

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И ПРИКЛАДНАЯ
ИНФОРМАТИКА**
№ 1, 2017

**SYSTEM ANALYSIS
AND APPLIED
INFORMATION SCIENCE**
No 1, 2017



**Международный
Научно-технический журнал**

Издается с декабря 2012 года

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Главный редактор

Сергей Васильевич Харитончик

Редакционная коллегия

В. Ф. Голиков (зам. главного редактора),
В. А. Богущ, Т. В. Борботько, В. Б. Байбурин (РФ),
Д. Ю. Большаков (РФ), Л. С. Герасимович, Н. Н. Гурский,
Ю. М. Захарик, И. А. Каляев (РФ), Г. О. Кипиани (Грузия),
Э. Г. Лазаревич, В. А. Липницкий, А. А. Лобатый,
В. А. Мищенко, Е. И. Никифорович (Украина),
А. А. Прихожий, И. А. Сатиков, В. В. Старовойтов,
П. П. Урбанович, А. Патрин (Польша),
Ю. Н. Петренко (ответственный секретарь),
Н. Н. Ташатов (Казахстан), А. В. Чигарев, Д. К. Щеглов (РФ)

**International
Science and Technique Journal**

Published since December, 2012

Founder

Belarusian National Technical
University

Editor-in-chief

Sergei V. Kharytonchyk

Editorial board

V. Golikov (deputy editor-in-chief), V. Bogush,
T. Borbotko, V. Baiburin (RF), D. Bolshakov (RF), N. Gurskiy,
L. Gerasimovich, J. Zaharik, I. Kalyaev, G. Kipiani (Georgia),
E. Lazarevich, V. Lipnitsky, A. Lobaty, V. Mishchenko,
E. Nikiforovich (Ukraine), A. Prihozhy, I. Satikov,
V. Starovoytov, P. Urbanovich, A. Patrin (Poland),
Y. Petrenko (executive secretary), N. Tashchatov
(Kazakhstan), A. Chigarev, D. Shcheglov (RF)

Журнал включен в "Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований".

Журнал включен в международные каталоги и базы данных:

- ❖ Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
- ❖ Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU
- ❖ Электронно-библиотечная система (ЭБС) издательства Лань
- ❖ DOAJ <https://doaj.org/toc/2414-0481>
- ❖ Google Scholar
- ❖ Киберленинка
- ❖ EBSCO
- ❖ BASE Search
- ❖ OpenAIRE
- ❖ WorldCat
- ❖ OpenDOAR
- ❖ ROAR

Содержание

Contents

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

- Карасик О. Н., Прихожий А. А.**
Усовершенствованный планировщик кооперативного
выполнения потоков на многоядерной системе 4
- Переварюха А. Ю.**
О методике моделирования онтогенетических из-
менений в жизненном цикле рыб и насекомых 12
- Старовойтов В. В., Старовойтов Ф. В.**
Сравнительный анализ безэталонных мер оценки
качества цифровых изображений 24
- Гулай А. В., Зайцев В. М., Гулай В. А.**
Соотношение свойств vita-среды и их интерпрета-
ций в интеллектуальной модели 33

SYSTEM ANALYSIS

- Karasik O. N., Prihozhy A. A.**
Advanced scheduler for cooperative execution of
threads on mu lti-core system 4
- Perevaryukha A. Y.**
On the technique of modeling ontogenetic changes in
fish and insects lifecycle..... 12
- Starovoitov V. V., Starovoitov F. V.**
Comparative analysis of no-reference quality measures
for digital images..... 24
- Gulay A. V., Zaytsev V. M., Gulay V. A.**
Correlation of properties of vita-medium and their
interpretations in intelligent model 33

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**Нго Фьонг Ле**

Генетический алгоритм для оптимизации проектирования синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами 42

Рулько Е. В.

Подход к имитации процесса принятия решений в системе моделирования военных действий 49

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**Маркевич В. Э.**

Повышение эффективности подавления активных помех в рлс перехвата воздушных целей в режиме обзора 57

Moustafa M. Kurdi

Коммуникационная сеть для гибрида мобильного робота и квадрокоптера 69

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ**Жданов О. Н., Соколов А. В.**

Метод синтеза базовых троичных бент-квадратов на основе оператора триадного сдвига 77

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ**Попова Ю. Б., Яцынович С. В.**

Программная реализация миграции контента по стандарту scorm в системе управления обучением... 87

MANAGEMENT OF TECHNICAL OBJECTS**Ngo Phuong Le**

Genetic algorithm in optimization design of interior permanent magnet synchronous motor 42

Rulko E. V.

The approach to imitation decision-making process in system of modelling of military operations 49

DATA PROCESSING AND DECISION-MAKING**Markevich V. E.**

Increase of efficiency of suppression of the active noise jamming in radar interception of air targets in the review mode 57

Moustafa M. Kurdi

Hybrid communication network of mobile robot and quad-cop 69

INFORMATION SECURITY**Zhdanov O. N., Sokolov A. V.**

The method of synthesis of basic ternary bent squares on the basis of process shift operator 77

INFORMATION TECHNOLOGIES IN EDUCATION**Popova Y. B., Yatsynovich S. V.**

Software implementation for scorm content migration in the learning management system 87

Ответственный секретарь редакции

Петренко Ю. Н.

Адрес редакцииул. Франциска Скорины 25/3, Минск,
220114,
Республика Беларусь
Тел. +375 17 267-66-84
e-mail: CA_PI@bntu.by**Executive secretary of the editorial board**

Y. Petrenko

Editorial board address25/3 Franciska Skariny str., Minsk, 220114,
Republic of Belarus
Tel. +375 17 267-66-84
e-mail: CA_PI@bntu.by

Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1540 от 08.06.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь

Подписано в печать 22.03.2016. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Ризография. Усл. печ. л. 7,67. Уч.-изд. л. 3,00. Тираж 150 экз. Заказ 960.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский национальный технический университет.
ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.
Пр. Независимости, 65, г. Минск, 220013

© Белорусский национальный технический университет

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

SYSTEM ANALYSIS

УДК 004.272.2 (075.8)

О. Н. КАРАСИК, А. А. ПРИХОЖИЙ

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ПЛАНИРОВЩИК КООПЕРАТИВНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ПОТОКОВ НА МНОГОЯДЕРНОЙ СИСТЕМЕ

Белорусский национальный технический университет

Рассматриваются три архитектуры планировщика кооперативного выполнения потоков в многопоточном приложении, исполняемом на многоядерной системе. Архитектура А0 использует средства взаимодействия и синхронизации потоков, предоставляемые операционной системой. Архитектура А1 вводит новый примитив синхронизации потоков и единую для планировщика очередь заблокированных потоков, благодаря которым уменьшает активность взаимодействия потоков с операционной системой и значительно ускоряет процессы блокировки и разблокировки потоков. Архитектура А2 заменяет единую очередь заблокированных потоков на отдельные очереди для каждого примитива синхронизации и расширяет набор внутренних состояний примитива, уменьшая взаимозависимость потоков планирования и значительно ускоряя процессы блокировки и разблокировки рабочих потоков. Архитектуры планировщика реализованы в операционных системах Windows на базе технологии User Mode Scheduling. Важные экспериментальные результаты получены для многопоточных приложений, реализующих два блочно-параллельных алгоритма решения систем линейных алгебраических уравнений методом Гаусса. Алгоритмы различаются способами распределения данных между потоками и моделями синхронизации потоков. Число потоков варьировалось от 32 до 7936. Архитектура А1 показала ускорение до 8.65%, а архитектура А2 показала ускорение до 11.98 % по сравнению архитектурой А0 на блочно-параллельных алгоритмах с учетом их прямого и обратного хода. На обратном ходе алгоритмов архитектура А1 дала ускорение до 125 %, а архитектура А2 дала ускорение до 413 % по сравнению архитектурой А0. Эксперименты убедительно доказывают, что предлагаемые в статье архитектуры А1 и А2 выигрывают у А0 тем значительно, чем большее количество блокировок и разблокировок потоков происходит во время выполнения многопоточного приложения.

Ключевые слова: Многопоточное приложение, планировщик, кооперативная модель, многоядерная система

Введение

В современном мире, когда многоядерные системы распространены повсеместно, разработка эффективных многопоточных приложений является актуальной и востребованной задачей. Однако создание многопоточного приложения, способного эффективно использовать весь потенциал многоядерной системы, является трудоемкой задачей, требующей привлечения высококвалифицированных специалистов. С одной стороны, разработка эффективного многопоточного приложения, способного адаптироваться к возможностям конкретной аппаратной архитектуры, требует глубокого понимания механизмов работы операционной системы и всех аппаратных компонентов. С другой стороны, алгоритмы планирования потоков, реализуемые операционными системами, в большинстве своем достаточно уни-

версальны и направлены на обеспечение производительности системы в целом, а не на достижение максимальной эффективности выполнения конкретного приложения. Зачастую они не учитывают особенности того или иного аппаратного компонента.

Поэтому для обеспечения переносимости и масштабируемости многопоточного приложения широкое распространение получили различные целевые библиотеки и платформы, реализующие алгоритмы планирования для эффективного выполнения многопоточных приложений с учетом режима многозадачности и в привязке к конкретной аппаратной архитектуре [1, 2, 3, 4].

В данной статье исследуются возможности повышения производительности библиотеки, предоставляющей средства разработки многопоточных приложений под операционными

системами (ОС) семейства Windows и поддерживающей кооперативную модель выполнения потоков. Эффективность разрабатываемых средств иллюстрируется на задаче решении систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) блочно-параллельными методами Гаусса [5-6] и алгоритмами кооперативного оптимального управления выполнением взаимодействующих потоков [8].

Базовая архитектура планировщика

В основу разрабатываемого планировщика пользовательских потоков положена технология User Mode Scheduling (UMS) [8], появившаяся в семействе операционных систем Windows, начиная с седьмой версии. Базовая архитектура А0 планировщика состоит из нескольких компонентов.

Менеджер памяти обеспечивает работу с оперативной памятью и наделен способностью точечного управления памятью планировщика при работе с NUMA (Non-Universal Memory Access) [9, 10], буферизации и т. д., а также способностью предотвращения взаимных блокировок между пользовательскими потоками и потоками планировщика.

Пользовательский поток (ПП) представляет собой надстройку над UmsThread и содержит информацию о конфигурации, состоянии и различных атрибутах, оказывающих влияние на обработку ПП планировщиком.

Поток планировщика (ППЛ) представляет собой надстройку над потоком операционной системы, выполняющимся в режиме UmsSchedulerThread. ППЛ конфигурирует выполнение ПП на логическом процессоре (ЛП), при этом, с целью группирования потоков, он использует очередь ОГПП готовых к выполнению ПП, очередь ОЗПП заблокированных ПП, а также указатель на единую очередь UmsCompletionList, предоставляемую ОС для передачи информации о соответствующих ПП UmsThread, отстранённых от выполнения по инициативе операционной системы (в случае блокировки по системным вызовам, ожидания выделения памяти, окончания выполнения и т.д.). Каждый логический процессор обслуживает свой ППЛ, дающий возможность выполнения любого потока ПП на данном логическом процессоре.

ОС Windows предоставляет широкий спектр примитивов синхронизации (мьютекс, собы-

тие, семафор и т.д.), однако блокировка UmsThread и соответствующего ПП осуществляется одинаково вне зависимости от типа примитива синхронизации.

Проанализируем процессы блокировки и разблокировки ПП (рис. 1) с использованием примитива синхронизации ПСОС, построенного средствами ОС. Процесс блокировки (рис. 1, а) осуществляется по цепочке ПП → ПСОС → ОС, при этом ПП вызывает одну из *wait* функций ОС и передает в нее дескриптор ПСОС. Вызов *wait* функции является системным, поэтому соответствующий ПП UmsThread блокируется ОС до его завершения. Вся цепочка выполняется без какого-либо взаимодействия ПП с ППЛ и реализуется посредством взаимодействия ПП с ОС.

В свою очередь, процесс разблокировки ПП с использованием ПСОС является достаточно сложным и осуществляется, с одной стороны, по цепочке ПП1 → ПСОС → ОС, посредством взаимодействия ПП1 с ПСОС и вызова функции, соответствующей данному примитиву синхронизации (рис. 1, б). ПСОС подает сигнал ОС на освобождение заблокированного потока UmsThread, получив который ОС, по цепочке ОС → UMSCl, добавляет разблокированный UmsThread в очередь UMSCl после чего, по цепочке ОС → ППЛ, посылает уведомление ППЛ (рис. 1, б). Получив уведомление, ППЛ по цепочке ППЛ → UMSCl → ОГПП → ПП, извлекает UmsThread из очереди UMSCl и сопоставляет разблокированный UmsThread с ПП. Далее ППЛ переводит разблокированный ПП в состояние «готов» и добавляет его в очередь ОГПП. После этого ППЛ

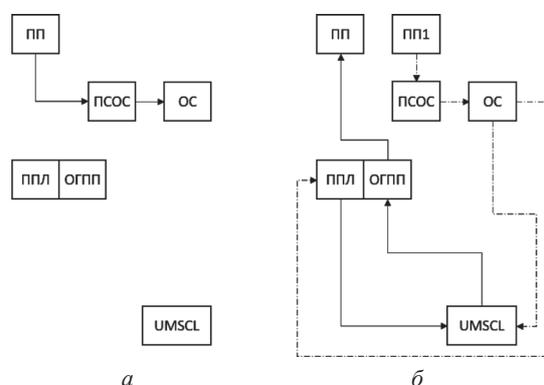


Рис. 1. Схематическое изображение процессов блокировки (а) и разблокировки (б) потока ПП с использованием базовой архитектуры А0 и примитива синхронизации ПСОС

извлекает ПП из ОГПП и переходит к его выполнению (рис. 1, б).

Модифицированная архитектура планировщика

С целью упрощения и ускорения процессов блокировки и разблокировки потоков ПП по сравнению с базовыми процессами блокировки и разблокировки `UmsThread` в ОС, разработан новый примитив синхронизации (ПС) и новая архитектура А1 планировщика. Они учитывают возможности, предоставляемые `UMS`, и расширяют их до библиотеки «Планировщик», предоставляющей эффективные средства кооперативного управления выполнением пользовательских потоков. Отличительной особенностью новой архитектуры и ПС является исключение взаимодействия с ОС при управлении ПП.

Взаимодействие ПС с ПП происходит согласно алгоритму, показанному на рис. 2. Процесс блокировки осуществляется следующим образом (рис. 2, а). ПП проверяет текущее состояние ПС. Если ПС находится в состоянии «установлен», то ПП, по цепочке ПП → ПС → ПП, изменяет его состояние на «не установлен» и продолжает выполнение. Если ПС находится в состоянии «не установлен», то ПП, по цепочке ПП → ПС → ППЛ → ОЗПП, регистрирует исполняющий его ППЛ для получения уведомления от данного ПС при переводе его с состояния «установлен» и возвращает управление исполняющему ППЛ, который изменяет состояние ПП на «заблокирован» и добавляет его в ОЗПП (рис. 2, а).

Процесс разблокировки происходит следующим образом (рис. 2, б). Поток ПП1, по це-

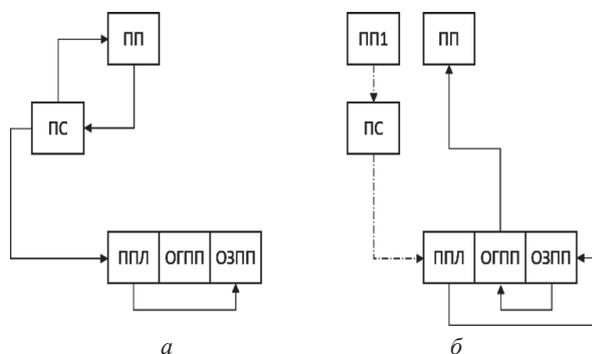


Рис. 2. Схематическое изображение процессов блокировки (а) и разблокировки (б) потока ПП с использованием модифицированной архитектуры А1 и примитива синхронизации ПС

почке ПП1 → ПС → ППЛ, переводит ПС в состояние «установлен» и посылает каждому зарегистрированному ППЛ уведомление о том, что данный ПС находится теперь в этом состоянии. ППЛ, получив уведомление от ПС, проверяет каждый ПП, находящийся в ОЗПП, на возможность его разблокировки. Все разблокированные ПП переводятся, по цепочке ППЛ → ОЗПП → ОГПП, в очередь ОГПП и становятся доступными для дальнейшего выполнения (рис. 2, б). Затем ППЛ выбирает из ОГПП следующий ПП и переходит к его непосредственному исполнению.

Анализ модифицированной архитектуры

С целью выявления достоинств и недостатков модифицированной архитектуры А1 планировщика потоков были проведены вычислительные эксперименты с многопоточными приложениями, решающими прикладные задачи. В частности, эксперименты над двумя блочно-параллельными алгоритмами Метод1 и Метод2 [5–7], реализующими метод Гаусса решения СЛАУ, показали, что время выполнения обратного хода как для Метода 1, так и для Метода 2 сократилось для каждого количества потоков (рис. 3).

В то же время, анализ модифицированной архитектуры планировщика А1 выявил следующие факторы, оказывающие негативное влияние на его производительность:

1. Для реализации процессов блокировки и разблокировки ПП с использованием ПС необходима регистрация каждого ППЛ с целью получения уведомления о переводе ПС в состояние «установлен».

2. Разблокировка каждого ПП, получившего уведомление от ПС, требует поиска, осуществляемого ППЛ в очереди ОЗПП.

3. Обеспечение корректного доступа к единой очереди `UMSCL` и возможность одновременного доступа нескольких ППЛ к одному ПП сериализуют процессы планирования, что, в свою очередь, приводит к замедлению работы многопоточного приложения.

Выявленные в процессе анализа факторы снижения производительности многопоточного приложения обосновывают необходимость дальнейшего совершенствования планировщика.

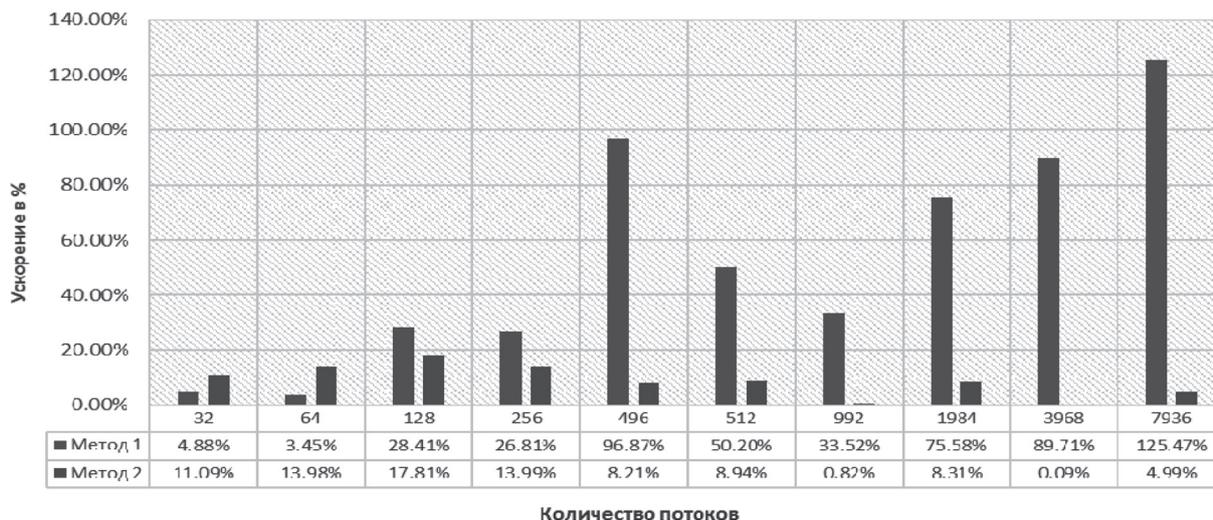


Рис. 3. Ускорение в процентах выполнения обратного хода в алгоритмах Метод1 и Метод2 решения СЛАУ усовершенствованным планировщиком А1 по сравнению с планировщиком А0 в зависимости от количества пользовательских потоков

Усовершенствованная архитектура планировщика

С целью повышения производительности планировщика, архитектура А1 усовершенствована и доработана до архитектуры А2 (рис. 4). Очередь UMSCl, единая для всех ППЛ, использовалась в архитектуре А1 для более быстрой реакции планировщика на добавление UmsThread в очередь UMSCl. Однако при этом возникает проблема корректного доступа к единой очереди UMSCl большого размера, порождающая проблему сериализации работы планировщика при обеспечении доступа к ПП. ППЛ использует механизм сериализации, реализованный посредством атомарных операций CAS. В архитектуре А2 проблема сериализации решается созданием отдельной очереди UMSCl для каждого ППЛ, обслуживающего отдельный логический процессор, и в перемещении очереди заблокированных потоков ОЗПП из потока планирования ППЛ в примитив синхронизации ПС. Такая модификация архитектуры исключает полный обход всей очереди ОЗПП при получении уведомления от ПС и упрощает задачу поиска ПП для разблокировки. Она значительно сокращает время разблокировки и объем работы, выполняемый ППЛ, и не требует регистрации ППЛ в ПС.

Для ускорения процесса блокировки ПП, в примитив синхронизации ПС введены дополнительные состояния. Среди них два конечных состояния «установлен» и «не установлен», и два переходных состояния «уста-

навливается» и «присоединяется». «Устанавливается» означает переход ПС из состояния «не установлен» в состояние «установлен» и освобождение ПП из ОЗПП данного ПС. «Присоединяется» означает то, что ППЛ осуществляет процесс добавления ПП в ОЗПП данного ПС. Состояния «устанавливается» и «присоединяется» имеют по два подсостояния, описывающих ситуации, когда в процессе установки или присоединения ПП другой ППЛ пытается перевести ПС в состояние «установлен» или «не установлен». Поэтому ППЛ, пытающийся изменить состояние ПС должен повторить запрос по завершении процесса ПП. Такой набор состояний позволяет нескольким ПП одновременно обращаться к одному ПС, и позволяет нескольким ППЛ выполнять процедуру добавления ПП в ОЗПП данного ПС без блокировки и без сериализации доступа к ПС.

