D_{0 \rightarrow 2}$	2 1	$D_{1 \rightarrow 2}$
$\partial \mathbf{X}(0 \rightarrow 1) / \partial x_{13}(0 \rightarrow 1)$	$U_1$	$D_{0 \rightarrow 1}$ 1	$D_{0 \rightarrow 1}$
$\partial \mathbf{X}(1 \rightarrow 2) / \partial x_{13}(0 \rightarrow 1)$	1	$D_{0 \rightarrow 1}$ 2	$D_{1 \rightarrow 2}$
$\partial \mathbf{X}(0 \rightarrow 1) / \partial x_{13}(0 \rightarrow 2)$	0	$D_{0 \rightarrow 2}$ $U_1$	$D_{0 \rightarrow 2}$
	1	$D_{0 \rightarrow 2}$ $U_1$	$D_{0 \rightarrow 1}$
$\partial \mathbf{X}(1 \rightarrow 2) / \partial x_{13}(0 \rightarrow 2)$	$U$	$D_{0 \rightarrow 2}$ 2	$D_{1 \rightarrow 2}$
	2	$D_{0 \rightarrow 2}$ 2	$D_{1 \rightarrow 2}$
$\partial \mathbf{X}(0 \rightarrow 1) / \partial x_{13}(1 \rightarrow 2)$	0	$D_{1 \rightarrow 2}$ $U_0$	$D_{0 \rightarrow 1}$
$\partial \mathbf{X}(1 \rightarrow 2) / \partial x_{13}(1 \rightarrow 2)$	$U_0$	$D_{1 \rightarrow 2}$ 2	$D_{1 \rightarrow 2}$
	2	$D_{1 \rightarrow 2}$ $U_1$	$D_{1 \rightarrow 2}$
$\partial \mathbf{X}(0 \rightarrow 1) / \partial x_{16}(0 \rightarrow 1)$	0	1 $D_{0 \rightarrow 1}$	$D_{0 \rightarrow 1}$
$\partial \mathbf{X}(0 \rightarrow 1) / \partial x_{16}(1 \rightarrow 2)$	0	$U_2$ $D_{1 \rightarrow 2}$	$D_{0 \rightarrow 1}$
	1	0 $D_{1 \rightarrow 2}$	$D_{0 \rightarrow 1}$
$\partial \mathbf{X}(1 \rightarrow 2) / \partial x_{16}(1 \rightarrow 2)$	$U_1$	2 $D_{1 \rightarrow 2}$	$D_{1 \rightarrow 2}$
	1	1 $D_{1 \rightarrow 2}$	$D_{1 \rightarrow 2}$
	2	$U_1$ $D_{1 \rightarrow 2}$	$D_{1 \rightarrow 2}$

Активизируем путь транспортировки  $D_{0 \rightarrow 1}$  изменения атрибута  $x_{13}$  к результирующему атрибуту и сформируем  $DD$ -последовательность (табл. 3).

Таблица 3. Построение  $DD$ -последовательности для атрибута  $x_{13}$  (оценка качества ПО) структурной схемы

Компо- нент	Атрибуты структурной функции																
	Исходные										Промежуточные				Результир.		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_{16}$	$X$
*											1	$D_{0 \rightarrow 1}$				2	$D_{1 \rightarrow 2}$
A	$U_2$	$U_2$	<b>0</b>								1						
B				<b>0</b>	$U_1$												
C						$U$	2	$U$						2			
D									<b>1</b>	$U_1$	$U$				$U_1$		
E													2	$U_1$		2	
$DD$ -последовательность																	
	$U_2$	$U_2$	0	0	$U_1$	$U$	2	$U$	1	$U_1$	$U$	1	$D_{0 \rightarrow 1}$	2	$U_1$	2	$D_{1 \rightarrow 2}$

Таким образом, условия для обнаружения изменения  $D_{0 \rightarrow 1}$  атрибута  $x_{13}$  структурной функции (рис. 1) имеют вид:  $U_2 U_2 0 0 U_1 U 2 U 1 U_1 U 1 U_1 U 1$ . Дадим экономическую интерпретацию полученного результата.

Изменение качества программного кода ( $D_{0 \rightarrow 1}$ ) в априори заданных условиях: число отключений электроэнергии планируется равным 0 или 1, качество программного кода высокое, а проведенная подготовительная работа организаторов записи на ЦТ оценивается средне, приведет к ухудшению работоспособности системы при условиях:

- качество связи будет находиться на среднем или низком уровне;
- качество используемого оборудования на среднем или низком уровне;
- качество БД и запросов к ней среднее;
- низкой квалификации ответственных;
- не зависит от организации формирования аудиторного фонда;
- время отклика службы поддержки на запросы не менее 4 часов.

При выполнении данных условий возможно изменение работоспособности всего процесса регистрации на ЦТ с частично работоспособного до неработоспособного. Аналогично анализируется чувствительность результирующего атрибута (работоспособность системы) от изменения значений других исходных атрибутов.

### Результаты и их обсуждение

Итогом исследования работоспособности процесса записи абитуриентов на централизованное тестирование стал вектор-столбец  $X$ , интерпретируемый как столбец таблицы истинности на упорядоченных наборах переменных.  $X=[001 011 112 001 112 112 112 222]$ . Данная структурная функция может быть использована для оценки последствий принятия решений при заданных значениях входного параметра. Кроме того, она является отправной точкой в следующих направлениях.

1. Исследование чувствительности структурной функции при изменении одного или нескольких входных параметров. Результаты исследования чувствительности позволяют оценить принятое решение и аргументировать его: при каких условиях и как выбранное решение окажет влияние на результат.

2. Исследование вероятности наступления неработоспособного состояния исследуемого процесса. Данное исследование отвечает на вопрос: «С какой вероятностью наступит частичный или полный отказ исследуемого процесса?»

3. Создание автоматизированной системы поддержки принятия решений данного организационного процесса.

### Заключение

Выполнен анализ факторов, влияющих на работоспособность процесса регистрации участников централизованного тестирования, разработана структурная функция и проведено исследование чувствительности полученной функции на изменение одного из параметров.

Разработанная структурная функция может использоваться для обоснования управленческих решений по вопросам организации записи абитуриентов на централизованное тестирование.

В процессе исследования использована эффективная методика анализа работоспособности экономических объектов и процессов. Применение данной методики в анализе работоспособности позволит снизить риски частичного или полного отказа работоспособности исследуемых объектов в будущем. Дальнейшее исследование и дополнение данной методики позволит более полно оценить влияния различных факторов на работоспособность системы в целом.

## THE UTILIZATION OF MULTIVALUED LOGIC IN SOCIOECONOMIC SYSTEMS RESEARCH

I.V. KOVALENKO, S.A. POTTOSINA

### Abstract

The new applying of multivalued logic for factors affecting the operation of socio-economic systems estimation, the example of the enrollees process registration for state exams by building structure function are described. It was suggested the algorithm for the study of factors affecting the performance of the social process. The practical significance is in the implementation of procedures to assess the significance of factors affecting the performance of the process holding records for centralized testing.

### Список литературы

1. *Yau M., Apostolakis G., Guarro S.* // Reliability Engineering & System Safety. 1998. Vol. 62. №1–2. P. 23–32.
2. *Zaitseva E., Levashenko V.* // Proc. of the IEEE 52nd Annual Reliability & Maintainability Symposium (RAMS). Newport Beach, USA, January 23–26, 2006. P. 253–259.
3. *Левашенко В.Г., Козлова И.К., Поттосина С.А.* // Докл. БГУИР. 2008. №1 (31). С.115–123.
4. *Matiaško K., Zaitseva E., Kovalik Š. et.al.* // J. of Electrical Engineering (Slovak Centre of IEEE). 2005. Vol. 56. № 11–12. P. 306–312.
5. *Шмерко В.П., Левашенко В.Г., Янушкевич С.Н.* // Кибернетика и системный анализ НАН Украины. 1996. № 6. С. 41–58.