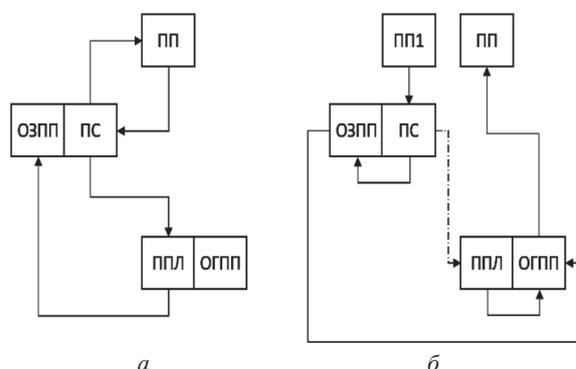


Рис. 4. Схематическое изображение процессов блокировки (а) и разблокировки (б) потока ПП с использованием усовершенствованной архитектуры А2

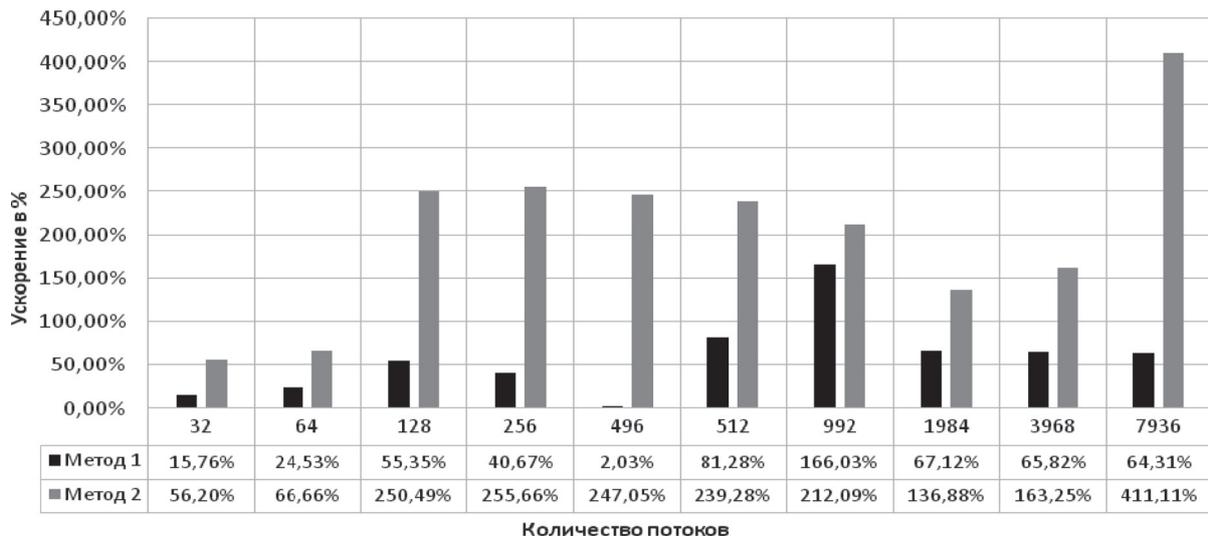


Рис. 5. Ускорение в процентах выполнения обратного хода в алгоритмах Метод1 и Метод2 решения СЛАУ усовершенствованным планировщиком А2 по сравнению с планировщиком А1 в зависимости от количества пользовательских потоков

С целью ускорения процессов блокировки и разблокировки потоков, алгоритмы взаимодействия ПП и ПС полностью пересмотрены (рис. 4). Теперь заблокированные ПП хранятся в отдельной для каждого ПС очереди ОЗПП вне потока планирования ППЛ. Процесс блокировки показан на рис.4а. ПП проверяет текущее состояние ПС. Если ПС находится в состоянии «не установлен», то ПП возвращает управление исполняющему ППЛ с указанием осуществления его блокировки на данном ПС. По цепочке ПП → ПС → ППЛ → ОЗПП, поток планирования ППЛ переводит ПС в состояние «заблокирован» и добавляет его в очередь ОЗПП данного ПС. Процесс разблокировки показан на рис. 4, б. ППЛ переводит ПС в состояние «устанавливается». Если ОЗПП содержит хотя бы один ПП, то, по цепочке ППЛ → ПС → ОЗПП → ОГПП, ППЛ извлекает ПП из очереди ОЗПП, переводит в состояние «готов» и добавляет в ОГПП потока планирования ППЛ, обсуживающего логический процессор, на котором будет исполняться ПП. После этого примитив синхронизации ПС переводится в состояние «не установлен». Если ОЗПП не содержит ни одного потока ПП, то ППЛ переводит ПС в состояние «установлен».

Экспериментальная среда

Эксперименты над планировщиком потоков выполнены на многоядерной системе, оснащенной двумя процессорами Intel®Xeon® CPU E5520 и оперативной памятью 16 GB, ра-

ботающей с частотой 1 GHz. Каждый процессор включает 4 ядра, работающих с частотой 2.26 GHz и оснащенных технологией Hyper-Threading Technology. Каждый физический процессор имеет разделяемую между ядрами кэш память емкостью 8 MB, а каждое ядро имеет локальную кэш память первого уровня емкостью 64KB и второго уровня емкостью 256 KB. Кроме того, каждый из 2-х физических процессоров выполняет доступ к локальной и удаленной памяти по принципу точка-точка с использованием технологии NUMA. Благодаря технологии QPI (Quick Path Interconnect) каждый процессор обладает интегрированным контроллером для работы с памятью. Управление многоядерной системой осуществляется ОС Windows Server 2012 R2 64.

Результаты вычислительных экспериментов

Рис. 3 сравнивает результаты работы модифицированного планировщика А1 с результатами работы базового планировщика А0, полученными при решении СЛАУ блочно-параллельными алгоритмами Метод1 и Метод2 [5–7], реализованными в виде многопоточных приложений. Рис. 5 дает сравнение усовершенствованного планировщика А2 с модифицированным планировщиком А1 на тех же алгоритмах решения СЛАУ. Совместный анализ рис. 3 и 5 позволяет выполнить сравнение А2 с А0. Заметим, что алгоритмы Метод1 и Метод2 различаются разбиением программного кода и эле-

ментов данных по потокам, количество которых варьируется от 32 до 7936.

При решении СЛАУ алгоритмом Метод1 с использованием планировщика А1 полученное ускорение выполнения обратного хода по сравнению с планировщиком А0 составило от 3.45% (64 потока) до 125.47% (7936 потоков). Для 3968 потоков при учете прямого и обратного хода процесса решения СЛАУ время выполнения сократилось с 404.99 сек до 375.83 сек, а ускорение составило 7.76%. Что касается обратного хода, его время сократилось с 27.57 сек до 14.54 сек, а ускорение составило 89.71%. В свою очередь ускорение, полученное планировщиком А2 по сравнению с планировщиком А1, варьировалось от 2.03% (496 потоков) до 166.03% (992 потока). Для 3968 потоков, при учете прямого и обратного хода процесса решения СЛАУ, время выполнения сократилось с 375.83 сек до 367.1 сек, а ускорение составило 2.38%. Чистое же время обратного хода сократилось с 14.54 сек до 8.77 сек, при этом получено ускорение 65.82%. Таким образом, для 3968 потоков общее время выполнения с использованием усовершенствованной архитектуры планировщика А2 по сравнению с базовой архитектурой А0 сократилось с 404.9 сек до 367.1 сек, а ускорение составило 10.33%. Чистое же время обратного хода сократилось с 27.57 сек до 8.77 сек, при этом получено ускорение 214.57%.

При решении СЛАУ алгоритмом Метод2 с использованием модифицированной архитектуры планировщика А1 полученное ускорение выполнения обратного хода по сравнению с базовой архитектурой планировщика А0 составило от 0.09% (3968 потока) до 17,81% (128 потоков). Для 3968 потоков, при учете прямого и обратного хода процесса решения СЛАУ, время выполнения сократилось с 413.14 сек до 380.26 сек, а ускорение составило 8.65%. Чистое же время обратного хода сократилось с 6.0695 сек до 6.0639 сек, при этом получено ускорение 0.09%. В свою очередь ускорение, полученное с использованием совершенство-

ванной архитектуры планировщика А2 по сравнению с модифицированной архитектурой планировщика А1 составило от 56.20% (32 потока) до 411.11% (7936 потоков). Для 3968 потоков, при учете прямого и обратного хода процесса решения СЛАУ, процессорное время сократилось с 380.26 сек до 368.92 сек, а ускорение составило 3.07%. Чистое же время обратного хода сократилось с 6.0639 сек до 2.3035 сек, при этом получено ускорение 163.25%. Таким образом, для 3968 потоков общее время выполнения с использованием усовершенствованной архитектуры планировщика А2 по сравнению с базовой архитектурой А0 сократилось с 413.14 сек до 368.92 сек, а ускорение составило 11.98%. Чистое же время обратного хода сократилось с 6.0695 сек до 2.3035 сек, при этом получено ускорение 163.49%.

Заметим, что прирост производительности получен для всех конфигураций потоков, использованных при проведении экспериментов.

Заключение

Повышение производительности планировщика пользовательских потоков в системе с кооперативной многозадачностью достигнуто усовершенствованием его архитектуры и алгоритма работы. Изменение процессов блокировки и разблокировки потоков с использованием предлагаемого примитива синхронизации, а также ряд других изменений, затронувших основные компоненты планировщика, позволили значительно сократить время выполнения блочно-параллельных алгоритмов решения СЛАУ методом Гаусса и получить ускорение обратного хода до 413% при общем ускорении решения системы от 10.33% до 11.98%. Модернизация планировщика позволила получить не только прирост производительности на экспериментальной многоядерной системе, но также улучшить масштабируемость планировщика в расчете на более мощные многоядерные системы, где количество потоков может возрастать значительно.

Литература

1. **Rajagopalan, M.** Thread Scheduling for Multi-Core Platforms / M. Rajagopalan, B. T. Lewis, and T. A. Anderson, // HOTOS'07 Proc. of the 11th USENIX workshop on Hot topics in operating systems, San Diego, CA, 2007.
2. **Yun, H.** Deterministic Real-time Thread Scheduling / H. Yun, C. Kim, and L. Sha // preprint arXiv: 1104.2110, 2011.
3. **Shelepov, D.** Scheduling on heterogeneous multicore processors using architectural signatures / D. Shelepov, and A. Fedorova // Proc. Workshop on the Interaction between Operating Systems and Computer Architecture, in conjunction with ISCA-35, Beijing, China, 2008.

4. **Fedorova, A.** Cache-fair thread scheduling for multicore processors / A. Fedorova, M. I. Seltzer, and M. D. Smith // Harvard Computer Science Group Technical Report TR-17-06, 2006.
5. **Прихожий, А. А.** Исследование методов реализации многопоточных приложений на многоядерных системах / А. А. Прихожий, О. Н. Карасик // Информатизация образования, 2014, № 1. – С. 43–62.
6. **Прихожий, А. А.** Кооперативная модель оптимизации выполнения потоков на многоядерной системе / А. А. Прихожий, О. Н. Карасик // Системный анализ и прикладная информатика, 2014, № 4. – С. 13–20.
7. **Прыхожы А. А.** Кааператыўныя блочна-паралельныя алгарытмы рашэння задач на шмат’ядравых сістэмах / А. А. Прыхожы, А. М. Карасік // Системный анализ и прикладная информатика, 2015, № 2. – С. 10–18.
8. **Al-Rayes, H. T.** Concurrent Programming in Windows Vista / H. T. Al-Rayes // International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS. Vol. 12. No. 5, pp. 32–37.
9. **Manchanda, Nakul, and Karan Anand.** Non-uniform memory access // New York University, 2010. – 4 p.
10. **Rajput, V.** Performance Analysis of UMA and NUMA Models / V. Rajput, S. Kumar and V. K. Patle. // IJCSIT. Vol. 2, Issue 10, pp. 1457–1458.

References

1. **Rajagopalan, M.** Thread Scheduling for Multi-Core Platforms / M. Rajagopalan, B. T. Lewis, and T. A. Anderson, // HOTOS’07 Proc. of the 11th USENIX workshop on Hot topics in operating systems, San Diego, CA, 2007.
2. **Yun, H.** Deterministic Real-time Thread Scheduling / H. Yun, C. Kim, and L. Sha // preprint arXiv: 1104.2110, 2011.
3. **Shelepov, D.** Scheduling on heterogeneous multicore processors using architectural signatures / D. Shelepov, and A. Fedorova // Proc. Workshop on the Interaction between Operating Systems and Computer Architecture, in conjunction with ISCA-35, Beijing, China, 2008.
4. **Fedorova, A.** Cache-fair thread scheduling for multicore processors / A. Fedorova, M. I. Seltzer, and M. D. Smith // Harvard Computer Science Group Technical Report TR-17-06, 2006.
5. **Prihozhy, A. A.** Investigation of implementation methods of multi-thread applications on multi-core systems / A. A. Prihozhy, O. N. Karasik // Informatization of Education, 2014, № 1. – С. 43–62.
6. **Prihozhy, A. A.** Cooperative model of optimal thread execution on multi-core system / A. A. Prihozhy, O. N. Karasik // System analysis and applied computer science, 2014, № 4. – С. 13–20.
7. **Prihozhy, A. A.** Cooperative block-parallel algorithms for solving tasks on multi-core systems / A. A. Prihozhy, O. N. Karasik // System analysis and applied computer science, 2015, № 2. – С. 10–18.
8. **Al-Rayes, H. T.** Concurrent Programming in Windows Vista / H.T. Al-Rayes // International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS Vol.12 No.5, pp. 32–37.
9. **Manchanda, Nakul, and Karan Anand.** Non-uniform memory access // New York University, 2010. – 4 p.
10. **Rajput, V.** Performance Analysis of UMA and NUMA Models / V. Rajput, S. Kumar and V. K. Patle. // IJCSIT Vol. 2, Issue 10, pp. 1457–1458.

Поступила
26.12.2016

После доработки
25.02.2017

Принята к печати
06.03.2017

Karasik O., Prihozhy A.

ADVANCED SCHEDULER FOR COOPERATIVE EXECUTION OF THREADS ON MULTI-CORE SYSTEM

Belarusian National Technical University

Three architectures of the cooperative thread scheduler in a multithreaded application that is executed on a multi-core system are considered. Architecture A0 is based on the synchronization and scheduling facilities, which are provided by the operating system. Architecture A1 introduces a new synchronization primitive and a single queue of the blocked threads in the scheduler, which reduces the interaction activity between the threads and operating system, and significantly speed up the processes of blocking and unblocking the threads. Architecture A2 replaces the single queue of blocked threads with dedicated queues, one for each of the synchronizing primitives, extends the number of internal states of the primitive, reduces the interdependence of the scheduling threads, and further significantly speeds up the processes of blocking and unblocking the threads. All scheduler architectures are implemented on Windows operating systems and based on the User Mode Scheduling. Important experimental results are obtained for multithreaded applications that implement two blocked parallel algorithms of solving the linear algebraic equation systems by the Gaussian elimination. The algorithms differ in the way of the data distribution among threads and by the thread synchronization models. The number of threads varied from 32 to 7936. Architecture A1 shows the acceleration of up to 8.65% and the architecture A2 shows the acceleration of up to 11.98% compared to A0 architecture for the blocked parallel algorithms computing the triangular form and performing the back substitution. On the back substitution stage of the algorithms, architecture A1 gives the acceleration of up to 125%, and architecture A2 gives the acceleration of up to 413% compared to architecture A0. The experiments clearly show that the proposed architectures, A1 and A2 outperform A0 depending on the number of thread blocking and unblocking operations, which happen during the execution of multi-threaded applications. The conducted computational experiments demonstrate the improvement of parameters of multithreaded applications on a heterogeneous multi-core system due the proposed advanced versions of the thread scheduler.

Keywords: Multi-threaded application, scheduler, cooperative model, multi-core system.



Карасик Олег Николаевич – аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» БНТУ, ведущий инженер программист компании «EPAM Systems», научные интересы в области параллельных многопоточных приложений и распараллеливания для многоядерных и многопроцессорных систем.

Karasik Aleh is a postgraduate of the Computer and system software department of Belarusian national technical university, and a leading software engineer at EPAM Systems. His research interests include parallel multithreaded applications and the parallelization for multicore and multiprocessor systems.



Прихожий Анатолий Алексеевич – профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем БНТУ, доктор технических наук (1999), профессор (2001). Научные интересы в области языков программирования и описания цифровой аппаратуры, распараллеливающих компиляторов, инструментальных средств проектирования программных и аппаратных систем на логическом, поведенческом и системном уровнях. Имеет более 300 научных публикаций в Восточной и Западной Европе, США и Канаде.

Anatoly Prihozhy is a full professor at the Computer and system software department of Belarusian national technical university, doctor of science (1999) and professor (2001). His research interests include programming and hardware description languages, parallelizing compilers, and computer aided design tools for software and hardware at logic, high and system levels. He has over 300 publications in Eastern and Western Europe, USA and Canada.

УДК 519.6, 573.7

А. Ю. ПЕРЕВАРЮХА

О МЕТОДИКЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОНТОГЕНЕТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ РЫБ И НАСЕКОМЫХ

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН)

В статье рассматривается подход к моделированию метаморфозов в развитии ряда биологических видов в контексте влияния их успешности на долговременные тренды популяционной динамики. Изменения выживаемости в раннем онтогенезе, контролируемые фактором темпов индивидуального развития в конкурирующей группе особей, могут стать причиной неожиданной деградации популяции при малом избыточном промысловом воздействии. Теория нелинейной эффективности воспроизводства выводит к гипотезе, что два различных нелинейных эффекта контролируются на самом деле схожими механизмами. Для насекомых аналогичные колебания выживаемости при метаморфозах могут запускать другой процесс – стремительной вспышки численности вредителей, где актуальна формализация воздействия паразитов на первой стадии развития, зависящая от начальной концентрации кладок, но ограниченность ресурсов учитывается на завершающей. Рассмотрен метод представления убыли поколений на основе систем динамически переопределяемых дифференциальных уравнений с дискретно-непрерывной структурой времени. В расширении ранее предложенной модели формирования поколений сформирована вычислительная структура для учета зависимости смертности от уровня конкуренции, дополненная триггерным функционалом и новой схемой описания изменений скорости роста для примера осетровых рыб Каспийского моря на трех эколого-физиологических этапах развития. Модель обладает нетривиальными возможностями в параметрическом изменении режимов поведения. Существование альтернативных циклов находит объяснение в адаптивном возрастании внутривидовых различий.

Ключевые слова: модели популяций, репродуктивный цикл, теория эффективности воспроизводства, предикативно переопределяемые структуры, этапы раннего онтогенеза, вспышки и деградации популяций.

Введение

В математической экологии осталось не так много непреступных замков, к которым трудно подобрать правильные ключи по объективным причинам противоречий. К перечню проблем относится ряд вопросов, связанных с ранними стадиями онтогенеза, как зависимость выживаемости от темпов развития при сопутствующей сложной взаимосвязи скорости роста с плотностью группы. Из имеющихся биологических разнородных данных задача построения обобщенной модели ступенчатого онтогенеза, по-видимому, не имеет кардинального решения. Использование некоторой единственной трофической функции накопления биомассы не может быть обосновано в ситуациях развития экстремальной популяционной динамики. Ранее на проблему связи нелинейной динамики популяций и особенностей этапов раннего разви-

тия обращалось мало внимания. Ихтиологов интересует состояние промыслового запаса, у энтомологов основной учет проводится по вредящей стадии. Происходящие процессы на самых ранних стадиях развития сообществ рыб и насекомых трудно наблюдаемы, как практически не заметно вращение Луны вокруг своей оси, и только трудно заметный эффект либрации выдает существование обратной стороны спутника. Так по косвенным данным в моменты экстремальных состояний – пиковых вспышек насекомых или коллапсов промысловых запасов мы сможем судить о важности типов регуляции выживаемости на ранних этапах развития. Тем ценнее оказываются анализируемые имеющиеся сведения по учету численности всех стадий кукурузного мотылька, проводимых группой А.Н. Фролова [1], где показано смертность за поколение в первой генерации мотылька не зависела от исходной плотности

яиц, тогда как во второй генерации такая связь установлена. Мониторинг воспроизводства двух видов осетровых рыб на Нижней Волге авторами работы [2] позволил, в частности, неожиданно выяснить, что действующие зависимости в формировании поколений для двух близких видов осетровых рыб могут оказаться вдруг достоверно различными.

В цикле работ мы последовательно совершенствуем возможности применения сценарного подхода к анализу вычислительных моделей динамики видов, для которых обязательны быстрые и выраженные метаморфозы в онтогенезе. Прежде всего, предлагаемый подход предназначен для критических режимов в динамике интересующих нас популяций. Общей задачей исследований Проекта является анализ вычислительных модельных сценариев смены фаз и факторов при исчерпании биоресурсов или ускоренном размножении.

Структура гибридной системы для экологических задач

В предыдущей работе [3] мы развивали базовую модель формирования пополнения в форме системы уравнений взаимосвязанной убыли численности. Основная идея формализации процесса формирования пополнения заключается в описании убыли начальной численности поколения $N(0)$ от момента вылупления из икринок дифференциальным уравнением с переопределяемой структурой на кадрированном промежутке времени $[0, T]$. Так мы можем в явном виде учитывать разные факторы смертности и её изменение по мере развития особей:

$$\frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha w(t)N(t) + U[x]\beta)N(t), & t < \tau \\ -(\alpha_1 N(\tau)/w(\tau) + \beta)N(t), & t > \tau, w(t) < w_{D2} \\ -\alpha_2 w(t)N^2(t), & w(t) < w_{D3}, \end{cases} \quad (1)$$

где α – коэффициент зависящей от плотности компенсационной смертности; β – коэффициент нейтральной убыли. От абстрактного «репродуктивного потенциала» разумно перейти к естественному показателю средней плодовитости λ , оцениваемой по данным мониторинга. Начальные условия для уравнений: $N(0) = \lambda S$. Время τ – длительность первой стадии с эндогенным питанием, для осетровых в среднем составляет 8–10 сут. w_D – условный уровень развития, при достижении которого меняется

действие факторов смертности, что интерпретируется экологией обитания молоди при уже самостоятельной миграции рыб. Для случая насекомых фитофагов вместо величины $w(\tau)$ в знаменателе второй формы мы предполагаем существенную роль запаздывания на третьей преимагинальной стадии развития $N(t - \zeta)$, связанной с истощением ресурсов, являющихся так же и их средой обитания.

Модель рассчитана на применение инструментальной среды моделирования, обладающей библиотекой численных методов с изменяющимся шагом интегрирования для систем дифференциальных уравнений первого порядка, записанных в форме Коши. *AnyLogic5* или *Rand Model Designer* позволяют рассматривать событийность в изначально непрерывных вычислительных моделях при организации специальных карт поведений, что может использоваться нами для дальнейшего совершенствования модели.

Метод ограниченного функционального дополнения

$U[x]$ – в модели (1) триггерный функционал с ограниченной областью значений. Смысл предложенного нами метода функционалов выразить влияния экстремальных условий для успеха размножения. Для ситуации вспышки численности такой подход оказался даже более актуален, чем в сценарии деградации сложно структурированной популяции севрюги. Триггерный функционал совсем не обязательно может включаться в уравнение первой стадии развития, где он учитывает количество неоплодотворенной икры и ухудшения условий из-за размножения вредных микроорганизмов после гибели нерестовых кладок. Таким способом можно описать, например, необходимость образования критической численности личинок вредителя, необходимой для преодоления химической защиты растения, как в случае безуспешной инвазии опасного короеда *Ips typographus* хвойные леса Северной Америки. В ситуации нарастания скорости размножения действием функционала можно описать резкое сокращение ресурсов для выходящих из личинок имаго вредителей. Исходная форма однопараметрического функционала $U[S] = (1 - \exp(-cS))^{-1}$ не единственно возможная. В некоторых случаях мы можем предположить немонотонную зави-

симось. Точнее, действующая зависимость может изменяться с течением времени, если она описывает действие экологического эффекта Олли на группу особей. Механизмы эволюционной адаптации, выраженные в репродуктивной изоляции отдельных групп, позволят преодолеть негативное действие эффекта на уровне локальной субпопуляции, и далее восстановить исходный ареал вида.

В перспективе дальнейшей модификации мы изначально предполагали более сложную изменимость динамики используемого показателя размерного развития $w(t)$. Данный показатель исходно рассматривался нами как вспомогательный и предназначенный для формирования предикатов при вычислении моментов смены режима поведения в гибридной системе. Все «настоящие» модели роста организмов исходят из формализации баланса анаболизма и катаболизма, но для математического рассмотрения распада и накопления биомассы предполагается наличие полностью сформированных жизненно важных систем организма. В момент истинности предиката происходит переопределение начальных условий для расчета убыли поколения на следующем кадре непрерывного модельного времени. Найден путь более обоснованного использования в первом уравнении $\alpha \Xi N^2(t)$ с показателем отклонения в развитии ($\Xi > 0$) от некоторого оптимального \bar{w} , которое и должно оказывать влияние:

$$\Xi = \sqrt{(w(t) - \bar{w})^2}$$

В результате мы получаем структуру, где дискретная составляющая траектории «гибридной» непрерывно-дискретной модели исследуется в вычислительной среде как итерация отображения с незнакомостоянным дифференциальным инвариантом Шварца. Для описанного нами ранее поведения траектории в виде переходной хаотизации и изменения границ областей притяжения нам удалось подобрать экологическую интерпретацию. Однако, важно понимать, что такое возможно не для всех получаемых режимов итерационной динамики.