УДК 539.216:546.824-31

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ВОЛНЫ С АНИЗОТРОПНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ПЛАЗМАПОДОБНОГО ТИПА

Е.Ю. ЗАЯЦ, В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, К.И. КРЕМЕНЯ

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

Поступила в редакцию 23 декабря 2014

Приведен анализ сравнения оценочных параметров во временной и частотной областях при воздействии импульсного сигнала гауссовой формы с анизотропной неоднородностью плазмаподобного типа с учетом электродинамических параметров наполнителя. Установлены закономерности трансформации спектральных характеристик импульсного сигнала при воздействии на анизотропную неоднородность.

*Ключевые слова:* импульсная волна, анизотропная среда, оценочные параметры, спектральная характеристика.

### Введение

При взаимодействии импульсных сигналов с анизотропной неоднородностью плазмаподобного типа (АНПТ) происходит раздвоение эхо-импульса. Вслед за мощным импульсом, отраженным от земной поверхности, появляется ослабленный земной толщей импульс, отраженный от АНПТ. Временной промежуток между импульсами соответствует глубине залегания пласта.

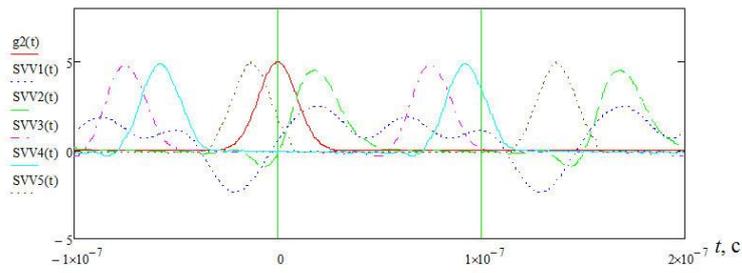
Основой импульсных методов электроразведки является облучение поверхности Земли короткими радио- или видеосигналами и измерения отраженных сигналов от границ с разными электродинамическими параметрами [1].

### Анализ сравнения оценочных параметров во временной области

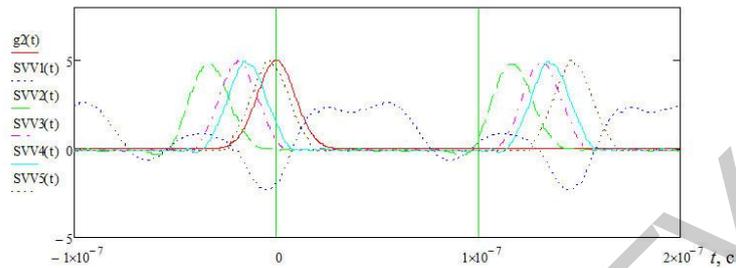
С целью определения параметров самой среды был проведен анализ оценочных параметров во временной области существующих аномальных проявлений для сигнала с параметрами амплитуды ( $U$ ) 5 В, длительности ( $\tau_1$ ) 40 нс и периода повторения ( $T_1$ ) 150 нс. Проведено исследование трансформации формы импульсных сигналов, отраженных от анизотропной среды, в зависимости от изменения таких параметров как концентрация (рис. 1), частота столкновения (рис. 2) при вертикальной и горизонтальной поляризации.

Из рис. 1 видно, что отраженный сигнал приходит на приемную сторону с некоторым запаздыванием. С ростом концентрации при обоих видах поляризации наблюдается увеличение временной задержки рис. 2. С приближением значения концентрации к  $1 \cdot 10^{14}$  сигнал «размывается» во временной области – увеличивается ширина спектра и уменьшается амплитуда.

Так же критерием временных характеристик является трансформация длительности импульса по половинной амплитуде  $\alpha_\tau = \tau_0 \tau_2$ , где  $\tau_0$  – время входного импульса по половинной амплитуде;  $\tau_2$  – время выходного импульса по половинной амплитуде. С уменьшением концентрации увеличивается длительность импульса по половинной амплитуде и, следовательно, уменьшается значение отношения  $\tau$ .