Вариативность динамики популяционных моделей

В изолированном случае без внешнего управления динамическая система изменения

состояния популяции представляется тройкой $\langle M, T, \psi \rangle$, состоящей из фазового пространства M , переменной выполняющей роль времени T , оператора эволюции ψ . Для $\forall x \in M$ и $\forall t, s \in T$ выполняется условие: $\psi(\psi(x, t), s) = \psi(x, s + t)$. Множество $\{\psi^{(t)}(x)\}_{t \in T}$ фазовая траектория точки x . Значения переменных в последующий момент рассчитываются из текущих значений по закону, называемому оператором эволюции. В нашем случае оператором будет обсуждаемая зависимость исходного запаса и полученного от него нового поколения и нас интересуют разновидности асимптотики фазовой траектории. Биологическая часть теории и применения метода изложена в [4] и анализировалась нами в [3].

Эволюция диссипативной динамической системы во времени представляется движением точек в фазовом пространстве к аттрактору, подмножеству фазового пространства $A \subseteq M$ инвариантному относительно эволюции: $\psi^{(t)}(A) = A$ для всех $t \in T$ и такое, что существует окрестность U множества A , в которой для всех $y \in U$ выполняется $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi^{(t)}(y) = A$. Для дискретных динамических систем классифицируют три топологические разновидности аттракторов [5]. Регулярным аттрактором для отображения интервала $\psi: \mathbf{I} \rightarrow \mathbf{I}$ считается состояние равновесия с неподвижной точкой x^* : $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi^{(t)}(y) = x^*$ и устойчивый цикл, соответствующий режиму периодических автоколебаний.

Для предложенной в [4] популяционной модели итераций $x_{n+1} = ax_n e^{-bx_n}$ помимо хорошо известного каскада удвоений [6] наблюдаем серию касательных бифуркаций с появлением устойчивых циклов периодов $p \neq 2^i$ при последовательном увеличении начиная с $a_1 = e^2$. Ли и Йорк в 1975 г. показали, если одномерное отображение $R_{j+1} = \psi(R_j)$ при значении параметра $a = \bar{a}$ имеет цикл периода $p = 3$, то оно при \bar{a} имеет и бесконечное множество циклов всех других периодов. Ранее в 1964 г. А. Н. Шарковский [7] доказал, что если одномерное отображение $\psi: \mathbf{I} \rightarrow \mathbf{I}$ имеет цикл $p = n$, то оно также имеет циклы со всевозможными периодами \tilde{n}_i , предшествующими числу n , среди целых чисел, выписанных в специальном порядке, который завершает число три [7], единственно в теореме Шарковского ничего не говорится об устойчивости данных циклов.

Появлению окон предшествует явление «перемежаемости». Перемежаемостью считается

режим чередования во времени почти регулярных колебаний (ламинарная фаза) с интервалами хаотического поведения (турбулентная фаза). Перед появлением циклических точек график третьей итерации функции $f^3(S) \equiv f(f(f(S)))$ образует каналы, по которым в строгой последовательности траектория движется довольно долго. Выход точки траектории из канала определяет короткую турбулентную фазу. Выявление такого поведения при настройке параметров может служить индикатором близости бифуркационных значений.

Появление хаоса интерпретировалось в биологическом контексте как последствие повышения репродуктивного потенциала популяции. В $x_{n+1} = ax_n e^{-bx_n}$ этому термину соответствует параметр a , но для динамики подобных уни-модальных отображений при $[a_1, \bar{a}]$ мы увидим набор резких изменений поведения, для которых нам трудно найти рациональное толкование. При использовании более сложных нелинейных дискретных моделей с внешним воздействием практические выводы будут определяться свойствами критерия устойчивости аттрактора уже как функции нескольких переменных. Рассматривая различные воздействия на популяцию, подчиняющуюся $x_{n+1} = ax_n e^{-bx_n} \pm kx_n$, мы получим, например, что искусственное воспроизводство хаотизирует динамику, а промысловое изъятие наоборот уменьшает амплитуду колебаний. Однако, выводы будут тождественны для целого семейства итераций функций, удовлетворяющих критериям теоремы Д. Сингера, называемых SU -отображения. Используемый нами ранее в [3] эффект граничного кризиса аттрактора выходит за эти рамки.

Аспекты проявления скрытых механизмов регуляции

Анализ свойств $\{\psi^{(t)}(x)\}_{t \in T}$ обоснован для анадромных видов, заходящих для нереста на речном грунте. Популяция осетра испытала не просто промысловое истощение на рубеже 1980-х гг., что случалось со многими видами, но стремительное сокращение по сценарию, определенному нами как «немонотонный коллапс» из псевдостабильного состояния (рис. 1).

При таком сценарии специалисты не могут предвидеть скорый кризис. Непосредственно перед фазой коллапса предполагалось увеличение уловов из-за благоприятности гидрологического тренда. Можно констатировать безвозвратную деградацию волжского осетра и особенно более уязвимой севрюги, так как остановить нелегальную добычу не удастся, несмотря на включение всех каспийских видов в «Красную книгу» в 2010 г. [8]. Нелегальная добыча снижается, но как показывают наши модели, критическим может стать и самое незначительное превышение допустимой доли изъятия. Искусственное воспроизводство оказалось не столь эффективно, как планировалось в оптимистичных рыбохозяйственных прогнозах с заявленным коэффициентом промыслового возврата 3%.

Изучение ретроспективных данных о популяциях анадромных рыб Каспия позволило выявить нелинейные особенности в формировании пополнения, которые оказались различными у двух видов. Ранее основным фактором считались параметры гидрологического режима. Количество пропущенных на нерест в Волгу производителей за период наблюдений изменялась существенно: от 2500 тыс. экз. в 1979–

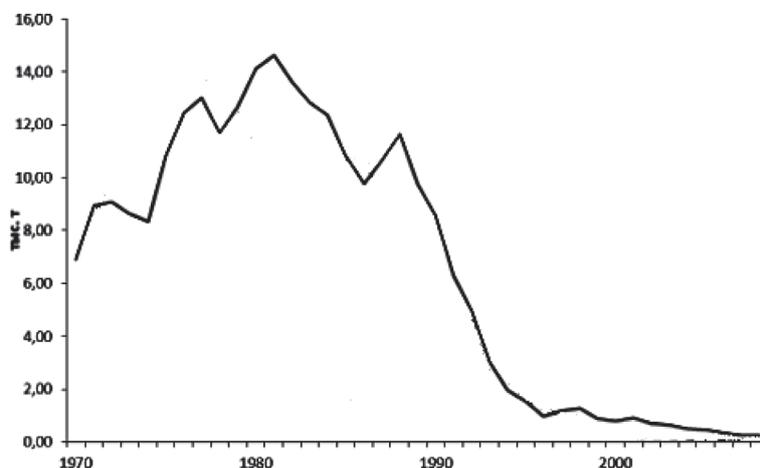


Рис. 1. Стремительное сокращение запасов осетра после пиков вылова (тыс. т)

1981 г. до 25 тыс. в 2000-х гг. [9]. В настоящее время мы не имеем достоверной информации о состоянии нерестовой части популяций, отдельные поимки рыб носят случайный характер. Имеются сведения с 1968 г. об общей численности осетровых Каспийского моря по данным тралового учета [10]. Некоторые специалисты сомневаются в правомерности применяемых методик подсчета, где данные по поимке рыб в небольших участках моря экстраполируются на всю акваторию. Другая проблема в недостаточной сегментации данных учета, не опубликованы данные дифференцированного вылова озимых и яровых репродуктивных рас осетровых рыб. Данные о русском и персидском осетре не разделялись, притом, что у видов различен температурный оптимум нереста [11].

Главное, что позволило понять сравнение различных сведений – наблюдается статистически достоверный пороговый эффект скачкообразного перехода эффективности воспроизводства на некий отличный от нуля минимальный показатель и не отмеченный специалистами при составлении промысловых прогнозов. Для волжской севрюги, размножающейся в тех же условиях, только в более поздние сроки, отмечен и максимум, и локальный минимум в эффективности воспроизводства. Такое состояние более чувствительно к условиям среды.

Существуют примеры неожиданного для ихтиологов восстановления запасов даже долго созревающих рыб. Восстановила промысловое значение в 1990 г. истощенная в 1960 г. популяцией сига в озере Онтарио (рис. 2, уловы и расчетная квота из [12]).

Задолго до деградации ежегодные уловы сига *Coregonus clupeaformis* прошли очевидный

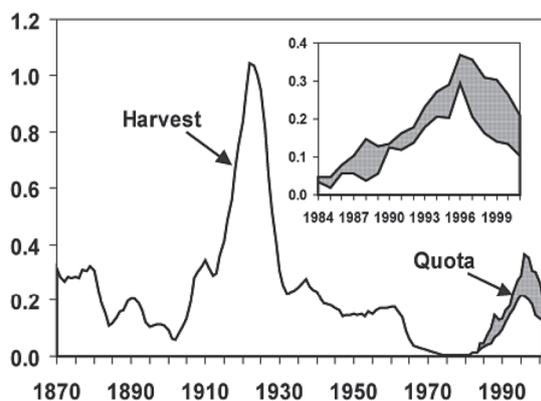


Рис. 2. Крах и восстановление промысла сига в оз. Онтарио (тыс. т.) по [12]

пик перелова и выглядели стабильно. После падения вылова в Канаде ожидали скорого восстановления за счет резерва не вступивших в промысел поколений, но период депрессии затянулся на четверть века. Запасы сига в оз. Онтарио восстановились после, казалось, полной потери промыслового значения, так как сохранилось локальные группы, для которых эффективность воспроизводства сохраняется даже при небольшой численности. В Ладожском озере сиг *Coregonus lavaretus* аналогично присутствует в ряде известных рыбакам локальных форм (лудога, онежка, валаамка и др.). Способствующий выживаемости механизм адаптации малочисленного вида как стратегия локального убежища «рефугиум» модельно описать только обсуждаемым методом в виде специальной усложненной предикативной структуры.

Базовая модель выживаемости с динамикой развития

Вернемся к базовой модели репродуктивного потенциала, с сохранением непрерывного характера функциональной зависимости, которую можно модифицировать методом гибридных динамических систем. Учтем снижение эффективности нереста из-за уменьшения количества икры, реально вступившей в репродуктивный процесс, при $S \ll R^*$. Прямой учет такой зависимости становится необходимым при моделировании динамики популяций подвергающихся интенсивному промыслу. На сегодняшний день нет оснований полагать, что севрюга смогла преодолеть такое снижение, как это произошло с сигом в Онтарио.

Примем, что скорость роста находится в обратной зависимости от численности поколения, но не в обратно пропорциональной, а дробно-степенной и действует до перехода на активное питание из-за увеличения пищевых потребностей малоподвижной молодежи. Убыль численности поколения $N(t)$ на интервале модельного времени $[0, T]$ опишут объединённые в систему два дифференциальных уравнения (α, β, c – константы):

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -(\alpha w(t)N(t) + \Theta(S)\beta)N(t) \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g}{\sqrt{N^k(t) + \zeta}} \end{cases} \quad (2)$$

где: S – величина нерестового запаса; $w(t)$ – отражает уровень размерного развития поколения, влияющий на увеличение пищевых потребностей; g – параметр, учитывающий ограниченность количества доступных для молоди кормовых объектов; ζ – параметр ограничивающий темп развития вне зависимости от $N(t)$; λ – средняя плодовитость особей, определяющая начальные условия для вычисления задачи Коши $w(0) = w_0$, $N(0) = \lambda S$; α – коэффициент квадратично зависимой (компенсационной) смертности; β – коэффициент декомпенсационной смертности; $k \in [1, 2]$; интервал уязвимости $t \in [0, T]$ специфичен для видов рыб, в некоторых экстремальных случаях зависит от уровня половодья. При незначительном количестве повторно нерестующих рыб численно из (2) вычисляем $S = N(T)$. Учет повторного нереста приведет к формированию вектор-столбца \bar{S} нерестующих поколений и расчету начальных условий: $N(0) = \lambda_1 S_1 + \dots + \lambda_i S_i$.

Выберем другой триггерный функционал: $\Theta(S) = 1 + \exp(-cS^2)$, $\lim_{S \rightarrow \infty} \Theta(S) \rightarrow 1$ быстро убывающая функция отражает действие известного эффекта агрегированной группы [13]. Не вступившие в репродуктивный процесс кладки икры после гибели ухудшает токсикологическую обстановку на нерестилище. c характеризует степень действия эффекта, который триггерно выключается, если численность нерестующих особей осетровых исторически оптимальна. Когда численность нерестового стада низка, то большая протяженность русловых нерестилищ и растянутость сроков миграции становится уже негативным фактором.

Графиком исследованной с применением численного решения в инструментальной сре-

де последовательности задач Коши (2) для вычисления численности выживших особей поколения к моменту времени T новой модели является унимодальная кривая с уменьшающимся наклоном ниспадающей правой ветви. Кривая (на рис. 3 кривая относительно биссектрисы координатного угла) имеет ненулевую горизонтальную асимптоту, две нетривиальные точки пересечения с биссектрисой координатного угла $R = S$ и двумя точками перегиба.

От дифференциальных уравнений на интервале $t \in [0, T]$ вернемся к дискретной задаче. Будем исследовать дискретно-непрерывную гибридную систему, где нас интересует дискретная составляющая траектории, дающая положение нового нерестующего поколения. Качественная динамика модели зависит от математических свойств выбранной функции эффективности воспроизводства, особенно вне диапазона оптимальной численности нерестового стада. Важны как относительные положения минимума и максимума зависимости, и даже количество точек перегиба. Фазовое пространство динамической системы $\psi^n(R_0)$ с оператором эволюции в виде системы (2) разделено на две области притяжения: Ω_1 и Ω_2 . Границей между областями является неустойчивая стационарная точка R_1^* первого пересечения кривой с биссектрисой $R = S$. Анализ устойчивости неподвижных точек дискретно-непрерывной системы в инструментальной среде можно проводить с использованием свойства второй итерации $\psi(\psi(x))$. Необходимым и достаточным условием устойчивости неподвижной точки одномерного отображения x^* является неравенство: $\psi^2(x) > x$ при $x < x^*$, $\psi^2(x) < x$ при $x > x^*$.

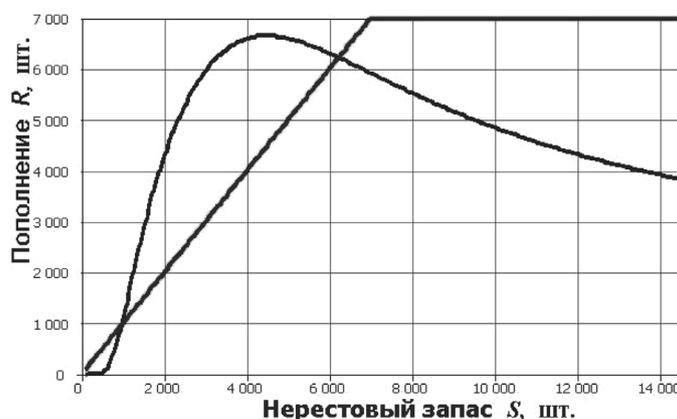


Рис. 3. Модельная зависимость $R = f(S) = N(T)$

Второе равновесие R_2^* устойчиво (обходится без бифуркаций удвоения периода).

Структура изменений скорости роста в онтогенезе

Многokратное увеличение кормовой базы не приводит к пропорциональному скачку скорости роста рыб, так как организмы потребляют не более необходимого суточного рациона. Потому очевидный на первый взгляд вариант совершенствования модели с отдельным описанием динамики кормовых организмов $g(t)$, например известным уравнением Ферхюльста:

$$\frac{dg}{dt} = rg \left(1 - \frac{g}{K} \right) - \gamma Nw,$$

где γ отразит эффект хищничества, не принесет желаемого результата. Помимо того, что имеется предел насыщения, рыба способна в поиске пищи облавливать ограниченную площадь, потому оказываются безрезультатными попытки разрядки взрослого стада для увеличения рыбопродуктивности водоема.

Развитие методов моделирования процессов, связанных с особенностями раннего онтогенеза, сталкивается с проблемой происходящих изменений в динамике развития, которые не ограничиваются только увеличением массы и линейных размеров. Большинство организмов проходят в своей жизни до вступления в репродуктивный процесс последовательность различных по физиологическому строению и пищевому поведению этапов. Появляющиеся на свет уже полностью сформированными млекопитающие являются продуктом совсем недавнего эволюционного развития. У вылупляющихся из яиц личинок рыб или насекомых происходит ряд метаморфозов с появлением органов дыхания, пищеварения и передвижения. Переходов между стадиями у личинок и молоди осетровых рыб, происходящими быстро, физиологи выделяют гораздо больше [14], чем у насекомых, но для задач разработки вычислительных моделей нужно выделить не более трех эколого-физиологических этапов развития.

Современные средства компьютерного моделирования позволяют исследовать событийно-управляемые динамические системы, где течение заданного системой уравнений неизменного процесса прерывается в моменты со-

бытий, и происходят определенные перестроения в уравнениях. Промежутки относительной стабильности в развитии рыб между двумя скачкообразными изменениями можно обособлять отрезками непрерывного времени. На концах отрезков в специально отделенных выделенных временных лакунах допустимо проводить предикативное переопределение вычислительной структуры. Возникает необходимость введения в модель условий реализации событий и иерархии модельного гибридного времени, заключенного в пронумерованную последовательность кадров для переопределения начальных условий и вычисления задачи Коши на следующем непрерывном кадре.

Помимо дифференцированного описания смертности изменяющимися уравнениями в (1) биологически обоснованным представляется другая, нетривиальная реализация идеи этапности. В базовую модель включен фактор скорости роста, которая при рассмотрении этапов развития не может полагаться неизменной. Если смертность полагаем зависимой от прироста, следовательно, формализовать логично влияние резких перемен в темпах приращения биомассы, происходящих при успешном достижении организмом следующего этапа.

Известно несколько различных моделей роста организмов, они дают представление о регуляции предельных размеров особи вида и подходят к накоплению биомассы как непрерывному явлению, не учитывая переходные процессы при формировании систем жизнедеятельности на ранних этапах развития. У осетровых и лососевых рыб относительно продолжительное время по сравнению с другими видами занимает смешанное питание. На самой первой стадии икринки питание происходит эндогенно за счет запаса питательных веществ [15] и скорость роста не может считаться положительной, но это небольшой промежуток времени мы включим в этап, завершающийся резорбцией желточного мешка и переходом на активное питание. Скорость роста линейная с незначительным коэффициентом наклона к оси абсцисс сохраняется до тех пока, личинкам не станут доступны подвижные кормовые объекты. Условием для перехода пусть служит накопление достаточного показателя \bar{w} .

На втором этапе скорость роста уже зависит от плотности конкурирующих за пищевые

ресурсы и еще недостаточно подвижных личинок. Характер зависимости прироста от плотности малоисследованный вопрос, и имеющиеся результаты экспериментов в искусственных условиях несколько противоречивы из-за разных условий содержания и кормления молоди. Сюда входит вопрос не только питания, но достаточного обеспечения всех биохимических процессов кислородом [16]. Наиболее правдоподобно, что зависимость обратная дробно степенная пропорциональна $\sim N^{-z}$, и показатель $z < 1$ дробь от 1/3 до 2/3. После начала миграции в потоке воды к эстуарию Каспийского моря зависимость от плотности должна снижаться, а в прудовых условиях даже фиксировалось повышение упитанности при более плотном зарыблении уже подросшей молодью. Второе уравнение в системе (2) переопределим в виде структуры с дважды изменяющейся правой частью. Каждому виду правой части сопоставлено условие завершения активности для данной фазы скорости весового прироста:

$$\frac{dw(t)}{dt} = \begin{cases} \rho, & t < \tau \\ \zeta \frac{w(t)}{\sqrt{N}}, & t > \tau, w(t) < w_1 \\ \eta \sqrt[3]{w(t)^2} - \vartheta w(t), & w(t) > w_1, t < T \end{cases} \quad (3)$$

где τ – длительность периода развития до полного израсходования питательных запасов желточного мешка, определяемая биологическими особенностями вида с линейным коэффициентом прироста $\rho < 1$, который в среднем для поколения должен быть положительным; w_1 – интерпретируется как уровень развития, при достижении которого изменяется характер

метаболизма из-за смены характера питания. На втором этапе может наблюдаться депрессия роста при повышенной плотности. При переходе модели к описанию третьего этапа предполагается, что скорость роста свободно мигрирующей молоди не определяется более численностью поколения. Третий вид правой части представляет собой балансовое уравнение разности между синтезируемой биомассой с параметром анаболизма η и убылью вещества при метаболическом распаде, которое было предложено в работе [17] Л. фон Берталанфи. Успешный рост в дальнейшем делает недоступным молодь для большего числа мелких окуневых хищников. Половозрелые осетровые не имеют естественных врагов, что позволяет убрать из уравнений убыли численности взрослых зависимый от плотности фактор смертности.

Интересные свойства новой модели

Модель (3) показала наибольшую параметрическую вариабельность динамических режимов поведения, по сравнению с итерациями SU -отображения $x_{n+1} = ax_n e^{-bx_n}$ и даже нашей модели кризиса аттрактора в [3]. Вычислительное исследование дискретной составляющей новой «непрерывно-событийной» динамической системы показало разнообразие качественной динамики, управляемое более чем одним бифуркационным параметром с появлением всех типов бифуркаций возможных для функциональных итераций. С применением переопределяемого уравнения темпа развития, калибруя соотношения модельных параметров, можно получить сложные формы зависимости, имеющие более одного экстремума (на рис. 4 вариант соответствующий зависимости

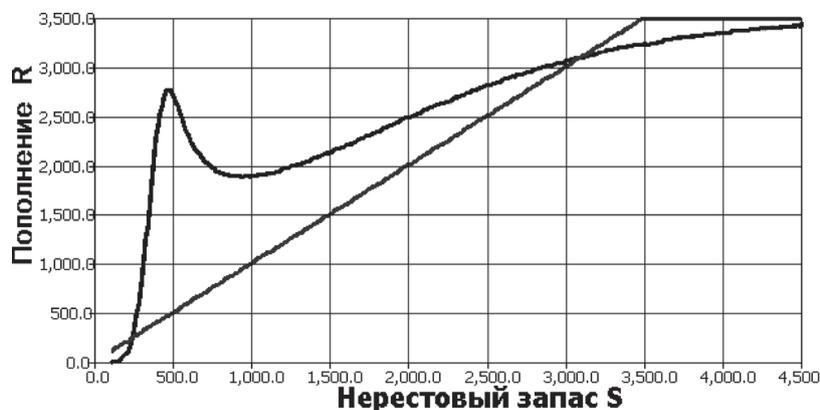


Рис. 4. Вариант новой модельной зависимости для северюги

в эффективности воспроизводства для волжской севрюги). Положение экстремумов относительно стационарных точек важная характеристика для динамики, так как влияет на характер границ областей притяжения аттракторов. Для найденных сценариев перехода к аperiodической динамике и обратно к регулярной еще не разработано обобщенного строго математического описания, подобного теории ренормализации в объяснении свойств универсальности перехода к хаосу через каскад М. Фейгенбаума, отдельные частные результаты получены экспериментальными компьютерными методами.

В динамической системе, как оказалось, сменяются бифуркации при плавном изменении одного параметра с прямых на обратные. Сперва при увеличении параметра происходит каскад удвоений периода $p = 2^{i+1}, i \rightarrow \infty$, сменяющийся обратным процессом — последовательного кратного двум уменьшения периода цикла $p = 2^{i-1}$, т.е. прямая и обратная бифуркация бывают при увеличении одного и того же бифуркационного параметра. Подобные «paired cascade» обнаруживались ранее в двумерных отображениях типа «аттрактор Эно» и пока не ясно, может ли получить данный сценарий поведения биологическое объяснение.