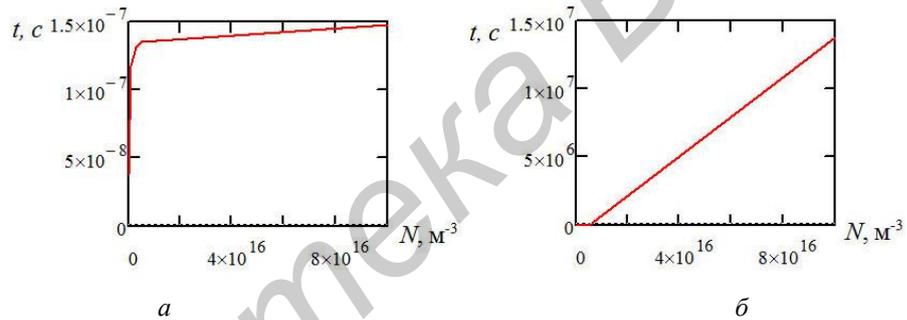


*a*



*б*

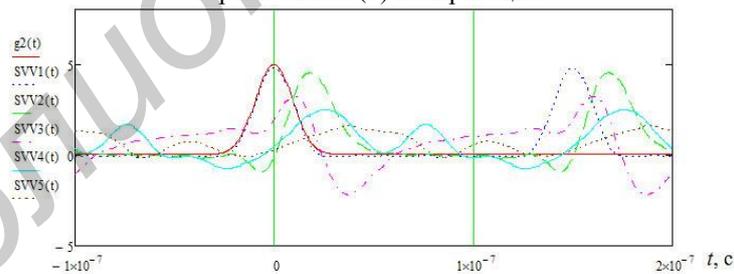
Рис. 1. График отраженного сигнала при изменении концентрации для вертикальной (*a*) и горизонтальной (*б*) поляризаций



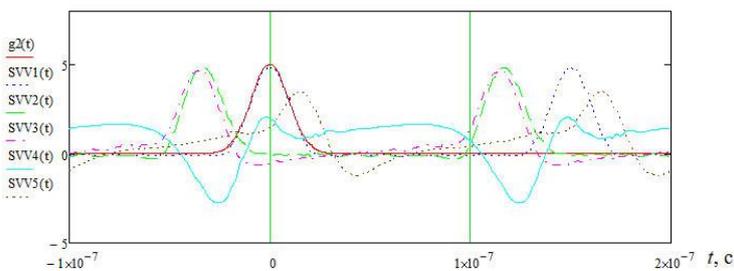
*a*

*б*

Рис. 2. Временная задержка при изменении концентрации для горизонтальной (*a*) и вертикальной (*б*) поляризаций



*a*



*б*

Рис. 3. График отраженного сигнала при изменении частоты столкновения для вертикальной (*a*) и горизонтальной (*б*) поляризаций

При увеличении частоты столкновения при вертикальной поляризации увеличивается время задержки импульса и уменьшается трансформация длительности импульса по половинной амплитуде. При горизонтальной поляризации с ростом частоты столкновения уменьшается время задержки и увеличивается длительность импульса по половинной амплитуде (рис. 4). При обоих видах поляризации сигнал размывается во временной области.

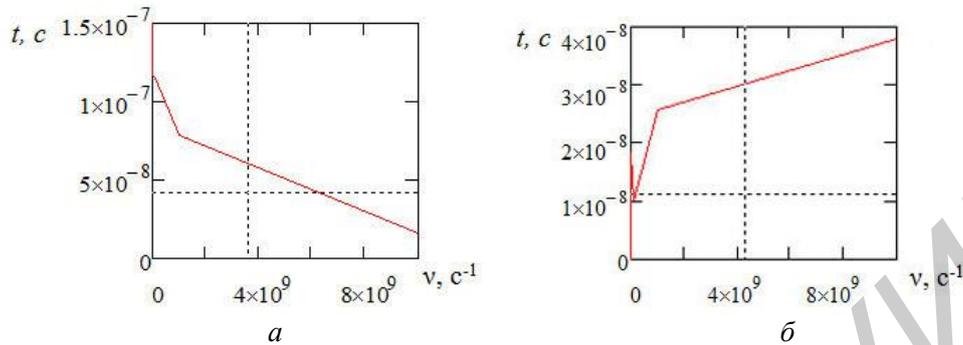


Рис. 4. Временная задержка при изменении частоты столкновения для горизонтальной (а) и вертикальной (б) поляризации

Полученные результаты позволяют установить закономерности поведения оценочных параметров временных характеристик от электродинамических параметров АНПТ, что позволяет создавать и уточнять алгоритмы обнаружения и осуществить собственно идентификацию конкретных АНПТ.

#### Анализ сравнения оценочных параметров в частотной области

Также следует проследить трансформацию спектральных характеристик импульсного сигнала при воздействии на анизотропную неоднородность плазмopodobного типа при вариации параметров диэлектрического наполнителя. На рис. 5 и 6 представлены графики изменения амплитудного (а) и фазового (б) спектров при вариациях концентрации частиц (для вертикальной и горизонтальной поляризации соответственно).

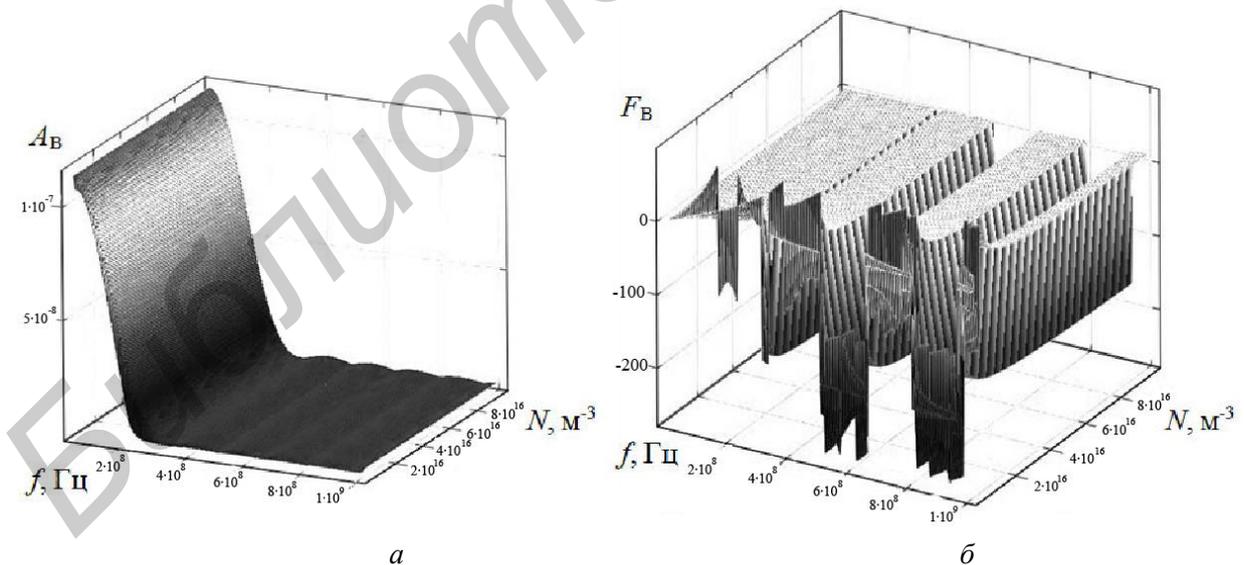


Рис. 5. Амплитудный (а) и фазовый (б) спектры отраженного сигнала при вариации концентрации частиц (вертикальная поляризация)