В числе других нелинейных эффектов можно наблюдать появление в диапазоне значений параметра одновременно существующих в Ω_2 двух устойчивых циклов периода $p = 2$.

На рис. 5 показано появление четырех новых стационарных точек у второй итерации модельной зависимости $\psi(\psi(S))$, которые образуют два цикла периода $p = 2$ у итераций $x_{n+1} = \psi(x_n)$, что невозможно для функций

удовлетворяющих критериям теоремы Сингера. Появление альтернативных циклов может иметь популяционную интерпретацию для случая сложно структурированной популяции, когда одна из составляющих, частично изолированная группа начинает изменять свою численность по циклу с меньшей амплитудой.

Заключение

Предложена методика, где трактовка эффективности воспроизводства в модели не задается параметром репродуктивного потенциала, но определяется через убыль численности поколения на ранних этапах развития. Скорость убыли изменяется по мере успешности развития поколения. Базовая модель отражает наличие критической минимально допустимой численности для благополучного существования вида. Присутствует репеллер, неустойчивая особая точка первого пересечения кривой с биссектрисой координатного угла. Траектории с начальными условиями, разделёнными репеллером, покидают его окрестность и приближаются к разным аттракторам. Один из аттракторов точка $(0, 0)$ на плоскости $R \times S$. Если численность популяции соответствует области притяжения этого аттрактора, произойдет вымирание. Эффективность воспроизводства популяции находящейся в надкритическом диапазоне состояния нерестового запаса весьма велика, что часто служит поводом для ошибочных оптимистичных промышленных прогнозов. Мы это видим в форме не больших пиков на графиках вылова сига и осетра. Популяция долго способна поддерживать высокий процент изъятия, но потом произойдет резкое снижение уловов. Коллапс происхо-

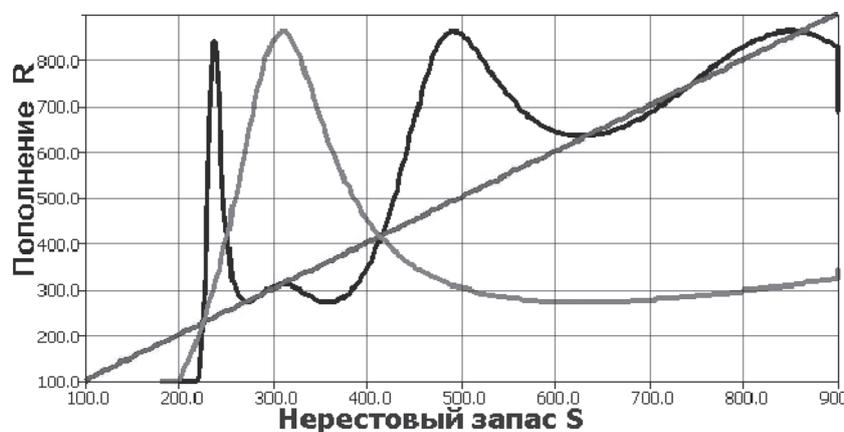


Рис. 5. Появление двух циклов периода $p = 2$ для $\psi(\psi(S))$

дит так, будто мы имеем дело с короткоцикловым видом, а не популяцией состоящей минимум из 7 возрастных групп. Коллапс сложно предвидеть экспертам, ориентирующимся на влияние гидрологических факторов. На Нижней Волге в 1980 гг. они были благоприятны.

В ходе совершенствования метода предложена модель с учетом скачкообразно меняющейся скорости роста в виде гибридной системы на основе предикативного изменения правой части дифференциального уравнения. Обнаружена возможность притяжения соседствующих в некоторой области $\delta \in \Omega_2$ начальных точек к двум альтернативным циклическим траекториям. Эффект сосуществования циклов не наблюдается на бифуркационных диаграммах, так как при их построении используют фиксированные начальные точки. Интервал значений параметра, в котором существует один из циклов, весьма узок, потому для популяции вероятность динамики с переходом на другой устойчивый цикл кажется незначительной. Обоснование такого поведения можно представить для случая нарастающей в процессе адаптации популяционной дивергенции, начальной стадии симпатрического видообразования. Две группы размножаются в сходных условиях, но при этом факторы репродуктивной изоляции уже становятся действующим механизмом. Вместе с растущей дифференциацией для каждой группы обособляется собственная зависимость эффективности воспроизводства, а обобщенная видовая зависимость становится более размытой с обособлением подвидов. Тогда выбор альтернативного цикла актуально трактовать контексте разнообразия эволюционной стратегии размножения. Гипотеза может служить объяснением возникновению значимых отличий для зависимости запаса и пополнения всех каспийских осетровых. В локальной обособившейся группе перестает действовать отрицательный эффект Олли, который мы описали функционалом со свойством $\lim_{S \rightarrow \infty} \Theta(S) \rightarrow 1$. Для некоторых видов полупроходных рыб всегда было свойственно обособление локальных «туводных» сообществ, но мигрирующие формы обеспечивали связность – генетиче-

скую панмиксию. В современных условиях длительные миграции на порядок увеличивают риск промысловой гибели рыб, соответственно увеличивается отбор аллельных вариантов генов способствующих оседлой жизни.

Неустойчивое равновесие в модели представляется точкой-репеллером, но в реальности эта размытая область, где положение функции над или под биссектрисой имеет вероятностный характер. Вероятность превышения плавно убывает, но оставляет шансы на восстановление запасов при отсутствии промысла за счет сохранности локальных форм, менее подверженных промысловой смертности на миграционных путях. Осетровые и сиговые рыбы подвержены значительной внутривидовой дифференциации, например в форме образования сезонных репродуктивных рас [18]. Численность многовозрастной популяции может долго колебаться в окрестности неустойчивого равновесия. В подобной ситуации главное вовремя оценить, что реально происходит с биоресурсами и своевременно ввести мораторий.

Разработка обобщенной модели стадийного онтогенеза для описания нелинейной эффективности воспроизводства представляется не реалистичной, потому необходимо говорить о методике организации вычислительных структур и их сценарном исследовании. Для насекомых фитофагов не актуально переопределение скорости роста в модели, так как активно питающаяся стадия обычно одна. Более важен фактор зависимости смертности поколения от начальной плотности яиц $N(0)$ и включение убыли в уравнение функционала $U[N(0)]$.

Объединение гибридных структур (1) и (3) теоретически возможно, но практически не видим задач, для которых стоит усложнять и так нетривиальное поведение динамических систем. Для экологической интерпретации представляют интерес только несколько из возможных сценариев изменения поведения траекторий полученных данным методом моделей.

Работа обобщает результаты проектов Российского фонда фундаментальных исследований. Гранты № 15-07-01230, 17-07-00125 (СПИИРАН), 15-04-01226 (ГНУ ВИЗР).

Литература

1. **Frolov A. N.** The beet webworm *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera, Crambidae) in the focus of agricultural entomology objectives: The periodicity of pest outbreaks // Entomological Review. 2015. Vol. 95. № 2. P. 147–156.
2. **Veshchev P. V., Guteneva G. I.** Efficiency of natural reproduction of sturgeons in the Lower Volga under current conditions // Russian Journal of Ecology. 2012. Vol. 43. № 2. P. 142–147.

3. **Переварюха А. Ю.** Граничный кризис аттрактора в моделировании причин деградации промысловых биоресурсов // Системный анализ и прикладная информатика. 2015. № 3. С. 4–8.
4. **Ricker W.** Stock and recruitment // Journal Fisheries research board of Canada. 1954. №.11. С. 559–623.
5. **Guckenheimer J.** Sensitive dependence on initial conditions for unimodal maps // Communications in Mathematical Physics. 1979. Vol. 70. P. 133–160.
6. **Feigenbaum M.** Universal behavior in nonlinear systems // Physica D., 1983, Vol. 7, P. 16–39.
7. **Sharkovskii A. N.** Coexistence cycles of continuous map of the line into itself // International Journal of Bifurcation & Chaos. 1995. Vol. 5. P. 1263–1273.
8. **Khodorevskaya R. P., Kalmykov V. A.** Formation of populations of Acipenseridae sturgeons in the Volga-Caspian basin // Journal of Ichthyology, 2014, Vol. 54, Iss. 8, P. 576–583.
9. **Панин Г. Н., Мамедов Р. М., Митрофанов И. В.** Современное состояние Каспийского моря. М.: Наука, 2005, 281 с.
10. **Легеза М. И., Маилян Р. А.** К методике исследования численности осетровых в Каспийском море // Тезисы отчетной сессии ЦНИОРХ. Астрахань, 1974, С. 82–83.
11. **Perevaryukha Y. N.** Present status of Caspian sturgeons, biodiversity and some problems of their specific identification by molecular genetic, including caviar // The 4th International Symposium on Sturgeon. In: Extended abstracts. Oshkosh, Wisconsin, USA. July 8–13 2001.
12. **Hoyle J.** Status of Lake Whitefish (*Coregonus clupeaformis*) in Lake Ontario and the Response to the Disappearance of *Diporeia spp.* // Proceedings of a workshop on the dynamics of lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) in the Great Lakes. 2005. P. 47–61.
13. **Courchamp F., Ludek B., Gascoigne J.** Allee Effects in Ecology and Conservation. Oxford University Press, New York, 2008, 266 pp.
14. **Artyukhin E. N.** On biogeography and relationships within the *Acipenser* // The Sturgeon quarterly. 1995. Vol. 3, № 2. P. 6–8.
15. **Анисимова И. М., Лавровский В. В.** Ихтиология. М.: Высшая школа, 1983, 255 с.
16. **Ryabova G. D.** Variation in morphometric and genetic characteristics of stellate sturgeon juveniles raised at different densities // Russian Journal of Genetics. 2006. T. 42. № 2. С. 182–191.
17. **Von Bertalanffy L.** Quantitative laws in metabolism and growth // Quarterly Review of Biology. 1957. Vol. 32. P. 217–231.
18. **Perevaryukha Y. N., Geraskin P. P., Perevaryukha T. Y.** Comparative immunochemical analysis of intraspecies distinctions of serum proteins of starred sturgeon *Acipenser stellatus* (Acipenseriformes, Acipenseridae) from the Caspian basin // Journal of Ichthyology. 2011. Vol. 51. № 5. P. 392–397.

References

1. **Frolov A. N.** The beet webworm *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera, Crambidae) in the focus of agricultural entomology objectives: The periodicity of pest outbreaks // Entomological Review, 2015, Vol. 95, № 2, P. 147–156.
2. **Veshchev P. V., Guteneva G. I.** Efficiency of natural reproduction of sturgeons in the Lower Volga under current conditions // Russian Journal of Ecology, 2012, Vol. 43, № 2, P. 142–147.
3. **Perevaryukha A. Y.** The boundary crisis of attractor in modeling the causes of degradation of commercial bioresources // System analysis and applied informatics, 2015, № 3, P. 4–8.
4. **Ricker W.** Stock and recruitment // J. Fisheries research board of Canada, 1954, №.11, P. 559–623.
5. **Guckenheimer J.** Sensitive dependence on initial conditions for unimodal maps // Communications in Mathematical Physics, 1979, Vol. 70, P. 133–160.
6. **Feigenbaum, M.** Universal behavior in nonlinear systems // Physica D., 1983, Vol. 7, no. 1, pp. 16–39.
7. **Sharkovskii, A. N.** Coexistence of cycles of a continuous map of the line into itself. International Journal of Bifurcation and Chaos // 1995, Vol. 5, pp. 1263–1273.
8. **Khodorevskaya R. P., Kalmykov V. A.** Formation of populations of Acipenseridae sturgeons in the Volga-Caspian basin // Journal of Ichthyology, 2014, Vol. 54, Iss. 8, P. 576–583.
9. **Panin, G. N., Vamedov, R. M., Mitrofonov, I. V.** Contemporary state of the Caspian Sea, Nauka, Moscow, 2005, 281 p.
10. **Legkeza M. I., Maylian, R. A.** On the methods of research of sturgeon abundance in the Caspian Sea. Theses of session of the Central Institute sturgeon farm, Astrakhan, 1974, pp. 82–83.
11. **Perevaryukha Y. N.** Present status of Caspian sturgeons, biodiversity and some problems of their specific identification by molecular genetic, including caviar // The 4th International Symposium on Sturgeon. In: Extended abstracts. Oshkosh, Wisconsin, USA. July 8–13 2001.
12. **Hoyle J.** Status of Lake Whitefish (*Coregonus clupeaformis*) in Lake Ontario and the Response to the Disappearance of *Diporeia spp.* // Proceedings of a workshop on the dynamics of lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) in the Great Lakes. 2005. P. 47–61.
13. **Courchamp F., Ludek B., Gascoigne J.** Allee Effects in Ecology and Conservation. Oxford University Press, New York, 2008, 266 pp.
14. **Artyukhin E. N.** On biogeography and relationships within the *Acipenser* // The Sturgeon quarterly. 1995. Vol. 3, № 2. P. 6–8.
15. **Anisimov I. M., Lavrovskii V. V.** Ichthyology. Moscow. Vishaya shkola pub., 1983, 255 p.
16. **Ryabova G. D.** Variation in morphometric and genetic characteristics of stellate sturgeon juveniles raised at different densities // Russian Journal of Genetics. 2006. T. 42. № 2. С. 182–191.

17. Von Bertalanffy L. Quantitative laws in metabolism and growth. Quarterly Review of Biology, 1957, Vol. 32, P.217–231.
18. Perevaryukha Y. N., Geraskin P. P., Perevaryukha T. Y. Comparative Immunochemical Analysis of Intraspecies Distinctions of Serum Proteins of Starred Sturgeon *Acipenser stellatus* (Acipenseriformes, Acipenseridae) from the Caspian basin // Journal of Ichthyology. 2011. Vol. 51. № 5. P. 392-397.

Поступила
13.02.2017

После доработки
17.02.2017

Принята к печати
06.03.2017

Perevaryukha A.Yu.

ON THE TECHNIQUE OF MODELING ONTOGENETIC CHANGES IN FISH AND INSECTS LIFECYCLE

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS (SPIIRAS)

The article discusses the approach to modeling of metamorphoses in the development of a number of species in the context of their influence on the success of long-term trends of population dynamics. Changes in survival during early ontogenesis, controlled by important factor – the rate of individual development in a competing group of individuals, can cause unexpected degradation of population with a small excess fishing impact. The theory of nonlinear efficiency of reproduction leads us to the hypothesis that two different nonlinear effects are controlled by similar mechanisms. For insects such fluctuations in survival during metamorphosis can start another process - the rapid outbreak of pests, where actual formalization of the impact of parasites on the first stage of development, depending on the initial concentration of clutches, but limited resources is taken into account at a finishing. The method has been for submission to decline of generations on the basis of dynamic overriding differential equations with discrete-continuous structure of time. To extend the previously proposed model for the formation of generations is formed computing structure for the account mortality depending on the level of competition, complete with trigger functional and a new scheme describing the changes the growth rate for the example of the Caspian Sea sturgeon in three ecological and physiological stages of development. The new model has a non-trivial possibilities parametrically modification of behavior regimes. The coexistence of alternative cycles is explained by the increase in adaptive interspecies differences.

Keywords: *models of populations, reproductive cycle, theory of efficiency of reproduction, redefined predicative structure, stages of early ontogeny, outbreaks and populations degradation.*



Переварюха Андрей Юрьевич. Окончил Астраханский государственный технический университет по специальности «Автоматизированный системы обработки информации и управления» с дипломным проектом «Справочно-информационная система анализа данных экологического мониторинга состояния Каспийского бассейна». В Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН защитил диссертацию «Анализ динамики возобновляемых биоресурсов с использованием комплекса гибридных моделей», кандидат технических наук по специальности «Системный анализ».

Старший научный сотрудник лаборатории Прикладной информатики СПИИРАН. Автор 59 научных работ по моделированию нелинейных явлений в биологических процессах, сценариям популяционной динамики рыб и насекомых.

E-mail: madelf@pisem.net

Perevaryukha Yu. Andrey

Graduated from the Astrakhan State Technical University as an engineer in “Automated Information Processing and control” with the thesis project “Reference and information of environmental monitoring data analysis system of the Caspian Sea status.” In St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS defended dissertation “Analysis of the dynamics of renewable bioresources by using a complex of a hybrid models.” Candidate of Technical Sciences in the specialty “System analysis”. Senior Researcher of Laboratory of Applied Informatics.

Published 59 scientific papers on the modeling of nonlinear phenomena in biological processes, scenarios of population dynamics of fish and insects.

УДК 004; 004.93

В. В. СТАРОВОЙТОВ, Ф. В. СТАРОВОЙТОВ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗЭТАЛОННЫХ МЕР ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси

В статье описываются результаты сравнительного анализа 34 функций, опубликованных в научной литературе и используемых для оценки качества изображений при отсутствии эталона. В англоязычной литературе они называются по-reference (NR) measure или мерами NR-типа. Первая статья, использующая термин по-reference, была опубликована в 2000 году и ежегодно растет число публикаций о новых мерах NR-типа. Тем не менее сравнительных исследований таких мер практически не проводилось. Наличие NR-мер очень актуально для, а) оценки качества сделанных фотографий, б) оценки результатов преобразований, ориентированных на улучшение изображений, и выбор параметров этих преобразований (яркостные изменения, сжатие динамического диапазона яркости, преобразование цветного в полутон и другие). Базы тестовых изображений, используемые для исследования без эталонных мер качества (TID2013 и другие), содержат по 4, 5 вариантов изображений определенного типа искажений параметры которых не описаны. Поэтому разработано шесть типов экспериментов с целью анализа корреляции вычисляемых количественных оценок с визуальными оценками качества тестируемых изображений. Четыре из них являются принципиально новыми: сравнение изображений после гамма-коррекции и изменения контраста с разными параметрами, а также сравнение отретушированных изображений и фотографий, сделанных с разным фокусным расстоянием. Экспериментально показано, что ни одна из исследуемых мер оценки качества изображения не является универсальной, а вычисленная оценка не может быть преобразована в качественную шкалу без учета факторов, влияющих на искажение качества изображения. Большинство исследованных мер вычисляет локальные оценки в малых окрестностях, а их среднее арифметическое является оценкой качества всего изображения. Если на изображении доминируют большие области однородной яркости, меры такого типа могут дать неверные оценки качества, не совпадающие с визуальными оценками.

Ключевые слова: оценка качества изображения, NR-мера, гамма-коррекция, контраст, отретушированное изображение, фокусное расстояние.

Введение

Рассматривая два изображения, человек может сделать вывод, что одно лучше другого или они примерно одинаковые. Он может про ранжировать 3–5 изображений, визуально оценив их качество, например, по пятибальной шкале: очень низкое, низкое, среднее, выше среднего, высокое. Если требуется визуально оценить качество десятков или сотен изображений, это сделать труднее, а про ранжировать их по уровню их качества практически невозможно.

Функции, вычисляющие количественные оценки различий двух сигналов известны давно. Наиболее популярные из них коэффициент корреляции, среднеквадратичное отклонение и т. п. Цифровое изображение – это двумерный

сигнал. Сходство или различие цифровых изображений также можно оценить подобными функциями, но они не учитывают корреляцию между соседними строками и столбцами. Это привело к появлению множества мер сравнения двух изображений. Как правило, одно изображение считается эталонным, а второе преобразованным, например, восстановленным после сжатия. Мера дает оценку близости второго изображения к первому. Множество подобных мер и методика их построения подробно описаны в монографии [1]. Такие меры относятся к классу мер сравнения с эталоном, а в англоязычной литературе они называются full-reference (FR) measure. На практике эталонное изображение имеется не всегда. Например, изображение только что зафиксировано или преобразовано с целью улучшения его визу-

ального восприятия. В таких случаях (при отсутствии эталона) для оценки качества цифровых изображений применяют так называемую безэталонную меру или *no-reference (NR) measure*. Будем их называть мерами NR-типа.

Следует отметить, что функции рассматриваемого типа не являются метриками (как часто пишут в литературе), т. к. не может быть вычислена величина «расстояния» между двумя объектами (в данном случае изображениями) ввиду наличия только одного объекта.

Первая статья, использующая термин *no-reference*, была опубликована в 2000 году [2], с тех отмечается нелинейный рост публикаций на данную тему (см. обзоры [3-6]). Поскольку сравнительных исследований мер исследуемого типа практически не было, целью настоящей работы является сравнительный анализ большого множества безэталонных мер качества цифровых изображений, исследование корреляции полученных количественных оценок с визуальными оценками качества тестируемых изображений.

Качество изображения – это субъективное понятие. Выразить одним числом все возможные аспекты субъективного понятия качества достаточно сложно. Перечислим основные типы искажений, которые влияют на качество цифрового изображения, формируемого оптической системой:

- освещенность снимаемой сцены,
- контрастность снимаемой сцены,
- смаз изображения в результате движения камеры или объекта съемки,
- глубина резкости,
- способ квантования зарегистрированного сигнала,
- метод и степень сжатия изображения при записи в файл.

Следует также отметить, что некорректно сравнивать количественные оценки качества изображений, искаженных разными типами преобразований, например, размытое изображение с малоконтрастным. В таких случаях можно лишь делить изображения на два класса: «хорошие» и «плохие». Границы этих классов должен устанавливать эксперт в определенной прикладной области, например, криминалистике.

Под сценой будем понимать все, что попадает в кадр фотокамеры. Искажения, вносимые

алгоритмами квантования и сжатия, в данной работе не рассматриваются. Недостаточная глубина резкости также может влиять на качество изображения из-за размытия деталей второго плана. Таким образом, среди анализируемых мер будем искать такие, оценки качества изображения которых совпадают с визуальными оценками наблюдателя при первых четырех типах искажений.

1. Исследуемые меры качества

В работе исследовались 34 меры, перечисленные ниже. Для экономии места формулы вычисления исследуемых мер не описываются, но приводятся ссылки на статьи, содержащие их подробное математическое описание.

В результате изучения литературы был сделан вывод, что многие меры, используемые для анализа автофокусировки оптических систем, также могут быть опробованы в качестве NR-мер оценки качества изображений. Хороший обзор таких мер представлен в работе [7]. Кратко опишем, на чем базируется вычисление исследуемых мер. Подавляющее большинство мер, исследуемых в данной работе, вычисляет локальные оценки в окрестности каждого пиксела, а затем вычисляет их среднее арифметическое в качестве финальной оценки.

Локальные оценки вычисляются в окрестности каждого пиксела, а затем суммируются. Запишем аббревиатуры исследуемых мер и опишем величины, вычисляемые в одной окрестности:

– BREN – квадрат разности яркости левого и правого соседей через один пиксел [7].

– CONT – сумма разностей яркости центрального пиксела и его соседей в окрестности [7].

– CURV – отношение яркости пиксела к средней яркости в окрестности [7].

– DCTE – сумма отношение квадратов коэффициентов AC и BC после ДКП [7].

– CURV – Сумма модулей коэффициентов, определяющих квадратичную поверхность в окрестности пиксела [7].

– GDER – сумма квадратов после свертки гауссовых производных с окрестностью пиксела [7].

– GLLV – локальная дисперсия уровней яркости [7].

- GLVM – дисперсия поэлементной разности значений яркости изображения и его локально сглаженного варианта [7].
- GRAE – квадрат градиента Робертса [7].
- GRAT – модуль максимальной разности с ближайшим пикселом, превышающий порог [7].
- GRAS – квадрат разности яркости соседних горизонтальных пикселей [7].
- HELM – отношение Хелми яркости пиксела к усредненной по окрестности, причём в числителе находится большая из этих величин [7].
- LAPE – квадрат значений после свертки с лапласианом [7].
- LAPM – сумма модулей вторых производных по двум направлениям [7].
- LAPV – дисперсия после изображения свертки с лапласианом [7].
- LAPD – сумма модулей вторых производных по четырем направлениям [7].
- SFIL – максимум после свертки изображения с одномерным поворачивающимся фильтром Гаусса [7].
- SFRQ – квадратный корень из суммы квадратов разностей яркости горизонтального и вертикального соседних пикселей [7].
- TENG – Градиент Собела в квадрате [7].
- TENV – Дисперсия градиента Собела в квадрате [7].
- VOLA – горизонтальная автокорреляция изображения [7].
- WAVS – сумма трех вейвлет-коэффициентов первого уровня после преобразования изображения [7].
- FFT – среднее значение спектра Фурье в децибелах [7].
- Q – среднее от произведения первого собственного числа и коэффициента когерентности, вычисленных для матрицы градиентов изображения [7].
- S3 – на базе локального среднеквадратического отклонения яркости формируется карта локального контраста яркости, по ней вычисляется наклон блока в спектральной области, а затем карта локальной резкости [10].
- GABA – посредством псевдо-Вигнера распределения данных о яркости изображения вычисляется пространственно-частотный индекс качества изображения [11].
- CHAN – локальные дисперсии яркости в окрестности пиксела [13].