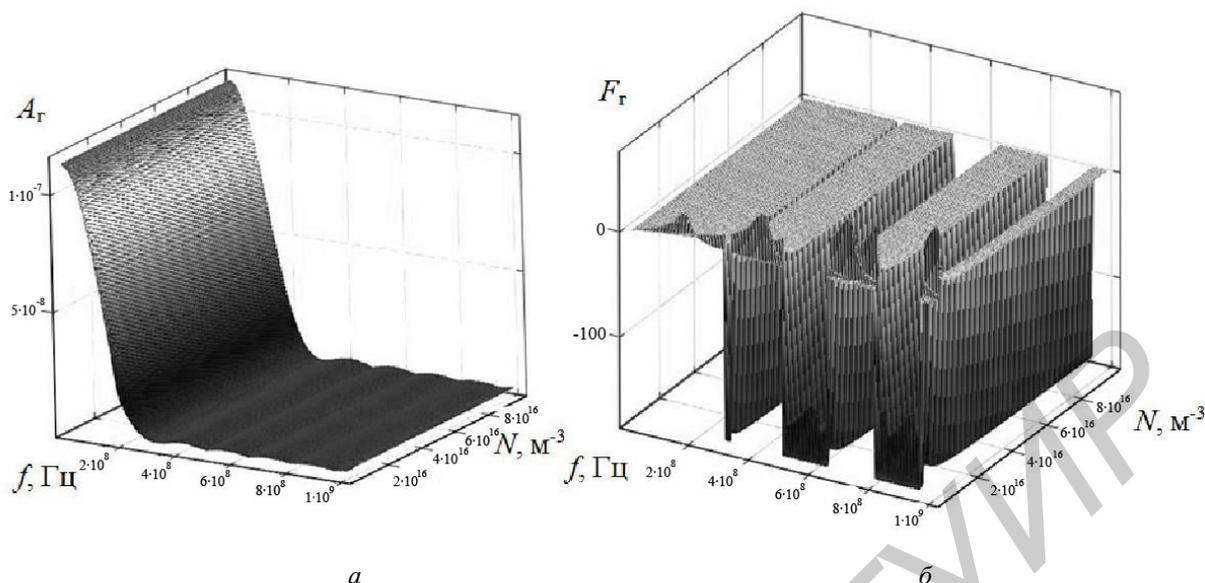


Рис. 6. Амплитудный (а) и фазовый (б) спектры отраженного сигнала при вариации концентрации частиц (горизонтальная поляризация)

Изменение концентрации приводит к изменениям не только в фазовом спектре, но и в амплитудном. При значениях, составляющих  $1 \cdot 10^{15}$ , изменения в амплитудном спектре минимальны, но с уменьшением концентрации частиц изменяется (уменьшается) ширина амплитуды по уровню 0,707 и уменьшается уровень боковых лепестков. Максимальное изменение соответствует значению концентрации  $\approx 1 \cdot 10^{14}$ . Отличием вертикальной и горизонтальной поляризаций при амплитудном спектре является меньший уровень боковых лепестков и длительность по половинной амплитуде.

Фазовый спектр трансформируется больше при вертикальной поляризации, максимально – при значениях концентрации частиц  $1 \cdot 10^{14}$ . С увеличением концентрации как при вертикальной, так и при горизонтальной поляризациях фазовый спектр становится линейным.

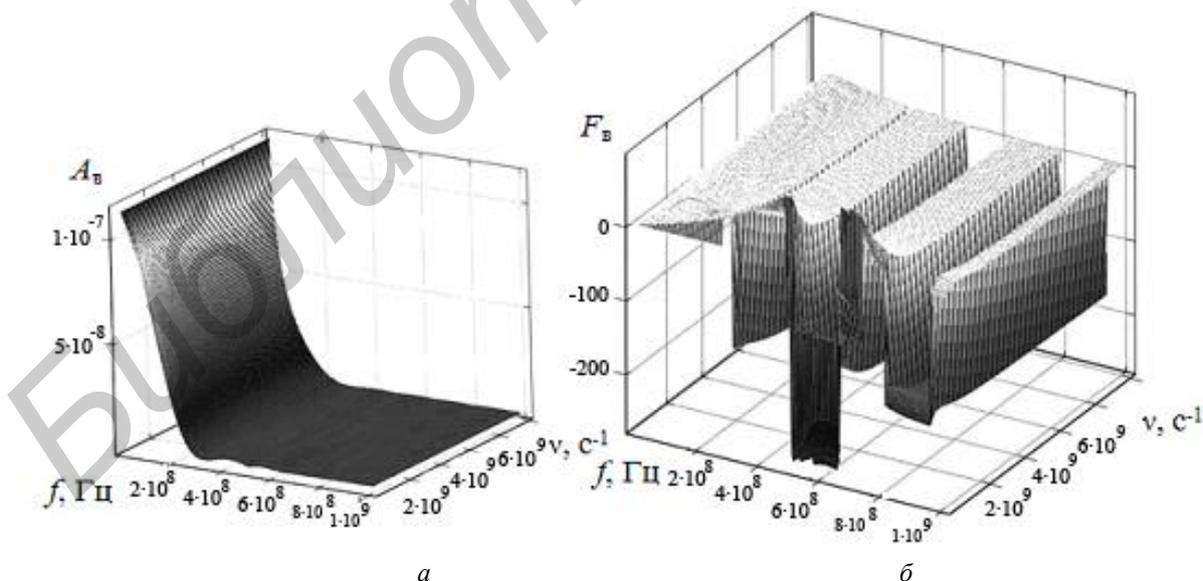


Рис. 7. Амплитудный (а) и фазовый (б) спектры отраженного сигнала при вариации частоты столкновения (вертикальная поляризация)

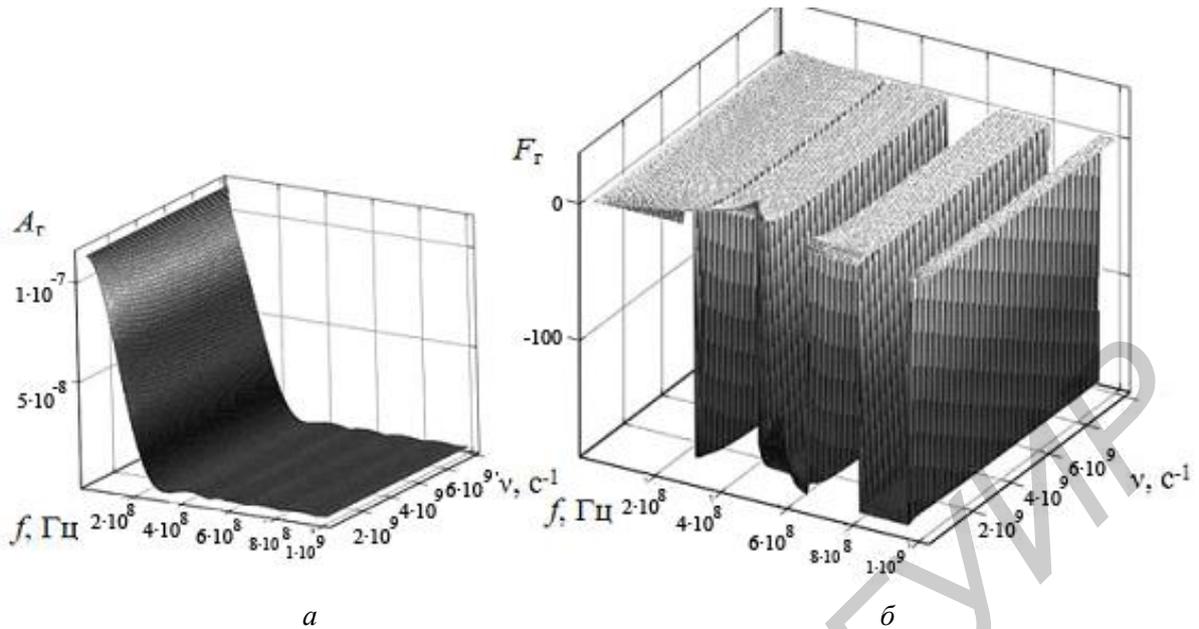


Рис. 8. Амплитудный (а) и фазовый (б) спектры отраженного сигнала при вариации частоты столкновения (горизонтальная поляризация)

Изменения амплитудного спектра максимальны при изменении частоты столкновения (рис. 8). Причем при вертикальной поляризации спектр трансформируется больше чем при горизонтальной. С увеличением частоты столкновения уменьшается длительность импульса по уровню 0,707. Уровень боковых лепестков трансформируется минимально. Так же, как и при проводимости среды, увеличение частоты столкновения влечет изменение ФЧХ. При значениях частоты  $1 \cdot 10^9$  и  $1 \cdot 10^{10}$  в диапазоне от 0 до  $5 \cdot 10^7$  появляется скачок. Такой же скачок, но меньший по уровню, прослеживается и при горизонтальной поляризации. На частоте  $1 \cdot 10^8$  ФЧХ изменяется как при диэлектрической проницаемости, но с большей амплитудой.