- STDI – среднеквадратические отклонения яркости в окрестности пиксела [13].

Глобальные меры вычисляются для всего изображения и базируются на статистических оценках изображения целиком:

- ACMO – абсолютный центральный момент значений яркости изображения [7].
- GLVA – глобальная дисперсия уровней яркости изображения [7].
- GLVN – отношение глобальной дисперсии к глобальному среднему яркости [7].
- HISE – энтропия яркости [7].
- HISR – диапазон значений яркости [7].
- WAVV – сумма дисперсий трех вейвлет-коэффициентов первого уровня после преобразования изображения [7].
- WAVR – отношение среднего от суммы квадратов трех вейвлет-коэффициентов третьего уровня к среднему от суммы восстановленных вейвлет-коэффициентов [7].
- CRET – изображение размывается горизонтально и вертикально, вычисляются разности яркости соседних пикселей исходного и размытого изображения, мера определяет величину максимального суммарного размытия по горизонтали или вертикали относительно исходного изображения [8].
- KURT – коэффициент эксцесса распределения яркости изображения.

2. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования выполнялись на двух группах изображений. Первая – это 17 стандартных тестовых изображений из базы [14]. Вторая включала отобранные в сети интернет 14 цифровых фотографий пяти разных сцен, полученных с разным фокусным расстоянием (для анализа качества изображений одной сцены с разной четкостью ее элементов), а также 7 пар изображений типа фотография и её улучшенная разными редакторами (например, [15]) копия с устранёнными морщинами, прыщами, веснушками. Оценки вычислялись для полутоновых представлений изображений.

2.1. Оценка качества после гамма-коррекции изображений

Была выполнена оценка качества 17 вариантов каждого тестового изображения первой группы, полученных путем гамма-коррекции с параметром γ , изменяющимся от 0.2 до 3.6

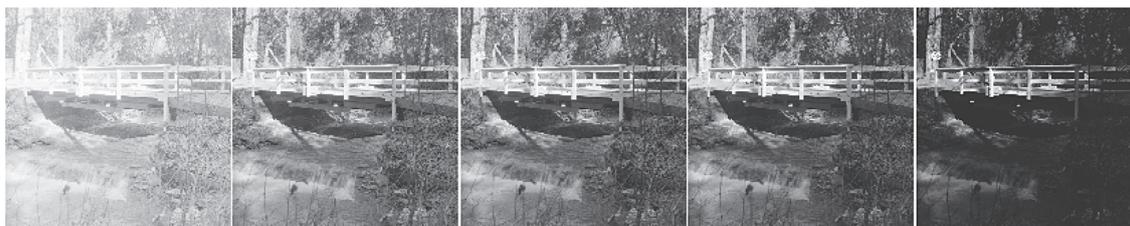


Рис. 1. Тестовое изображение bridge после гамма-коррекции яркости при гамма равном 0.25, 0.75, 1 (совпадает с исходным изображением), 1.25 и 3.3, соответственно

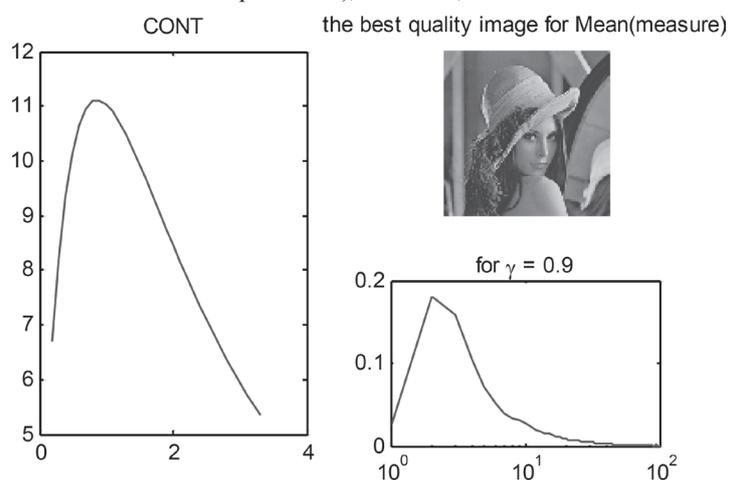


Рис. 2. Пример меры, имеющей четкий пик для значения гамма = 0.9 (слева), справа – соответствующее ему изображение и гистограмма локальных оценок качества

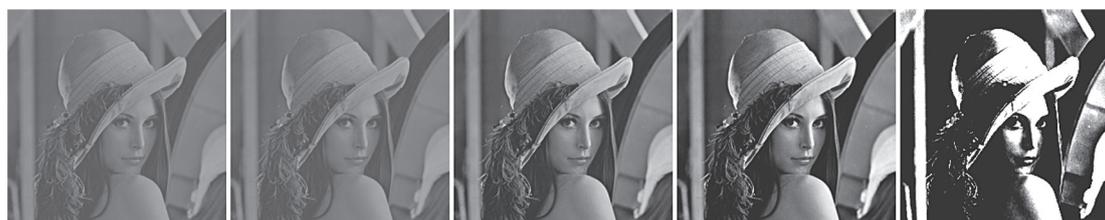


Рис. 3. Варианты изменения контраста изображения (в центре – оригинальное)

с шагом 0.2 по формуле $newIm(i,j) = 255 * (Im(i,j) / 255)^\gamma$. Всего тестировалось $17 \times 17 = 289$ изображений (рис. 1).

Это преобразование формирует ряд изображений от светлого до темного с нелинейно изменяющейся яркостью. Наиболее качественные с визуальной точки зрения изображения находятся в середине ряда, значит графики значений мер качества для такого ряда должны иметь экстремумы в середине (см. рис. 2, справа). Ожидаемый тип графика наблюдался не у всех исследуемых мер.

2.2. Оценка качества после изменения контраста изображений

Было сформировано 7 вариантов каждого изображения первой группы с разными коэффициентами контраста k от 0.2 до 2.6 с шагом

0.2, яркость каждого пиксела (i, j) изменялась согласно формуле $newIm(i, j) = k * (Im(i, j) - 127.5) + 127.5$ (рис. 3).

2.3. Оценка качества после линейного приращения яркости изображения

Для каждого изображения первой группы выполнялось преобразование яркости изображений типа $newIm(i, j) = Im(i, j) + c$, т. е. к значению яркости каждого пиксела (i, j) добавлялась константа c (с учетом ограничений диапазона $[0-255]$), принимающая значения от -100 до $+100$ с шагом 25 (см. рис. 7). Всего тестировалось $13 \times 9 = 117$ изображений (рис. 4).

2.4. Оценка качества после размытия изображений

Для каждого изображения первой группы выполнялось размытие изображений стандарт-



Рис. 4. Тестовое изображение flowers после линейного изменения яркости от -100 до $+100$ с шагом 25 (в центре исходное изображение)



Рис. 5. Изображение bridge, размытое фильтром Гаусса (слева – исходное изображение)



Рис. 6. Пример изображений, полученных фотографированием с фокусными расстояниями $f5$ и $f32$ (верхний ряд), $f11$ и $f22$ (нижний ряд)

ным фильтром Гаусса с изменением значения сигма от 1.0 до 4.0 с шагом 0.75 (см. рис. 5).

2.5. Оценка качества изображений с разной глубиной резкости

Пары изображений второй группы, полученных фотографированием одной сцены с разными фокусными расстояниями (см. рис. 6).

Изображения $f11$ и $f22$ очень похожи, но получены с использованием разных фокусных расстояний ($f11$ и $f22$). Отличия слегка заметны в резкости деталей заднего плана. Подобно визуальным оценкам сравнительного качества этих изображений, оценки полученные исследуемыми мера разделались.



Рис. 7. Пример портрета и его улучшенной копии

2.6. Оценка качества отретушированных изображений

Исследовались 7 пар изображений (фотография и её отретушированная копия, см. рис. 7), т. е. копия априори должна быть более высокого качества. Тем не менее ни одна мера не подтвердила это количественно, вычислив более высокую оценку для второго изображения.

Заключение

В Таблице собраны результаты экспериментов шести типов, перечисленных выше. Четыре из них являются принципиально новыми для тестирования NR-мер предложены 4

Соответствие количественных оценок визуальным для нескольких вариантов тестов

№	мера	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	время, sec
1	ACMO	----?-	-----	?-----	-----	-----	00000000	0.0048
2	BREN	?--+-+	--+---	+??+?	+++++	+++++	++++-+-	0.0208
3	CONT	?--+-+	--+---	+??+?	+++++	+++++	++++-- -+	1.6465
4	CURV	----?-	+--+?++	----?-	----+-	--+---	++++-000	0.0173
5	GDER	?--+-+	--+---	+??+?	++-+++	+++++-	+++--+++	0.0243
6	GLVA	+--++-	--+---	+??+?	+++++	+++++-	+++--+++	0.0029
7	GLLV	?--+-+	--+---	+??+?	+++++	++++--	++++-+++	0.0192
8	GLVN	-----	--+---	-----	+++++	++++--+	+++--+++	0.0017
9	GRAE	?-?-?	--+---	--+---	+++++	+++++	++++-+-	0.0126
10	GRAT	?--+-+	--+---	--+?-	+++++	+++++	++++-+-	0.0203
11	GRAS	---+-+	--+---	+??+?	+++++	+++++	++++-+-	0.0089
12	HELM	-----	--+---	---+-	+++++	++++-+	++++-- -+	0.0224
13	HISE	-----	--+---	-----	----+-	--+---	++++-000	0.0017
14	LAPE	---+-+	--+---	+??+?	+++++	+++++	++++-+-	0.0120
15	LAPM	---+-+	--+---	+??+?	+++++	+++++	++++-- -+	0.0293
16	LAPV	---+-+	--+---	+??+?	+++++	+++++	++++-+-	0.0048
17	LAPD	---+-+	--+---	+??+?	+++++	+++++	++++-- -+	0.0277
18	SFIL	?--+?+	--+---	+??+?	+---+?	+++++-	+++--0+	0.0661
19	SFRQ	?--+-+	--+---	+??+?	+++++	+++++	++++-- -+	0.0183
20	TENG	?--+-+	--+---	+??+?	+++++	+++++	++++-+-	0.0152
21	TENV	---+-+	--+---	+??+?	+++++	+++++-	++++-+-	0.0077
22	VOLA	?--+?+	--+---	+??+?	+++++	+++++	++++-+-	0.0157
23	WAVS	---+-+	--+---	+??+?	+++++	+++++	++++-- -+	0.0646
24	WAVV	-----+	--+---	?-??+?	+++++	+++++	++++-- -+	0.0393
25	WAVR	---+-	--+---	-----	+++++	+++++	++++-- -+	0.0810
26	GLVM	?--+-+	--+---	+??+?	+++++	+++++	++++-+-	0.0151
27	HISR	-----	--+---	+++++	+++++	+--+-	+++--+-	0.0007
28	FFT	---+-+	--+---	+??+?	+++++	+++++	++++-+-	0.0307
29	CRET	---?+-	-----	+??+?	-----	-----	- - - - +?+-	0.0236
30	Q	?--+?+	--+---	+?-?+-	?++++-	+++++-	+++--+++	0.4958
31	S3	---?++	--+---	----++	+++++	+++++	++++-- -+	9.6816
32	KURT	?-??+?	--?---	-----	+--++++	+++--+-	+-- -++-++	0.0261
33	CHAN	-----	--+---	-----	+++++	+---+-	+++--+-	0.0700
34	STDI	+--++-	--+---	+??+?	+++++	+++++-	+++--+++	0.0600

новых типа экспериментов (№1–2, № 5–6). Если количественная оценка меры совпала с визуальной, записан знак «+», в противном случае «-». Когда максимальное значение меры соответствовало пологому пику и было почти правильным, ставился знак «?»». Ноль ставился, когда для всех вариантов изображений теста значения меры были равными.

В последнем столбце записано среднее время обработки изображения размером 512×512 пикселей на персональном Asus K501-UXDM-112. Характеристики компьютера: процессор Intel Core i7 6500U с тактовой частотой 2500 МГц, объём оперативной памяти 6 Гб, операционная система Windows 10. Программы выполнялись в среде Matlab R2016b.

В результате выполненных сравнительных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Выполнено шесть типов экспериментов с целью анализа корреляции вычисляемых количественных оценок с визуальными оценками качества тестируемых изображений. Четыре из них являются принципиально новыми: сравнение изображений после гамма-коррекции и изменения контраста с разными параметрами, а также сравнение отретушированных изображений и фотографий, сделанных с разным фокусным рассеянием.

2. Тест №1 оказался довольно сложным: только 4 меры (SFIL, VOLA, Q, KURT) дали около половины правильных или близких к правильным ответам.

3. Практически все меры на тестовых изображениях показали плохой результат в тесте № 2, определяя изображение с максимальным коэффициентом контраста как наилучшее (визуально только изображение отпечатка пальца выглядит лучшим). В то же время на тестах № 4 (размытие) и № 5 (различная фокусная глубина) оценки практически всех мер совпали с визуальными оценками качества.

4. В целом самыми плохими оказались меры АСМО и HISE, плохо сработавшие на всех тестах. Меры GLVN, GRAE, HISE, WAVR, CHAN сработали хорошо только на самых простых тестах № 4 и № 5 и плохо на остальных. Мера HISR неудовлетворительно сработала на тестах № 1 и № 2, но лучше других на тесте № 3.

5. Интересная особенность проявилась у меры CURV. Это мера показала неверные результаты на всех тестах, кроме самого сложного теста № 2, где у неё было наибольшее количество верных оценок.

6. Широко цитируемая мера S3 (149 ссылок в scholar.google.com) вычисляется в среднем в 641 раз медленнее меры GLVM, но показывает сравнимые с ней оценки качества.

7. Все меры вычисляются быстро (менее 0.1 с на изображениях 512x512 пикселей), за исключением трёх: CONT (1.64с), Q (0.49 с) и S3 (9.68 с).

8. Корректность оценки сильно зависит не только от меры или типа теста, но и от тестируемого изображения. Так, в тесте № 1 для изображения «lena» гораздо больше мер

выдало верный ответ, чем для изображения «boat».

9. В среднем не полную, но удовлетворительную корреляцию с визуальными оценками качества показали следующие меры: BREN, CONT, GDER, GLVA, CLLV, SFRQ, TENG, VOLA, CLVM, Q, STDI (выделены жирным и курсивом в таблице).

Подавляющее большинство исследованных в работе мер вычисляет локальные оценки в малой окрестности каждого пиксела, а затем вычисляет для них среднее арифметическое в качестве финальной оценки. Если на изображении доминируют большие области однородной яркости, меры такого типа могут дать неверные оценки качества, не совпадающие с визуальными оценками. Кроме того, тест № 2 продемонстрировал, что для большинства мер наиболее качественным является максимально контрастный вариант изображения, т. е. практически черно-белый. Таким образом, все исследованные меры относятся к классу контекстно-независимых и не могут полностью совпадать с визуальной оценкой качества изображений.

Экспериментально показано, что ни одна, ни одна из тестируемых мер оценки качества изображения не является универсальной, а вычисленная оценка не может быть преобразована в качественную шкалу без учета факторов, влияющих на искажение качества изображения.

Следует разрабатывать меры качества, учитывающие контекст содержания и формирующие оценки, отличные от средней величины множества локальных оценок.

Литература

1. Старовойтов, В. В. Локальные геометрические методы цифровой обработки и анализа изображений. – Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1997. Starovoitov, V. V. Lokal'nye geometricheskie metody cifrovoj obrabotki i analiza izobrazhenij. – Minsk: In-t tehn. kibernetiki NAN Belarusi, 1997.
2. Caviedes, J. et al. Impairment metrics for digital video and their role in objective quality assessment // Visual Communications and Image Processing, Perth, Australia, 30 May 2000. – P. 791–800.
3. Lin, W., Kuo, C. C. J. Perceptual visual quality metrics: A survey // Journal of Visual Communication and Image Representation, 2011. – Vol. 22. – №. 4. – P. 297–312.
4. Mittal, A., Moorthy, A. K., Bovik, A. C. No-reference image quality assessment in the spatial domain // IEEE Transactions on Image Processing. – 2012. – Vol. 21. – №. 12. – P. 4695–4708.
5. Chandler, D. M. Seven challenges in image quality assessment: past, present, and future research // ISRN Signal Processing. – 2013. – Vol. 2013, 53 p.
6. Manap, R. A. Shao L. Non-distortion-specific no-reference image quality assessment: A survey // Information Sciences, 2015. – Vol. 301. – P. 141–160.
7. Pertuz, S., Puig, D., Garcia, M. A. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus // Pattern Recognition, 2013. – Vol. 46. – № 5. – P. 1415–1432.
8. Crete, F. et al. The blur effect: perception and estimation with a new no-reference perceptual blur metric // Proc. on Human Vision and Electronic Imaging XII, San Jose, CA, USA, January 28, 2007, Vol. 6492. – P. 64920I-1-64920I-11.
9. Zhu, X., Milanfar, P. Automatic parameter selection for denoising algorithms using a no-reference measure of image content // IEEE transactions on image processing, 2010. – T. 19. – № 12. – C. 3116–3132.

10. **Vu, C. T., Phan, T. D., Chandler, D. M.** A spectral and spatial measure of local perceived sharpness in natural images // IEEE transactions on image processing, 2012.– Vol. 21.– №3.– P. 934–945.
11. **Gabarda, S., Cristybal, B.** Blind Image quality assessment through anisotropy // Journal of the Optical Society of America, 2007. – Vol. 24. – № 12. – P. 42–51.
12. **Zhang, C. J.** et al. Approach to enhance contrast of infrared image based on wavelet transform // Hongwai yu Haomibo Xuebao / Journal of Infrared and Millimeter Waves (China). – 2004. – Vol. 23. – №. 2. – P. 119–124.
13. **Wang, Z.** et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE transactions on image processing, 2004. – Vol. 13. – № 4. – P. 600–612.
14. **База стандартных тестовых изображений:** Signal and Image Processing Institute, University of Southern California, CA. – Режим доступа: <http://sipi.usc.edu/database/database.php?volume=misc>, 44 images, tiff. – Дата доступа: 10.02.2017.
15. **Интернет-редактор изображений «Ретушь лица».** – Режим доступа: <http://makeup.pho.to/ru/>. – Дата доступа: 10.02.2017.

Поступила
14.02.2017

После доработки
22.02.2017

Принята к печати
06.03.2017

Starovoitov V. V., Starovoitov F. V.

COMPARATIVE ANALYSIS OF NO-REFERENCE QUALITY MEASURES FOR DIGITAL IMAGES

This paper presents results of a comparative analysis of 34 measures published in the scientific literature and used for evaluation of the image quality without a reference image. In English literature, they are called no-reference (NR) measure or measures NR-type. The first article, the term no-reference, was published in 2000 and each year a growing number of publications on new measures NR-type. However, comparative studies of such measures is not practically conducted. Such measures are very important for a) just made photo quality evaluation, b) assessment of image enhancement transformations and selection of their parameters (such as contrast and brightness adjustments, tone-mapping, decolorization and others). Publicly available image quality databases used for study no-reference quality measures (TID2013, etc.), contain 4-5 variants of images distorted by predefined transformations with unknown parameters. We presented six types of experiments to analyze correlation of the computed numerical quality values with visual estimates of the test images quality. Four of the experiments are new: comparison of images after gamma-correction and contrast enhancement with different parameters, as well as analysis of the retouched images and photos taken with different focal length. It was shown experimentally that no one of the known no-reference quality assessment measure is universal, and the calculated value cannot be converted to a quality scale, excluding factors influencing the distortion of the image. Most of the studied measures calculates local estimates in small neighborhoods, and their arithmetic mean is the quality index of the image. If the image contains large areas of uniform brightness, the measures of this type can give incorrect quality assessment, which will not correlate with the visual assessments.

Keywords: image quality assessment, no-reference measure, gamma-correction, contrast, retouched image, focal length.

Работа частично выполнена в рамках белорусско-сербского проекта Ф16СРБГ-004.



Старовойтов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник ОИПИ НАН Беларуси. Лауреат премии Ленинского комсомола БССР и Государственной премии Республики Беларусь. С 2000 г. преподает по совместительству в разных университетах курсы, связанные с обработкой и анализом цифровых изображений. Сфера научных интересов: обработка и анализ цифровых изображений, полученных в разных участках электромагнитного спектра. Опубликовал более 150 работ в научных журналах и трудах конференций, 3 монографии. Индекс Хирша по данным scholar.google.com равен 13. Подготовил 6 кандидатов наук.

Starovoitov Valery, Doctor of Sciences and professor of computer science. He is a Principal research fellow at the United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus (UIIP NAN Belarus). Awards: the Belarus Lenin Komsomol Prize and the State Prize of the Republic of Belarus in science. Since 2000, he teaches at different universities lecture courses related to the processing and analysis of digital images. Research interests

of professor Starovoitov are processing and analysis of digital images obtained in different parts of the electromagnetic spectrum. He has published over 150 papers in scientific journals and conference proceedings, including 3 monographs. His Hirsch index according to scholar. google. com is 13. Professor Starovoitov supervised by 6 PhD students successfully who defended their thesis.



Старовойтов Фёдор Валерьевич, студент 5 курса факультета прикладной математики и информатики Белорусского государственного университета. В настоящее время работает над дипломным проектом по теме «Анализ качества цифровых изображений в отсутствие эталона» в ОИПИ НАН Беларуси.

Starovoitov Fedor is the 5th year student of the Applied Mathematics and Informatics Faculty of the Belarusian State University. Currently he is working on a thesis project entitled “No-reference image quality assessment” at the UIIP NAN Belarus.

А. В. ГУЛАЙ, В. М. ЗАЙЦЕВ, В. А. ГУЛАЙ

СООТНОШЕНИЕ СВОЙСТВ VITA-СРЕДЫ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Белорусский национальный технический университет

Показано, что максимально полное описание vita-среды «субъективной сенсорной системой» на базе формулируемых синтаксических свойств подразумевает введение сложных высказываний экспертов, построенных на элементарных оценках. На множество моделей, соответствующее всем сенсорным элементам, контролирующим свойства vita-среды, налагаются естественные условия детерминированности и полноты. Рассмотрена степень истинности высказываний экспертов и мера неадекватности представления свойств vita-среды в процессе сенсорного контроля.

Обобщенное описание vita-среды при сенсорном контроле ее свойств возможно с использованием представлений термодинамики информационных процессов. Для выяснения термодинамических закономерностей процедуры сенсорного контроля рассматривается последовательная цепь преобразований: свойство объекта – контролируемый параметр – искажение характеристики – обобщенная координата – информационная модель. При высокоточном контроле количество информации определяется логарифмом относительной точности, а при сравнительно грубом определении параметров vita-среды оно зависит от квадрата относительной точности сенсорного контроля.

Рассмотрены причины и последствия искажения сенсорных образов при использовании технических средств изложения событий и представления свойств vita-среды. Показан противоречивый, двойственный характер воздействия на процесс контроля дополнительных технических средств, включаемых между объектом контроля и «субъективной сенсорной системой». Проанализирована вероятность обеспечения средствами интеллектуальной системы успешного сбора, обработки, накопления или обновления информации о параметрах vita-среды.