Для оценки амплитудного и фазового спектра следует также ввести несколько дополнительных параметров. Они позволяют провести количественное сравнение спектральных характеристик падающей и отраженной волн [2]:

- ширина нормированной АЧХ по уровню 0,707;
- уровень  $N$ -го лепестка АЧХ;
- изменение фазы  $\Delta\varphi(f) = \varphi(f) + \varphi_i(f)$ .

В таблице приведены результаты вычислений для первых двух величин при изменении концентрации и частоты столкновения.

**Значения ширины нормированной АЧХ по уровню 0,707 и уровень  $N$ -го лепестка АЧХ при вариации концентрации и частоты столкновения**

Параметр		Ширина по уровню 0,707		Изменение уровня боковых лепестков	
		Горизонтальная	Вертикальная	Горизонтальная	Вертикальная
Концентрация	$1 \cdot 10^{14}$	$1,42 \cdot 10^7$	$1,36 \cdot 10^7$	$1,55 \cdot 10^{-9}$	$3,96 \cdot 10^{-9}$
	$1 \cdot 10^{15}$	$1,55 \cdot 10^7$	$1,54 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$
	$3 \cdot 10^{15}$	$1,55 \cdot 10^7$	$1,54 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$
	$5 \cdot 10^{15}$	$1,55 \cdot 10^7$	$1,54 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$
	$1 \cdot 10^{17}$	$1,55 \cdot 10^7$	$1,54 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$
Частота столкновения	$1 \cdot 10^{10}$	$8,99 \cdot 10^6$	$1,35 \cdot 10^6$	$2,01 \cdot 10^{-9}$	$6,8 \cdot 10^{-10}$
	$1 \cdot 10^9$	$1,27 \cdot 10^7$	$5,89 \cdot 10^6$	$2,01 \cdot 10^{-9}$	$6,8 \cdot 10^{-10}$
	$1 \cdot 10^8$	$1,49 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^7$	$2,01 \cdot 10^{-9}$	$2,11 \cdot 10^{-9}$
	$1 \cdot 10^7$	$1,53 \cdot 10^7$	$1,51 \cdot 10^7$	$2,01 \cdot 10^{-9}$	$2,11 \cdot 10^{-9}$
	$1 \cdot 10^5$	$1,53 \cdot 10^7$	$1,51 \cdot 10^7$	$2,01 \cdot 10^{-9}$	$2,11 \cdot 10^{-9}$

Максимальное изменение ширины наблюдается при трансформации частоты столкновения, а уровня при изменении концентрации частиц. При трансформации частоты

столкновения при обоих видах поляризации наблюдается сужение главного лепестка, которое связано с существенной потерей энергии импульсного сигнала.

### **Заключение**

Полученные результаты позволяют установить закономерности поведения оценочных параметров временных и частотных характеристик в зависимости от электродинамических параметров АНПТ, что позволяет создавать и уточнять алгоритмы обнаружения и осуществить собственно идентификацию конкретных АНПТ.

## **INTERACTION OF PULSE WAVE WITH ANISOTROPIC ENVIRONMENT OF PLASMA LIKE TYPE**

E.Yu. ZAYATS, V.F. YANUSHKEVICH, K.I. KREMENYA

### **Abstract**

An analysis comparing the estimated parameters in the time and frequency domain with a Gaussian pulsed signal on the anisotropic environment of plasma like type with the electrodynamic parameters of filler is carried out. The regularities of the transformation of the spectral characteristics of the pulse signal subjected to anisotropic heterogeneity are established.

### **Список литературы**

1. *Гололобов Д.В.* Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. М., 2009.
2. *Гололобов Д.В., Качан И.А., Кунашко К.В.* // Докл. БГУИР. 2010. № 3 (49). С. 5–11.