Ключевые слова: интеллектуальная vita-среда; модель информационного взаимодействия; энтропийная эффективность контроля; искажение сенсорных образов.

Введение

В настоящей работе развивается предложенный авторами подход к описанию интеллектуальной vita-среды на основе информационных сенсорных образов, формируемых с использованием «субъективной сенсорной системы». С целью выявления соотношений между свойствами vita-среды и результатами их системотехнической интерпретации представлены методы формализованного описания vita-среды. Проанализированы способы формирования информационных потоков и сенсорных образов в процессе выполнения операций контроля состояния vita-среды.

В качестве перспективного интегративного подхода к исследованию vita-среды использованы положения термодинамики информационных процессов, при этом сенсорный контроль рассматривается как термодинамический процесс перехода системы из одного равновес-

ного состояния в другое. Совокупность указанных вопросов трактуется как проблема соотношения свойств vita-среды и их возможных интерпретаций в интеллектуальной модели. В контексте данной проблемы рассмотрены механизмы искажения сенсорных образов при использовании дополнительных технических средств для определения свойств vita-среды. Проанализирована вероятность обеспечения средствами интеллектуальной системы успешной обработки информации о параметрах vita-среды.

«Субъективная сенсорная система» в технологии моделирования vita-среды

Представление «субъективной сенсорной системой» объектов vita-среды и использование полученных оценок в технологиях моделирования требует определенной формализации. Она может выполняться по известным прин-



Рис. 1. Формализация результатов сенсорного контроля vita-среды

ципам формализованного субъективного описания сложных систем [1]; обобщенная схема такого представления показана на рис. 1. Полное представление о синтаксических свойствах vita-среды требует введения сложных высказываний экспертов, построенных на элементарных оценках. Элементарные высказывания $A_i(\alpha_i^k)$ – это высказывания на естественном языке о том, что свойства A_i по соответствующей шкале $\{\alpha_i\} = \{\alpha_i^1, \dots, \alpha_i^m\}$ имеют оценки α_i^k ; $i = 1, 2, \dots, n$; $k = 1, 2, \dots, m_i$. Основой формального выражения сложных высказываний является аксиоматическая теория L – исчисление высказываний с пропозициональными переменными $A_i(\alpha_i^k)$.

В процессе контроля эксперт ставит в соответствие сложным высказываниям истинностные значения («истинно», «ложно»), зависящие от его понимания тех элементарных составляющих A_i (и их значений), которые соответствуют сложному свойству. Поскольку истинность составных высказываний полностью определяется ее значениями на элементарных высказываниях, то в процессе контроля каждый эксперт реализует некоторую модель логики L . Моделью s теории L называется отображение T_s формул теории L в двухэлементное множество $\{0, 1\}$ [1]. Оно формируется за счет того, эксперт приписывает истинному элементарному высказыванию «1», а ложному «0» и тем самым создает модель T_s .

На множество моделей S , соответствующее всем сенсорным элементам, контролирующим свойства системы, налагаются естественные условия детерминированности и полноты [1]. Содержательно условие детерминированности $T_s[A_i(\alpha_i^j) \wedge A_i(\alpha_i^k)] = 0$; $\alpha_i^j \neq \alpha_i^k$ соответствует тому, что в каждой модели $s \in S$ истинной является только одна из оценок каждого свойства vita-среды по определенной шкале. В соответствии с этим условием каждому параметру информационного образа можно при-

писать в данный момент только одно значение. Условие полноты $T_s[A_i(\alpha_i^k)] = 1$ при этом гарантирует для каждой модели $s \in S$ обязательное существование оценки у любого свойства vita-системы по выбранной шкале.

Поскольку возможно формирование различных моделей, интерпретирующих одну и ту же совокупность элементарных высказываний логики L , при определении vita-системы предлагается не только выделять логику высказываний, но и фиксировать некоторое конечное множество моделей S этой логики. С этой точки зрения системой с субъективно-сенсорными переменными можно назвать совокупность переменных $(\{A_i(\alpha_i^k)\}, S)$, то есть некоторое множество высказываний $\{A_i(\alpha_i^k)\}$ и фиксированный набор моделей S логики высказываний L . С учетом данного определения можно уточнить понятие состояния vita-среды, причем такое уточнение возможно как для прямого сенсорного контроля ее свойств, так и для случая косвенного контроля.

Определение. Состояние vita-системы – это значения величин, определяемых в результате сенсорного контроля и характеризующих все основные свойства системы или их определенную часть, через которую оставшаяся часть свойств выражается однозначно.

Контроль, проводимый «субъективными сенсорными приборами» S , ставит в соответствие каждой величине, характеризующей объект (свойству A_i), множество тех α_i^k , для которых существует некоторая совокупность $s \in S$, считающих высказывание $A_i(\alpha_i^k)$ истинным и, следовательно, фиксирующих значение α_i^k как результат контроля A_i . Формально такая ситуация характеризуется введением некоторой средней величины $f[A_i(\alpha_i^k)]$, называемой степенью истинности высказывания $A_i(\alpha_i^k)$. Численно степень истинности характеризуется функцией, сопоставляющей каждому высказыванию Q логики L относительное число моделей из S , в которых это высказывание истинно: $f[Q] = \sum p(s)T_s[Q]$, где функция $p(s)$ удовлетворяет условиям $0 \leq p(s) \leq 1$; $\sum p(s) = 1$ и задает некоторое распределение вероятностей на множестве S .

При рассмотрении системы $(\{A_i(\alpha_i^k)\}, S)$ с состоянием $p(s)$ совокупность моделей S приписывает свойству A_i определенное значение, если существует такое α_i^j , для которого

погрешность контроля $\Delta A_i \ll 1$. В этом случае $f[A_i(\alpha_i^j)] = \max f[A_i(\alpha_i^k)]$; при этом величину $\delta(A_i) = 1 - \max f[A_i(\alpha_i^k)]$ называют мерой неадекватности представления свойства A_i системой $(\{A_i(\alpha_i^k)\}, S)$ с состоянием $p(s)$. Условие, достаточное для единственности максимума, записывается в виде $\delta(A_i) < 1/2$ и принимается в качестве критерия согласованности моделей S по свойству A_i .

Термодинамическая модель процесса сенсорного контроля *vita*-среды

Для обобщенного описания информационных процессов в объеме *vita*-среды при ее сенсорном контроле возможно использование представлений термодинамики [2]. В данном случае может быть установлена энергетическая цена информации, то есть значение энергии Q , которую необходимо рассеять для достижения определенного информационного эффекта – получения заданной точности сенсорного контроля. Термодинамическая модель информационного взаимодействия отражает преобразование энтропии в информацию, а последней – в негэнтропию. Негэнтропийный принцип информационных процессов для сенсорного контроля записывается в виде: $\Delta S_T > I > \Delta N$, где $\Delta S_T = Q/T$ – рост энтропии; T – температура; I – количество информации, полученной в процессе сенсорного контроля; ΔN – негэнтропия. Приведенные неравенства характеризуют основные причины того, что энергетическая эффективность информационных процессов составляет $\eta = \Delta N/\Delta S_T < 1$ (более того, $\eta \ll 1$). Во-первых, энергетическая цена информации обязательно больше T (при этом $\Delta S_T > I$), во-вторых, при упорядочении негэнтропийный эффект всегда меньше информационного ($I > \Delta N$). Указанное значение η говорит о том, что все способы получения информации о макросостояниях системы и процедуры упорядочения информации строго необратимы.

Для термодинамического анализа процесс сенсорного контроля требует особого определения: необходимо представить сенсорный

контроль как термодинамический процесс перехода системы из одного равновесного состояния в другое. Поэтому для выяснения общих термодинамических закономерностей процесса сенсорного контроля рассматривается последовательная цепь преобразований из нескольких этапов (рис. 2). Здесь приняты следующие условные обозначения: l – свойство объекта; λ – контролируемый параметр; δ – искажение параметра; q – обобщенная координата; ξ – параметр модели.

Контролируемое свойство l *vita*-среды не всегда может быть определено напрямую как величина, воспринимаемая «субъективной сенсорной системой». Поэтому промежуточный этап преобразования $l \rightarrow \lambda$ учитывает, что контролируемая величина l входит во внутренний параметр объекта λ и отображается данным параметром, пригодным для восприятия «субъективным сенсором». Введение в состав *vita*-среды дополнительных технических средств может привести к искажению параметра λ , что можно представить как $\lambda \pm \delta$. Следующим этапом является преобразование (которое производится с помощью сенсорной системы) контролируемого параметра λ в обобщенную координату q ($\lambda \rightarrow q$). В свою очередь, обобщенная координата q входит в виде параметра в модель изучаемого объекта, представляет собой элемент создаваемого информационного сенсорного образа ($q \rightarrow \xi$). Объем этого образа, разнообразие его элементов определяется информационной емкостью *vita*-среды.

Определение. Информационная емкость *vita*-среды характеризуется полным объемом ее существенных свойств, которые трансформируются непосредственно или через промежуточные величины в набор параметров, контролируемых с использованием сенсорной системы.

Конкретизировать общий подход к термодинамическому моделированию процесса сенсорного контроля можно следующим образом. Сенсорный контроль связан с взаимодействием таких компонентов *vita*-среды как исследу-

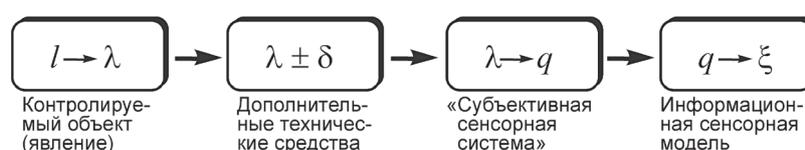


Рис. 2. Преобразование параметров *vita*-среды при сенсорном контроле

емый объект, обладающий комплексом свойств (информативных параметров), и сенсорная система, контролирующая эти параметры. Причем это взаимодействие обуславливает обмен энергией между указанными компонентами, вследствие чего изменяется значение регистрируемого параметра. Диссипативные процессы, связанные с энергетическим обменом, являются единственной причиной необратимости сенсорного контроля свойств *vita*-среды.

Первостепенное значение для термодинамики информационных процессов в сенсорной системе имеет относительная точность, которая определяется как величина, обратная относительной погрешности σ . Количество информации при сенсорном контроле, являющееся функцией σ , можно представить следующим выражением [3]:

$$I = (1/2) \ln(1/\sigma^2 + 1) \approx \begin{cases} \ln(1/\sigma) & \text{при } \sigma^2 \ll 1, \\ 1/2\sigma^2 & \text{при } \sigma^2 \gg 1. \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, при $\sigma^2 \ll 1$ количество информации определяется логарифмом относительной точности, а в случае $\sigma^2 \gg 1$ данный параметр зависит от квадрата относительной точности сенсорного контроля. При увеличении погрешности контроля (уменьшении полезного эффекта) энтропийная эффективность η растет, однако она никогда не достигает значения 1: $\eta < (\sigma/2) \ln(1/\sigma) \ll 1$; $\sigma \ll 1$. Необходимо подчеркнуть, что энтропийная эффективность тем ниже, чем выше полезный негэнтропийный эффект, который равен количеству полученной информации.

Механизмы искажения информационных сенсорных образов *vita*-среды

На формируемый информационный образ *vita*-среды оказывают существенное воздействие дополнительные технические средства, включаемые между объектом контроля и «субъективной сенсорной системой». С одной стороны, их использование дает возможность наиболее полно отобразить реальные факты, точнее показать различные стороны моделируемого события. Технические средства обладают способностью, например, приближать изображения, укрупнять детали, выделять фрагменты, изменять скорости, улавливать мгновения, трансформировать образы. С другой сто-

роны, технические средства с легкостью могут использоваться для искажения фактов, варьирования параметров, искривления характеристик.

Наличие дополнительных технических средств позволяет формировать непрерывный поток ситуационных образов, и в то же время оно создает эффект, запускает механизм произвольной интерпретации этих образов, в том числе искаженного их представления. С функциональной точки зрения роль дополнительных технических средств можно определить как преобразование свойств данного объекта в совокупность промежуточных параметров, в дальнейшем воспринимаемых сенсорами. Указанное преобразование сопровождается произвольным варьированием весовых коэффициентов, усиливающих или, наоборот, ослабляющих восприятие сенсорной системой тех или иных свойств объекта, что в конечном итоге проявляется в искажении информационных потоков и сенсорных образов.

Приведенные выше положения можно проиллюстрировать обобщенной схемой синтеза информационных образов интеллектуальной *vita*-среды, формируемых сенсорной системой (рис. 3). В данном случае совокупность n информационных параметров IP (*information parameters*), транслируемых k элементами модели, можно рассматривать как набор из k информационных образов II (*information images*), выявляемых в каждом из указанных элементов. Причем n параметров при трансляции через k элементов интеллектуальной *vita*-среды образуют n информационных потоков IF (*information flows*). Воздействие дополнительных технических подсистем может приводить к искажению информационных сенсорных образов l *vita*-среды.

Действия операторов, управляющих техническими средствами, во многом основаны на



Рис. 3. Искажение информационных сенсорных образов *vita*-среды

их интуиции, которая задается вполне конкретными закономерностями и случайными обстоятельствами. В данном случае она с наибольшей вероятностью может представлять собой доведенное до автоматизма умение оперировать стереотипами, активно вводить их в предварительные информационные модели и даже составлять из них те или иные ситуационно зависимые конфигурации (см., например, [4]). В свою очередь, ситуационные образы, предваряющие оценки сенсорной системы, опосредованно учитываются в выходных данных, что и приводит к их искажению.

Таким образом, стереотипы внедряются в информационные сенсорные образы на стадии их формирования, на этапе трансляции сведений через элементы интеллектуальной *vita*-системы. Они вводят в непрерывно изменяющиеся информационные потоки «постоянную составляющую», которая не всегда выявляется процессами формализации и становится, в свою очередь, системой стереотипов у потребителей сенсорной информации. В конечном итоге они входят в создаваемые и исследуемые модели мира, в значительной степени «деформируют» их, искажая взаимодействия изучаемых объектов и взаимосвязи исследуемых явлений. Это негативно влияет на принимаемые решения, основанные на результатах моделирования, и сказывается на долговременных последствиях этих решений.

В реальных системах при их технической реализации предъявляются достаточно жесткие требования к достоверности сбора данных и передачи результатов сенсорного контроля [5]. Так, в зависимости от степени ответственности системы устанавливается допустимый уровень снижения полноты сбора (накопления, обновления, обработки) информации в базе данных относительно текущих состояний *vita*-среды, при котором обеспечивается корректное решение набора функциональных задач и выработка требуемых управляющих воздействий.

Предположим, что в системе в циклах управления необходима организация сбора Q текущих параметров множества N объектов и явлений $\{O_j\}; j = 1, 2, \dots, N$. Допустимый относительный уровень снижения полноты ε и доверительная вероятность $P_{\text{дов}}$ определяют тот факт, что в каждом цикле управления должен

быть успешно реализован сбор в базе данных сведений не менее, чем для $Q - \mu$ параметров, где $\mu = \text{Ant}(\varepsilon Q)$; Ant – целочисленная функция Антье. Если P_0 – вероятность обеспечения средствами системы успешного сбора информации об одном параметре, то нижняя граница вероятности P_0 будет являться положительным вещественным корнем базового алгебраического уравнения [5, 6]:

$$P_0^Q + Q(1 - P_0)P_0^{Q-1} + C_Q^2(1 - P_0)^2 P_0^{Q-2} + \dots + C_Q^\mu(1 - P_0)^\mu P_0^{Q-\mu} - P_{\text{дов}} = 0. \quad (3)$$

При высоких значениях Q решение данного уравнения в радикалах невозможно. Для нахождения нижней границы вероятности P_0 целесообразно проводить изоляцию корня на интервале $(0,8; 1,0]$, после чего с помощью итерационного метода (например, метода Ньютона) и половинного деления интервала рассчитывать с точностью не ниже 0,001 искомое значение P_0 . Важность расчета значения P_0 в том, что оно позволяет оценить границы для важнейшего системного показателя – вероятности достоверной передачи данных по информационному каналу $P_{\text{дп}}$.

При заданных коэффициентах готовности сенсорного, канального и вычислительного оборудования (соответственно $K_{\text{гс}}, K_{\text{гк}}, K_{\text{гв}}$) в интеллектуальной системе требуется соблюдение главного условия достижения расчетной вероятности P_0 : $K_{\text{гс}}K_{\text{гк}}K_{\text{гв}}P_{\text{дп}} \geq P_0$. Для обеспечения действенного сенсорного контроля в интеллектуальных системах необходимо использование технического оборудования с высокими показателями надежности, для которых заведомо выполняется условие $K_{\text{гс}}K_{\text{гк}}K_{\text{гв}} \gg P_0$. Даже при крайне высоких значениях коэффициентов $K_{\text{гс}}, K_{\text{гк}}, K_{\text{гв}} > 0,995$ граничное значение вероятности $P_{\text{дп}}$ необходимо поддерживать на уровне не ниже 0,999, что, в свою очередь, требует применения специальных технологий и оборудования, например использования высокоэффективных систем помехоустойчивого кодирования [5, 6].

Заключение

С целью выявления соотношений между свойствами *vita*-среды и результатами их системотехнической интерпретации представлены методы формализованного описания состо-

яния *vita*-среды. В качестве модели информационного взаимодействия компонентов *vita*-среды взята термодинамика информационных процессов, при этом проанализирована последовательность преобразования контролируемых параметров в информационном потоке. Показана зависимость количества получаемой сенсорной информации и величины энтропийной эффективности контроля от его точности.

В контексте рассматриваемых проблем рассмотрены причины и последствия искажения сенсорных образов при использовании технических средств изложения событий и представления свойств *vita*-среды. Проанализирована вероятность обеспечения средствами интеллектуальной системы успешного сбора и обработки информации о параметрах *vita*-среды.

Литература

1. Левченко, В. С. Формализация субъективного описания сложных систем / В. С. Левченко // *Философско-методологические основания системных исследований. Системный анализ и системное моделирование*. – М.: Наука, 1983. – С. 82–97.
2. Колешко, В. М. Термодинамическая модель функционирования интеллектуальной сенсорной системы / В. М. Колешко, А. В. Гулай, В. А. Гулай // *Наука и техника*. – 2012. – № 1. – С. 40–47.
3. Поплавский, Р. П. Термодинамика информационных процессов / Р. П. Поплавский. – М.: Наука, 1981. – 256 с.
4. Ослон, А. Уолтер Липпман о стереотипах: выписки из книги «Общественное мнение» / А. Ослон // *Социальная реальность*. – 2006. – № 4. – С. 125–141.
5. Гулай, А. В. Дистанционное отображение сенсорной информации в базе данных интеллектуальной мехатронной системы / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // *Электроника-инфо*. – 2015. – № 2. – С. 51–55.
6. Рыбина, Г. В. Основы построения интеллектуальных систем / Г. В. Рыбина. – М.: Финансы и статистика, Инфра, 2010. – 432 с.

References

1. Levchenkov V. S. Formalizaciya sub`ektivnogo opisaniya slozhny`x sistem / V. S. Levchenkov // *Filosofsko-metodologicheskie osnovaniya sistemny`x issledovaniy. Sistemny`j analiz i sistemnoe modelirovanie*. – М.: Nauka, 1983. – P. 82–97.
2. Koleshko, V. M. Termodinamicheskaya model` funkcionirovaniya intellektual`noj sensornoj sistemy` / V. M. Koleshko, A. V. Gulay, V. A. Gulay // *Nauka i tehnika*. – 2012. – № 1. – P. 40–47.
3. Poplavskij, R. P. Termodinamika informacionny`x processov / R. P. Poplavskij. – М.: Nauka, 1981. – 256 p.
4. Oslon, A. Uolter Lippman o stereotipax: vypiski iz knigi «Obshhestvennoe mnenie» / A. Oslon // *Social`naya real`nost`*. – 2006. – № 4. – P. 125–141.
5. Gulay, A. V. Distancionnoe otobrazhenie sensornoj informacii v baze dannyx` intelektual`noj mexatronnoj sistemy` / A. V. Gulay, V. M. Zajcev // *E`lektronika-info*. – 2015. – № 2. – P. 51–55.
6. Rybina, G. V. Osnovy` postroeniya intellektual`ny`x sistem / G. V. Rybina. – М.: Finansy` i statistika, Infra, 2010. – 432 p.

Поступила
24.01.2017

После доработки
22.02.2017

Принята к печати
06.03.2017

A. V. Gulay, V. M. Zaytsev, V. A. Gulay

CORRELATION OF PROPERTIES OF VITA-MEDIUM AND THEIR INTERPRETATIONS IN INTELLIGENT MODEL

Belarusian National Technical University

It is shown that the maximally full description of vita-medium with “the substantially sensor system” on the basis of expressed syntax properties implies introduction of complex assertions of experts built on elementary estimates. Natural conditions of determinacy and completeness are put on multiple models by corresponding to all sensor components which control vita-medium properties. The trueness of assertions by experts and inadequacy measure of vita-medium properties provision have been considered in the process of sensor control.

It is shown that thermodynamics ideas of informational processes can be used for the generalized description of vita-medium during sensor control of its properties. In order to find out thermodynamic regularities of the sensor control procedure the series circuit of conversions is considered: object property – controlled parameter – feature distortion – generalized coordinate – information model. During the high precision control the information quantity is determined with the aid of relative precision logarithm, and in case of comparatively rough determination of vita-medium parameters it depends on the square of sensor control relative precision.

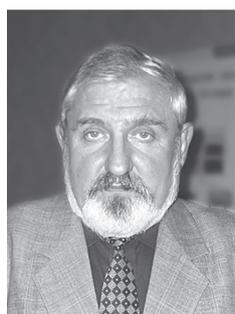
Reasons and consequences of distorted sensor images have been considered with the use of technical means of outlines of events and vita-medium properties provision. A contradictory, two-value character of impact on the process of control of extra technical means is shown, which are included between the controlled object and "the subjective sensor system". Probability of provision of successful collection, procession, accumulation and renewal of information on vita-medium parameters with intelligent system means has been analyzed.

Keywords: intellectual vita-medium; informational interaction model; entropic control efficiency; distortion of sensor images.



Гулай А. В. кандидат технических наук, заведующий кафедрой БНТУ. Окончил Минский радиотехнический институт (1971), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук (1982), лауреат Государственной премии в области науки и техники. Работал в научных учреждениях НАН Беларуси, занимался разработкой и исследованием микроэлектронных систем. С 2004 года – доцент кафедры «Интеллектуальные системы» БНТУ, с 2013 года – заведующий кафедрой. Область научных интересов: методологические проблемы интеллектуальных технологий; интеллектуальные системы формирования знаний; построение интеллектуальных и сенсорных систем.

A. V. Gulay, Ph. D. in Engineering Science, the head of department of the Belarusian National Technical University (BNTU). He graduated from the Minsk Radio Engineering Institute (1971), the postgraduate studies of the Research Institute of Electronics of the Academy of Sciences of BSSR (1981), he defended a thesis in candidacy of Ph. D. in Engineering Science (1982), a laureate of the state prize in the field of science and technology. He worked in scientific institutions of the National Academy of Sciences of the Republic of Belarus and he was engaged in the study of microelectronic technologies, development of microelectronic systems. Since the year 2004 – an assistant professor of the department "Intelligent systems" of BNTU, since the year 2013 – the head of the department. The field of scientific interests: methodological problems of intelligent technologies, intelligent systems of knowledge formation; construction of intelligent and sensor systems.



Зайцев В. М. кандидат технических наук, доцент БНТУ. Окончил Минский радиотехнический институт (1971), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук (1974). В отраслевом научно-исследовательском институте возглавлял научное направление по созданию автоматизированных систем управления. С 2000 года – доцент кафедры «Интеллектуальные системы» БНТУ. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов; проектирование интеллектуальных систем технического назначения.

V. M. Zaitsev, Ph. D. in Engineering Science, an assistant professor of the Belarusian National Technical University (BNTU). He graduated from the Minsk Radio Engineering Institute (1971), the postgraduate studies of the Research Institute of engineering Cybernetics of the Academy of Sciences of BSSR (1974), he defended a thesis in candidacy of Ph. D. in Engineering Science (1974). He worked for a long time in the sectorial research institute and headed the research area for development of automated control systems. Since the year 2000 – an assistant professor of the department "Intelligent systems" of BNTU. The field of scientific interests: digital procession of industrial-use systems.



Гулай В. А. старший преподаватель БНТУ. Окончил Белорусский государственный университет (1997), аспирантуру БНТУ (2008). С 2005 года – старший преподаватель кафедры «Интеллектуальные системы» БНТУ. Область научных интересов: физика и технология сенсорных микро-наносистем; моделирование интеллектуальных и сенсорных систем.

V.A. Gulay, senior lecturer of the Belarusian National Technical University (BNTU) He graduated from the Belarusian State University (1997), the postgraduate studies of BNTU (2008). Since the year 2005 – a senior lecturer of the department “Intelligent systems” of BNTU. The field of scientific interests: physics and technology of sensor micro nanosystems; modeling of intelligent and sensor systems.

**УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT OF
TECHNICAL OBJECTS**

УДК 621.313

НГО ФЫОНГ ЛЕ

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИНКОРПОРИРОВАННЫМИ МАГНИТАМИ

Белорусский национальный технический университет

Классические методы проектирования электрических машин направлены на достижение работоспособности электрической машины и не обеспечивают минимальных затрат при изготовлении и при эксплуатации. В последнее время оптимизация становится важной частью современного процесса проектирования электрических машин. Цель процесса оптимизации, как правило, сводится к обеспечению минимума стоимости машины, потерь энергии, массы, или обеспечения максимума момента и к.п.д. Большинство требований проектирования электрической конструкции машины находятся в противоречии друг с другом (уменьшение объема или массы, повышение КПД и т.д.). Задача оптимизации проектирования синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами (СДИПМ) является задачей многокритериальной оптимизации. Существуют два подхода для решения этой задачи, одним из которых являются эволюционные алгоритмы, получившие широкое распространение в настоящее время. Для оптимизации проектирования СДИПМ эволюционные алгоритмы представляет собой более привлекательный подход. Генетический алгоритм (ГА) является самым популярным в эволюционных алгоритмах. Рассмотрены компоненты и процедура выполнения генетического алгоритма для оптимизации проектирования СДИПМ. Реализован генетический алгоритм на ЭВМ в программных языках C# и Lua. В процессе оптимизации для повышения скорости вычисления и точности аналитический расчет используется вместе с расчетом методом конечных элементов. Включение в процессе оптимизации анализа методом конечных элементов осуществляется с помощью программы FEMM и технологии ActiveX. Результатом процесса оптимизация с помощью генетического алгоритма является множество решений, из которых инженер выбирает самое лучшее. Осуществлена оптимизация проектирования СДИПМ на основе асинхронного двигателя типа АИР112МВ8.

Ключевые слова: синхронный двигатель с инкорпорированными магнитами, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм.

Введение

Синхронный двигатель с инкорпорированными постоянными магнитами имеет ряд достоинств: высокий КПД, низкие потери, высокие массогабаритные показатели, высокую перегрузочную способность, надежность, и большой диапазон регулирования [1].

Проектирование СДИПМ представляет собой сложную задачу. СДИПМ обладает сложной структурой и большим количеством параметров. Кроме того, большинство требований проектирования находятся в противоречии друг с другом, например, минимизация объема или массы с одновременным обеспечением максимума момента. Поэтому, определение варианта СДИПМ, который удовлетворит все критерии и технические ограничения, требует чрезмерно много работы. Следовательно, задача

проектирования СДИПМ является задачей многокритериальной оптимизации (МКО). Для решения этой задачи требуется системный подход на основе итерационной схемы, которая постепенно приводит к оптимальному решению.

В основном существуют два подхода решения задачи: классический подход и подход эволюционных алгоритмов.

Классический подход имеет большое количество алгоритмов, развивается исследователями в математике. Эти алгоритмы обычно дают одно решение. Многие из них преобразуют задачу МКО в однокритериальную задачу. В качестве примеров можно привести метод скалярной свертки, метод ϵ – ограничений, лексикографического упорядочения и целевого программирования [2, 3, 4].

С другой стороны, подход эволюционных алгоритмов представляет собой новую область исследования. Эволюционный алгоритм сохраняет популяцию решений во все время процесса оптимизации, поэтому в конце процесса оптимизации получается множество решений.

Для задачи многокритериальной оптимизации лучше получить множество решений вместо одного [5], и вследствие этого эволюционные алгоритмы представляют собой более привлекательный подход.

В этой статье рассматривается генетический алгоритм, который является самым известным из эволюционных алгоритмов. Приводится реализация генетического алгоритма на ЭВМ и его применение для оптимизации параметров СДИПМ.

Постановка задачи оптимизации параметров и выбор метода оптимизации

Конструкция машины может быть описана вектором параметров \vec{x} (размеры, безразмерные параметры, типы используемых материалов и т.д.). Конструкция учитывает множество m ограничений, которые могут включать в себя технические стандарты, электромагнитные, тепловые, механические или производственные ограничения. Цель оптимизации заключается в максимизации выбранных целевых функций $\vec{f}(\vec{x})$, и обеспечении технических показателей в пределах допустимых областей.

Общая задача многокритериальной оптимизации формулируется следующим образом: найти вектор параметров

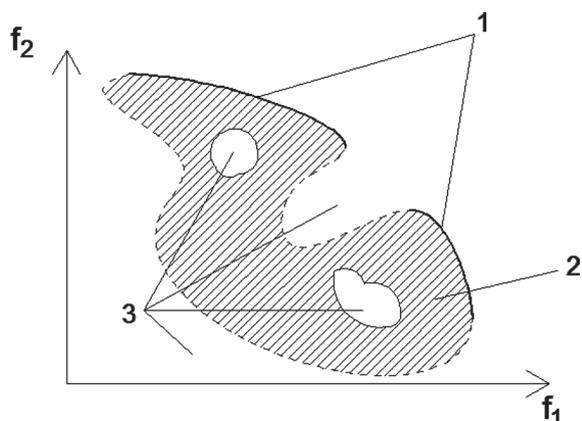


Рис. 1. Визуализация на пространстве критериев: 1 – множество оптимальных по Парето решений (Парето-фронт); 2 – множество допустимых значений критериев; 3 – множество недопустимых значений критериев

$$\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in S \quad (1)$$

с учетом m функций ограничения

$$g_j(\vec{x}) \leq 0, j = 1..m, \quad (2)$$

чтобы максимизировать вектор критериев (целевых функций)

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_p(\vec{x})] \rightarrow \max. \quad (3)$$

В задачах многокритериальной оптимизации обычно критерии оптимизации f_k противоречивы, и оптимизация по каждому из них отдельно может приводить к различным значениям оптимизируемых параметров. Решение задачи многокритериальной оптимизации в общем случае не являясь оптимальным ни для одного из критериев оказывается компромиссным для вектора $\vec{f}(\vec{x})$ в целом.

Решение задачи многокритериальной оптимизации (компромиссное решение) $\vec{x}^* \in S$ называют оптимальным по Парето решением, если не существует $\vec{x} \in S$ такого, что $f_k(\vec{x}^*) \leq f_k(\vec{x})$ для $k = 1..p$ и $f_k(\vec{x}^*) < f_k(\vec{x})$ хотя бы одного k [6]. Множество всех оптимальных по Парето решений называется множеством Парето, а также недоминируемым множеством [6], или Парето-фронт (Pareto-frontier). Оптимальность по Парето векторного критерия $\vec{f}(\vec{x})$ означает, что нельзя дальше уменьшать значение одного из критериев не увеличивая значения хотя бы одного из остальных.

На рис. 1 представлена визуализация на пространстве критериев множества допустимых значений критериев и Парето-фронт в случае двух критериев.

При отсутствии дополнительной информации ни одно из этих решений не может быть принято лучшим по сравнению с другими. Как правило, лицо, принимающее решения (ЛПР), должно представить дополнительную информацию о предпочтительных характеристиках и определить наиболее приемлемое решение. Таким образом, многокритериальная оптимизация имеет два аспекта: оптимизацию и ЛПР.

В задаче оптимизации проектирования СДИПМ некоторые параметры дискретны, например, число витков, число полюсов, и т.д.; явные функции ограничения и целевые функции не всегда получаются; значение целевых функций и функций ограничения не существует на всех точках пространства поиска. Поэто-

му производная целевых функций не всегда существует. Кроме того функции ограничения нелинейные, что затрудняет определение оптимальной точки и следующих точек, удовлетворяющих функции ограничения.

Вследствие особенностей задачи оптимизации СДИПМ эволюционные алгоритмы представляют собой более привлекательный подход. Генетический алгоритм (ГА) представляет собой самый популярный алгоритм в группе эволюционных алгоритмов. ГА не требуют заданной отправной точки, позволяют использовать нелинейные, дискретные целевые функции и условия ограничения. Хотя он не строго математически гарантирует, что оптимальные решения будут найдены, но существует высокая вероятность того, что близкое к оптимальному решение будет найдено [7]. Множество этих решений находится очень близко к настоящему Парето-фронту и называется аппроксимацией множества Парето.

Генетический алгоритм и реализация его на ЭВМ

Обзор генетического алгоритма

Генетический алгоритм (ГА) – это алгоритм поиска, который моделирует естественный отбор с использованием методов естественной эволюции, таких как размножение, наследование, мутации, и отбор.

ГА включает в себя следующие компоненты [8]:

- гены,
- целевые функции (приспособленности),
- генетические операторы (скрещивание и мутация),
- функция отбора,
- популяция (множество особей).

Гены представляются собой оптимизируемые параметры. Популяция представляет собой возможные решения. Целевые функции выражают приспособленность особей на разных аспектах. Генетические операторы (скрещивание и мутация) служат для нахождения новых решений, одновременно сохраняя лучшие решения. Скрещивание сохраняет особенности предыдущих поколений и передает их следующим поколениям, а мутация ищет новые направления развития популяции. Функция отбора выбирает лучшие решения (особи) и создает новое поколение.

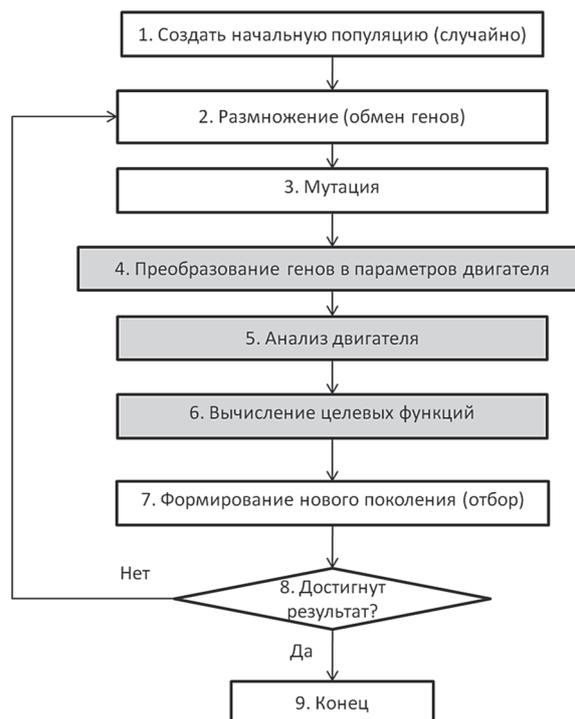


Рис. 2. Схема генетического алгоритма

Схема генетического алгоритма представлена на рис. 2. Сначала первая популяция создана случайным образом (блок 1). В цикле применяются генетические операторы как скрещивание (размножение) и мутация (блок 2, 3), результаты которого служат для получения нового поколения. Гены преобразуются в параметры двигателя (блок 4). Модель двигателя создается и анализируется в блоке 5. На основе показателей, получаемых из анализа двигателя, целевые функции вычисляются в блоке 6. На основе результатов целевых функций недоминируемое множество (популяция) выбирается для следующего поколения (блок 7).

В отличие от детерминированной оптимизации в генетическом алгоритме существует случайность и нет строгости математики. Поэтому условие завершения (блок 8) не явно. Обычно для простоты процесс заканчивается, когда количество поколений превышает максимальное.

Основной недостаток ГА заключается в том, что он требует больших вычислительных затрат [9]. Кроме того, с повышением точности аппроксимации, которую достигают увеличением числа недоминируемых решений, задача выбора единственного решения из представленного множества становится более трудоемкой для ЛПП. Однако, хорошая визуализация

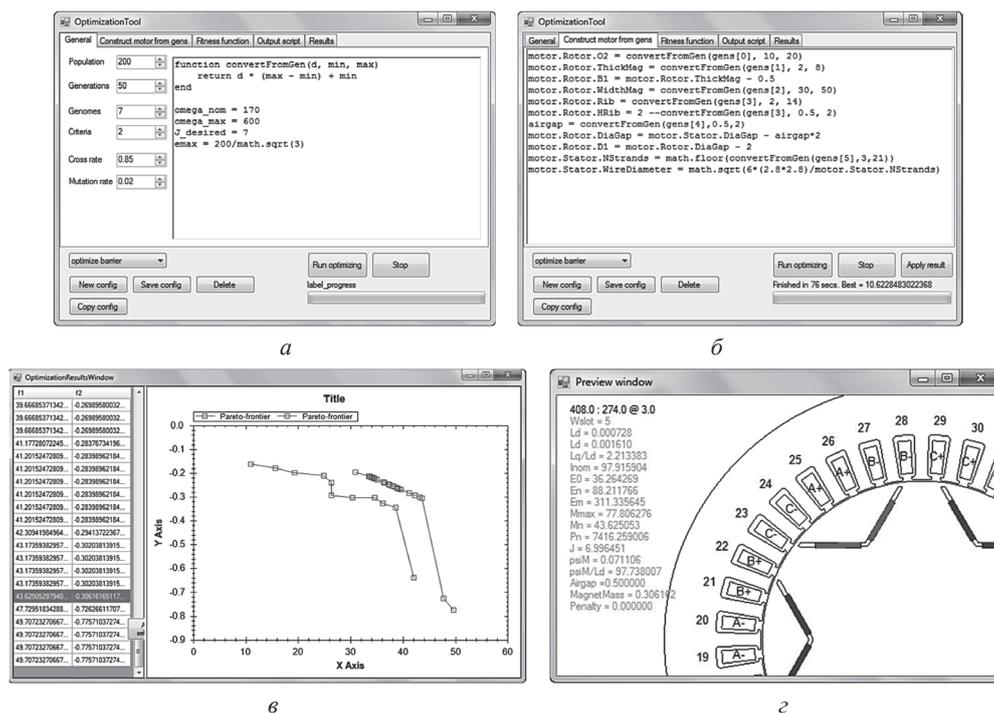


Рис. 3. Интерфейс модуля оптимизация параметров СДИПМ: а, б – Окно ввода исходных данных; в – окно, изображающее Парето-фронт в виде таблицы и графика; г – окно, изображающее выбранное решение

Парето-фронта очень помогает ЛПР выбрать решение.

Реализация генетического алгоритма на ЭВМ

Автор разработал программное обеспечение для автоматизации проектирования СДИПМ (ПАПД), в котором модуль оптимизации параметров СДИПМ осуществляется с помощью генетического алгоритма.

В модуле оптимизации осуществлены следующие части:

- блоки 1, 2, 3, 5, 7, 8, разработанные на языке C#, которые являются основной частью генетического алгоритма;

- блок 4 (преобразование генов в параметры двигателя), блок 6 (вычисление целевых функций), разработанные в компьютерном языке Lua, позволяющие гибко вводить данные задачи оптимизации.

Блок 5 (анализ двигателя) создает модель двигателя и анализирует ее. Параметры модели вычисляются в блоке 4. Используются два типа модели двигателя: аналитическая модель и модель метода конечных элементов (МКЭ). Аналитическая модель, которая основана на электромагнитных уравнениях эквивалентной магнитной цепи [10], служит для предвари-

тельного анализа двигателя и проверки осуществимости модели МКЭ. Для повышения точности используется модель МКЭ с помощью программы FEMM. С помощью технологии ActiveX и программного языка Lua модель МКЭ двигателя создается автоматически, анализируется в FEMM и результаты (показатели двигателя) получаются из FEMM.

На рис. 3 представлен интерфейс модуля оптимизации параметров СДИПМ. Исходные данные задачи оптимизации СДИПМ вводятся с помощью компьютерного языка Lua (рис. 3, а, б). В результате процесса оптимизации получается аппроксимация множества Парето, которая изображается в виде таблицы и графика (рис. 3, в). На основе своего опыта и предпочтения инженер выбирает одно из этих решений (рис. 3, г).

Применение генетического алгоритма для оптимизации параметров СДИПМ

Осуществлено проектирование СДИПМ на основе существующего асинхронного двигателя типа АИР112МВ8: число пазов статора и их форма считаются известными, а параметры ротора и обмоток статора найдены путем оптимизации параметров с помощью генетического алгоритма.

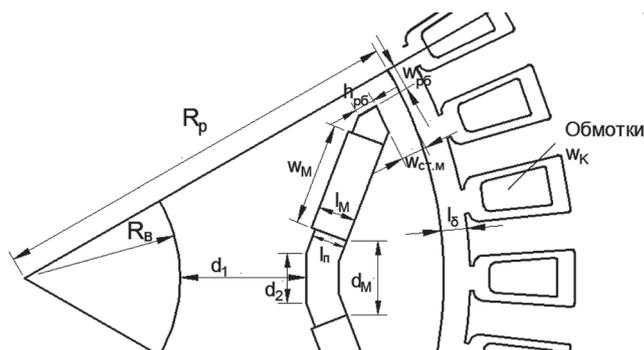


Рис. 4. Геометрические размеры ротора и параметры обмоток статора

При постановке задачи оптимизации параметров СДИПМ, необходимо решить следующие задачи:

1. Определение оптимизируемых параметров;
2. Выбор функций ограничения и методов их обработки;
3. Выбор целевых функций.

Оптимизируемые параметры

Оптимизируемыми параметрами, которые составляют вектор \vec{x} , являются геометрические размеры и другие величины, описывающие модель двигателя, такие как число витков, виды материалов, и т. д. Некоторые параметры представляют собой реальные числа (геометрические размеры), а другие – целые числа (число витков, число полюсов).

Оптимизируемые параметры представлены на рис. 4 и таблице.

Параметры оптимизации на роторе

Обозначение	Описание
R_p	Радиус ротора
$w_{ст.м}$	Ширина стального моста
w_M	Ширина оба магнитов
l_M	Длина магнита по магнитному направлению
d_M	Расстояние между магнитами
l_n	Длина воздушного барьера
$h_{рб}$	Длина ребра
$w_{рб}$	Ширина ребра
R_B	Радиус вала
d_1	Расстояние между валом и воздушным зазором
d_2	Ширина воздушного барьера
w_K	Число витков одной катушки

Целевые функции

Выбранные целевые функции:

- максимизация номинального момента M_H

$$f_1 = M_H \rightarrow \max \quad (4)$$

– минимизация массы магнита $m_{пм}$ для уменьшения стоимости

$$f_2 = -m_{пм} \rightarrow \max \quad (5)$$

Функции ограничения

Функции ограничения, накладываемые технологическими требованиями и ограничениями на разработку двигателя. Один из методов учета ограничений типа неравенств (2) состоит в том, что составляется расширенный критерий вида

$$F_k(\vec{x}) = f_k(\vec{x}) - \sum_j^m \lambda_{jk} g_j(\vec{x}) \quad (6)$$

где λ_{jk} – коэффициент штрафа для целевой функции $f_k(\vec{x})$, если ограничение $g_j(x) \leq 0$ нарушено $j = 1 \dots m; k = 1 \dots p$.

Этот метод позволяет преобразовать задачу с функциями ограничения в задачу без функции ограничения. Однако, выбор подходящих коэффициентов штрафа не простой. Инженер выбирает коэффициент на основе его опыта и/или получает их после нескольких итераций оптимизации.

Технологические требования:

- широкий диапазон регулирования скорости;
- минимизация потерь в стали при холостом ходе.

Исходя из алгоритма регулирования СДИПМ оптимальным вектором тока, получено условие для получения максимального диапазона регулирования [11]:

$$g_1 = I_H - \frac{\Psi_M}{L_d} \leq 0, \quad (7)$$

где Ψ_M – потокосцепление обмотки статора от постоянных магнитов; L_d – индуктивность по оси d ; I_H – значение номинального тока.

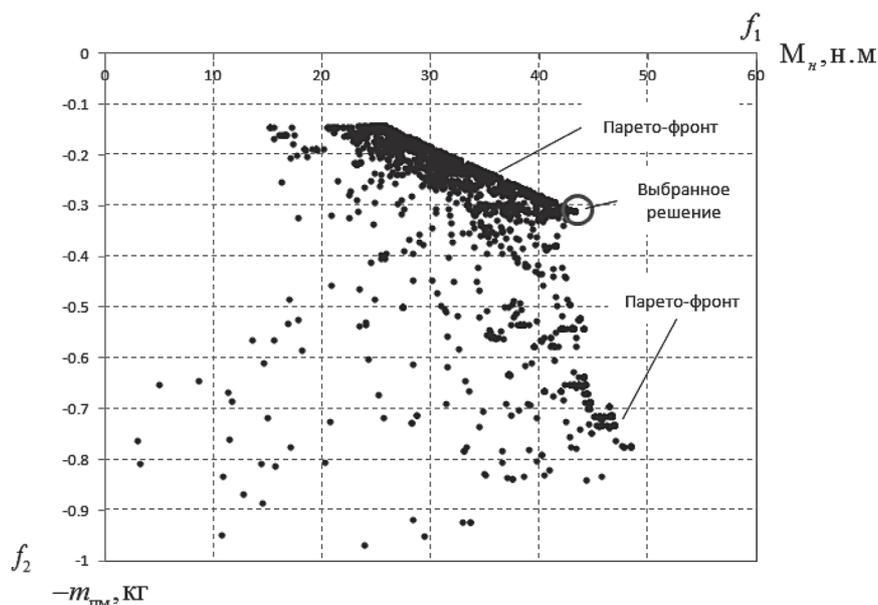


Рис. 5. Визуализация всех возможных решений, оптимальных по Парето решений и выбранного решения на пространстве критериев

С точки зрения минимизации потери в стали при холостом ходе, коэффициент гармонических искажений (КГИ) должен быть минимальным. Значение КГИ будет минимальным, когда ширина распределения магнитной индукции от постоянных магнитов $\gamma_M = 133,5^\circ$ [12]. Это приводит к условиям ограничения:

$$133,5^\circ - \Delta\gamma_M \leq \gamma_M \leq 133,5^\circ + \Delta\gamma_M, \quad (8)$$

или функциям ограничения:

$$g_2 = 133,5^\circ - \Delta\gamma_M - \gamma_M \leq 0, \quad (9)$$

$$g_3 = \gamma_M - 133,5^\circ - \Delta\gamma_M \leq 0, \quad (10)$$

где $\Delta\gamma_M$ – допустимая ошибка, градус.

Результат

В результате процесса оптимизации получены приблизительное множество оптималь-

ных по Парето решений и выбранное решение, представленные на рис. 5. Для изображения улучшения решений в течение процесса оптимизации на рис. 5 также представлены все решения.

Заключение

1. Рассмотрены задача многокритериальной оптимизации и подход эволюционных алгоритмов для решения этой задачи.

2. Реализован генетический алгоритм в виде программного обеспечения для проектирования СДИПМ.

3. Осуществлена оптимизация параметров СДИПМ на основе асинхронного двигателя типа АИР112МВ8

4. Получено множество решений и одно из них выбрано с участием ЛПР.

Литература

1. Miller, T. J. E. Brushless Permanent Magnet and Reluctance motor drive / T. J. E. Miller. – New York; Oxford: Clarendon Press, 1989. 207 p.
2. Брахман, Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. – М.: Радио и связь, 1984. – 287 с.
3. Кини, Р. Л., Райфа, Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения: Пер. с англ. / Под ред. И. Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
4. Ehrgott, Matthias. Multicriteria Optimization. – 2nd. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – 323 p.
5. Multiobjective Optimization of Induction Machines Including Mixed Variables and Noise Minimization / J. Le Besnerais [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. 2008. – Vol. 44, № 6. – 1102–1105 p.
6. Лотов, А. В., Поспелова, И. И. Многокритериальные задачи принятия решений: учеб. пособие / А. В. Лотов, И. И. Поспелова. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
7. S. B. Andersen, I. F. Santos. Evolution strategies and multi-objective optimization of permanent magnet motor / S. B. Andersen, I. F. Santos // Applied Soft Computing. 2012. – Vol. 12, no. 2. – pp. 778–792.
8. Petrenko, Y. N. Fuzzy logic and genetic algorithm technique for non-linear system of overhead crane / Y. N. Petrenko, S. E. Alavi. Proceedings of the IEEE Region 8 SIBIRCON-2010, Irkutsk Listvyanka, Russia, July 11–15, 2010, pp. 848–851.

9. Шварц, Д. Т. Интерактивные методы решения задачи многокритериальной оптимизации. Обзор / Д. Т. Шварц // 2013, № 4. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/547747.html> – Дата доступа: 28.11.2016.
10. Нго, Фьонг Ле, Гульков, Г. И. Эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами // М.: Энергетика. 2015. – № 4. – с. 13–14.
11. Expansion of operating limits for permanent magnet motor by current vector control considering inverter capacity / S. Morimoto [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. 1990. – Vol. 26, № 5. – p. 866–871.
12. Kamiya M. Development of traction drive motors for the Toyota hybrid systems // IEEJ Transactions on Industry Applications. Apr. 2006. – Vol. 126, № 4. – P. 473–479.

Поступила
24.01.2017

После доработки
22.02.2017

Принята к печати
06.03.2017

Ngo Phuong Le

GENETIC ALGORITHM IN OPTIMIZATION DESIGN OF INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Belarusian National Technical University

Classical method of designing electric motors help to achieve functional motor, but doesn't ensure minimal cost in manufacturing and operating. Recently optimization is becoming an important part in modern electric motor design process. The objective of the optimization process is usually to minimize cost, energy loss, mass, or maximize torque and efficiency. Most of the requirements for electrical machine design are in contradiction to each other (reduction in volume or mass, improvement in efficiency etc.). Optimization in design permanent magnet synchronous motor (PMSM) is a multi-objective optimization problem. There are two approaches for solving this problem, one of them is evolution algorithms, which gain a lot of attentions recently. For designing PMSM, evolution algorithms are more attractive approach. Genetic algorithm is one of the most common. This paper presents components and procedures of genetic algorithms, and its implementation on computer. In optimization process, analytical and finite element method are used together for better performance and precision. Result from optimization process is a set of solutions, from which engineer will choose one. This method was used to design a permanent magnet synchronous motor based on an asynchronous motor type АИР112МВ8.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; multi-objective optimization, genetic algorithm.



Нго Фьонг Ле. Стажер Белорусского национального технического университета. В 2016 окончил аспирантуру по специальности «Электротехнические комплексы и системы» в БНТУ. Научные интересы: автоматизированный электропривод, методы оптимального проектирования электрических машин, микропроцессорное управление электроприводом, математическое и имитационное моделирование систем автоматического управления.

Email: ngo.phuong.le@gmail.com.

Ngo Phuong Le. Trainee in Belarus national technical university. In 2016 graduated from post-graduate course majoring in “Electric technical complex and systems”. Science interest: automated electric drive, methods of optimal designing of electric machines, microprocessor, mathematic and imitation model of automatic control.

Email: ngo.phuong.le@gmail.com.

УДК 519.711.3

Е. В. РУЛЬКО

ПОДХОД К ИМИТАЦИИ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ

Военная академия Республики Беларусь

Главное требование к имитационному моделированию военных действий – адекватность. Исходя из этого необходимо, чтобы поведение модельных объектов было максимально приближено к поведению реальных объектов в тех же условиях обстановки или, как минимум, не противоречило логике здравого смысла и требованиям уставных документов. Это создает необходимость разработки механизма, позволяющего формализовать управленческий опыт командиров соответствующих уровней и автоматически выводить решения на основании параметров текущей ситуации и предварительно заданных решающих правил.

Как правило, в процессе принятия решений, командир оперирует сложно формализуемой информацией на уровне комплексных категорий. В противоположность этому, состояние объекта в системе моделирования описывается в виде набора значений конкретных параметров. Для преобразования множества параметров объектов в параметры более высокого уровня предлагается использовать метод анализа иерархий.

Вторая задача, требующая своего разрешения, – синтез аппарата принятия решений на основе полученных комплексных понятий. Для этого предлагается использование механизма нечеткого логического вывода. В этом случае предпочтительность выбора того или иного варианта поведения задается в зависимости от характера пересечения определенных экспертом нечетких множеств, функции принадлежности которых построены на осях сформированных ранее комплексных параметров. В качестве консеквентов решающих правил выступают заранее сформированные стратегии поведения модельных объектов, в связи с чем в предлагаемом алгоритме фактически отсутствует этап дефаззификации, а для аккумуляции заключений используется формула алгебраического объединения. Предлагаемый подход позволяет осуществлять автоматический выбор альтернативы поведения в ходе моделирования без участия оператора.

Ключевые слова: военные действия, имитационное моделирование, принятие решений, метод анализа иерархий, нечеткая логика, нечеткий логический вывод.

Введение

С развитием компьютерных технологий для полного и объективного анализа предметной деятельности широкое распространение получило математическое моделирование. Не является исключением и военная сфера. В вооруженных силах Республики Беларусь разработан и утверждена концепция создания системы моделирования военных действий (далее – СМВД) [1]. В учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь» создан научно-исследовательский центр моделирования военных действий, осуществляющий целенаправленное проведение научных исследований для решения актуальных научных и практических задач в данной области. Основным способом реализации СМВД выбрано имитационное моделирование различных ситуаций, возникающих в ходе боевых действий.

Главное требование к подобному моделированию – адекватность. Исходя из этого необходимо чтобы поведение модельных объектов было максимально приближено к поведению реальных объектов в тех же условиях обстановки или, как минимум, не противоречило логике здравого смысла. Требуемое поведение объектов в системе моделирования задается с помощью специального визуального конструктора, позволяющего формировать алгоритмы, содержащие последовательность выполнения объектами (подразделениями) различных задач – элементарных функциональных действий, выполняемых модельными или групповыми объектами, например, «перемещение по маршруту», «наступление на противника», «оборона назначенных рубежей и позиций», «неподвижный заградительный огонь» артиллерии и др. В каждой из задач указываются входные



Рис. 1. Фрагмент алгоритма «Наступление на противника»



Рис. 2. Примеры комплексных параметров

данные – рубежи, сектора, маршруты и т. д. Алгоритмы могут иметь иерархическую структуру, произвольного уровня вложенности. Так, выполнение алгоритма «Наступление на противника» может содержать следующие этапы – рис. 1.

Подобным образом готовятся различные сценарии тактических маневров или вариантов поведения. При этом остается открытым вопрос организации рационального выбора альтернатив поведения модельными объектами в процессе имитационного эксперимента в заданных точках принятия решений. Фактически, это создает необходимость разработки механизма, позволяющего формализовать управленческий опыт командиров соответствующих уровней и автоматически выбирать предпочтительный вариант поведения из заранее подготовленных на основании параметров текущей ситуации и предварительно заданных решающих правил. Решению данного вопроса и посвящена настоящая работа.

Решение задачи

Как правило, в процессе принятия решений, командир оперирует комплексной, нечеткой и сложно формализуемой информацией. В противоположность этому, состояние объекта в системе моделирования описывается в виде набора конкретных значений параметров. Это создает необходимость решения задачи синтеза комплексных понятий, доступных специалисту военной предметной области на основе параметров объектов системы моделирования. В ходе проведенного исследования [2] установлено, что с точки зрения обеспечения понимаемости и удобства использования военным специалистом для этой задачи наиболее подходящим является применение метода анализа

иерархий (МАИ) [3, 4]. На этапе подготовки к моделированию экспертом осуществляется формирование взвешенной системы параметров, каждый из которых может быть как комплексным, т.е. содержащим другие параметры, так и простым – связанным с конкретной величиной, используемой в системе моделирования. Так, например, параметры «Пре́восходство над противником» и «Потери подразделения» могут быть представлены в виде ранжированных систем других параметров – рис. 2.

Математический аппарат данного подхода предполагает расчет значений i -го параметра верхнего уровня в точке принятия решения в соответствии с выражением:

$$H_i = \sum_{n=1}^k (P_n H_n), \quad (1)$$

где k – число дочерних параметров; P_n – значение важности n -го параметра, определяемое экспертом, в системе параметров верхнего уровня; H_n – собственное численное значение дочернего параметра.

В том случае, если дочерний параметр является комплексным, H_n определяется в соответствии с выражением 1. Если же он связан с некоторой величиной, предоставляемой системой моделирования, $H_n = f_n(X_n)$, где X_n – численное значение параметра, полученное в результате моделирования; $f_n(x)$ – функция зависимости степени влияния параметра от его текущего значения, определяемая экспертом. Задача данной функции осуществить нормировку текущего значения параметра в пределах от 0 до 1. В простейшем случае – это линейная зависимость между заданными минимальным и максимальным значениями параметра.

Использование приведенного аппарата позволяет получить нормированное значение каж-

дого из параметров верхнего уровня в произвольной точке принятия решения в процессе имитации боя.

Второй задачей, требующей своего разрешения, является синтез аппарата принятия решений на основе полученных комплексных понятий. Рассмотрим пример принятия решения о реализации маневра «отход» для подразделения, находящегося в обороне. Он осуществляется в целях выхода подразделений из-под ударов превосходящих сил противника и занятия ими более выгодного положения для последующих действий. Схема отхода заранее планируется и формируется с помощью разработанного визуального конструктора, позволяющего задавать последовательности выполнения различных задач объектов, осуществлять их синхронизацию, описывать события и задавать реакции на них.

Путь $A = \{A_1, A_2, \dots, A_j\}$ – конечное множество альтернатив, представляющих определенные стратегии поведения. В нашем случае существует всего две альтернативы: осуществлять отход или не осуществлять. $H = \{H_1, H_2, \dots, H_k\}$ – множество параметров верхнего уровня, существенных для принятия решения. В нашем случае это могут быть: потери подразделения; потери противника; превосходство над противником; уровень наличия боеприпасов; уровень возможности поддержки прикрытия отхода. Пусть $H_{v1}, H_{v2}, \dots, H_{vk}$ – совокупность множеств возможных значений соответствующих параметров верхнего уровня H_1, H_2, \dots, H_k , т. е. H_{v1} – множество возможных значений H_1 , H_{v2} – множество возможных значений H_2 и т. д. Для каждого из параметров верхнего уровня H_i задается система нечетких множеств $H'_i = \{H'_{i1}, H'_{i2}, \dots, H'_{ir}\}$, так что $\forall H_{ik} \in H_{vi}$, где $k = 0 \dots r$. Каждое из данных множеств определяется функцией принадлежности и отождествляется с определенной лексической переменной, которая понятна военному специалисту (возможно, фигурирует в уставных документах). Так параметру «потери подразделения» могут соответствовать лингвистические переменные «низкие», «ощутимые», «высокие», «критические». Параметру «потери противника» соответствуют аналогичные лингвистические переменные, но заданные в других границах (уровень высоких потерь наступает раньше).

После подготовки системы лексических переменных осуществляется формирование базы решающих правил вида: «ЕСЛИ <Антецедент (предпосылка)> ТО <Консеквент (следствие)>» (F_n), где в качестве антецедента выступает состояние системы моделирования A'_i , выбираемое из множества состояний $A' = \{A'_1, A'_2, \dots, A'_y\}$, которые описаны в рамках параметров $\{H_1, H_2, \dots, H_k\}$, а в качестве консеквента – альтернатива поведения A_k . $F_n \in [0; 1]$ является коэффициентом определенности соответствующего правила.

Каждое из состояний системы моделирования, которому соответствует определенная альтернатива поведения, описывается выражением:

$$A'_i = \bigcap_{n=1}^{n=k} (H'_m \in H_{vn}) \wedge \nexists x \left(\left(x \in \bigcup_{n=1}^{n=k} H_{vn} \right) \wedge \left(x \notin \bigcup_{l=1}^{l=y} A'_l \right) \right) \quad (2)$$

где k – число параметров верхнего уровня, y – число описанных состояний системы, H'_m – задается экспертом предметной области и выбирается из множества лексических переменных H'_n , которое описано на множестве значений H_{vn} параметра H_n .

Смысл выражения (2) заключается в том, что множества состояний внешней среды A'_i , которым соответствует определенная альтернатива поведения управляемого объекта A , образуются в результате пересечения определенных пользователем нечетких множеств $\{H'_1, H'_2, \dots, H'_k\}$, каждое из которых соответствует некой заданной лексической переменной на области значений соответствующего параметра верхнего уровня, по всему набору параметров $\{H_1, H_2, \dots, H_k\}$. При этом пересечения задаются таким образом, что не существует состояний системы, описываемых в рамках параметров верхнего уровня $\{H_1, H_2, \dots, H_k\}$, которые принадлежат объединению множеств возможных значений данных параметров, и одновременно не принадлежат объединению множеств состояний системы $\{A'_1, A'_2, \dots, A'_y\}$, каждому из которых соответствует своя альтернатива поведения. То есть не должно существовать состояний системы, описанных в рамках множества параметров верхнего уровня $\{H_1, H_2, \dots, H_k\}$, которые не принадлежат ни одному из множеств, соответствующему альтернативе поведения.

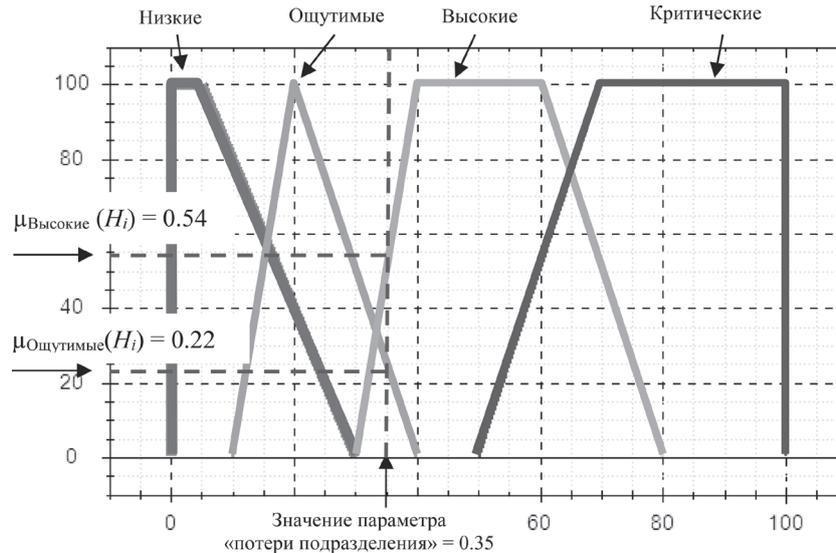


Рис. 3. Определение значений функций принадлежности

Сформированная система правил выглядит следующим образом:

1. «ЕСЛИ <Потери подразделения = критические> ТО <Отход> (0,8);
2. «ЕСЛИ <Потери подразделения = высокие> И <Потери противника = критические> ТО <Оборона> (0,5);
3. «ЕСЛИ <Потери подразделения = высокие> И <Потери противника = высокие> ТО <Оборона> (0,5);
4. «ЕСЛИ <Потери подразделения = высокие> И <Потери противника = ощутимые> ТО <Оборона> (0,5);
5. «ЕСЛИ <Потери подразделения = высокие> И <Потери противника = низкие> ТО <Отход> (0,5);
6. «ЕСЛИ <Потери подразделения = ощутимые> ТО <Оборона> (0,5);
7. «ЕСЛИ <Потери подразделения = низкие> ТО <Оборона> (0,5);
8. «ЕСЛИ <Потери подразделения = высокие> И <Превосходство над противником = превосходство противника> ТО <Отход> (0,9);
9. «ЕСЛИ <Превосходство над противником = значительное превосходство противника> ТО <Отход> (0,9);
10. «ЕСЛИ <Превосходство над противником = значительное наше превосходство> ТО <Оборона> (1);
11. «ЕСЛИ <Уровень наличия боеприпасов = критический> ТО <Отход> (1);
12. «ЕСЛИ <Уровень возможности поддержки прикрытия отхода = низкий> ТО <Оборона> (0,5);

Выполнение требований выражения (2) достигается за счет фигурирования в системе правил всех вариантов лексических переменных параметра «Потери подразделения» в сочетании со всеми вариантами лексических переменных параметра «Потери противника». Это означает, что при любом состоянии системы моделирования одно из выражений окажется с ненулевой истинностью.

Механизм нечеткого вывода вызывается в точке принятия решения в процессе имитационного моделирования. Как правило, он предполагает ряд этапов [5–7]. Этап фаззификации подразумевает установку соответствия между численным значением параметра верхнего уровня H_i , определяемым в соответствии с выражением (1), и значениями функций принадлежности нечетких множеств $\{H'_{i1}, H'_{i2}, \dots, H'_{ir}\}$, определенных на множестве значений данного параметра.

Допустим, что в точке принятия решения параметры верхнего уровня имеют следующие значения: потери подразделения – 0.35; потери противника – 0.45; превосходство над противником – 0.23; уровень наличия боеприпасов – 0.58; уровень возможности поддержки прикрытия отхода – 0.33.

Тогда для параметра «потери подразделения» значения функций принадлежности соответствующих нечетких множеств будут следующими – рис. 3.

Определенная в данном случае система нечетких множеств параметра верхнего уровня, как и система решающих правил, задаются

пользователем субъективно, на основании собственного опыта. Функции принадлежности могут иметь трапецевидную или треугольную форму. Это позволяет закладывать в систему моделирования правила принятия решений различных субъектов и сравнивать их между собой по результатам экспериментов.

Агрегирование подусловий – процедура определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода. Для выражения, образованного с помощью нечеткого логического «И», значение функции принадлежности, как правило, определяется следующим образом: $\mu_{(A \cap B)} = \min(\mu_{(A)}; \mu_{(B)})$. Степень истинности антецедента умножается на коэффициент определенности решающего правила F_n для получения итогового значения. Так, для правила «ЕСЛИ <Потери подразделения = критические> ТО <Отход> (0,8) значение истинности будет равно произведению истинности выражения <Потери подразделения = критические> и коэффициента определенности – 0,8. Итого – $0 * 0,8 = 0$. Аналогичным образом вычисляются значения истинности всех решающих правил.

На данном этапе антецеденты каждого из решающих правил обладают определенными степенями истинности. При этом каждому антецеденту соответствует свой консеквент, представляющий альтернативу поведения. Таким образом, у каждого консеквента решающего правила есть определенная степень предпочтительности. Допустим, в нашем случае это выглядит следующим образом:

1. <Отход> – 0;
2. <Оборона> – 0,24;
3. <Оборона> – 0,27;
4. <Оборона> – 0;
5. <Отход> – 0;
6. <Оборона> – 0,11;
7. <Оборона> – 0;
8. <Отход> – 0,49;
9. <Отход> – 0,32;
10. <Оборона> – 0;
11. <Отход> – 0;
12. <Оборона> – 0,41;

Аккумуляция заключений в системах нечеткого вывода – это процесс нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных. Каждое из продукционных правил стремится в меру

собственной истинности сделать выбранным соответствующий ему антецедент. Так выбору альтернативы <Отход> способствует группа правил, связанных с анализом текущего соотношения сил и средств. Выбору альтернативы <Оборона> способствует группа правил, связанных с анализом уровня потерь противника и уровнем возможности поддержки прикрытия отхода.

Следует отметить, что этап дефазификации, подразумевающий переход от значений функций принадлежности непрерывной выходной переменной к ее числовому значению, является обязательным для систем нечеткого вывода [5]. В связи с тем, что в нашем случае необходимо выбрать вариант из множества, данный этап будет отсутствовать.

Для вычисления итоговой предпочтительности выбора варианта предлагается использование алгебраического объединения: $\mu_{(A \cup B)} = \mu_{(A)} + \mu_{(B)} - \mu_{(A)} \mu_{(B)}$. Данное выражение позволяет именно аккумулировать вклад каждого из правил в предпочтительность выбора своего консеквента, в отличие от наиболее распространенного в таких случаях подхода – max-объединения [5]. Для альтернативы <Отход> в этом случае значение предпочтения будет следующим: $P<Отход> = 0,49 + 0,32 - 0,49 * 0,32 = 0,81 - 0,16 = 0,65$ (по правилам 8 и 9).

Для альтернативы <Оборона> существует большее число правил с ненулевой истинностью, поэтому объединение множеств будет производиться последовательно:

$$P_1<Оборона> = 0,24 + 0,27 - 0,24 * 0,27 = 0,51 - 0,06 = 0,45 \text{ (по правилам 2, 3).}$$

$$P_2<Оборона> = 0,45 + 0,11 - 0,45 * 0,11 = 0,51 \text{ (} P_1<Оборона> \text{ и правило 6).}$$

$$P<Оборона> = 0,51 + 0,41 - 0,51 * 0,41 = 0,71 \text{ (} P_2<Оборона> \text{ и правило 12).}$$

Таким образом, $P<Отход> = 0,65$, а $P<Оборона> = 0,71$. В итоге, будет выбран вариант связанный с продолжением обороны. При этом, как видно, существует множество факторов в пользу обоих вариантов.

Заключение

В итоге предлагаемый подход позволяет осуществлять автоматический выбор одной из альтернатив поведения в произвольной точке принятия решения в ходе имитационного мо-

делирования. Первоначальный синтез комплексных понятий позволяет при построении базы решающих правил оперировать высокоуровневыми категориями, понятными военному специалисту. База правил составляется таким образом, что не должно существовать состояний системы, для которых каждое из продукцион-

ных правил имеет нулевую истинность (когда имеет место неопределенность). В связи с дискретным характером выходной информации в предлагаемой схеме нечеткого вывода отсутствует этап дефаззификации. Аккумуляция заключений осуществляется по формуле алгебраического объединения.

Литература

1. Об утверждении Концепции создания системы моделирования военных действий: приказ Министра обороны Республики Беларусь, 19 августа 2009 г., № 664.
2. Разработка модуля принятия решений системы моделирования военных действий / В.М. Булойчик [и др.] // Сборник научных статей ВАРБ. – 2013. – № 24. – С. 10–15.
3. Саати, Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях / Т. Саати – М.: ЛКИ, 2008. – 360 с.
4. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
5. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков – СПб.: БХВ - Петербург, 2005. – 736 с.
6. Пospelov, Д. А. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Д.А. Пospelov – М.: Наука, 1986. – 312 с.
7. Тэрano, Т. Прикладные нечеткие системы / Т. Тэрano, К. Асаи, М. Сугэно – М.: Мир, 1993. – 368 с.

References

1. About the statement of the Concept of creation of SMVD: the order of the Minister of Defenses of the republic of Belarus, on August, 19th, 2009, № 664.
2. Working out of the module of decision-making of system of modeling of military operations / V.M. Bulojchik [etc.] // Collection of scientific articles VARB. – 2013. - № 24. – p. 10–15.
3. Saaty, T. Dec. making with depend. and feedback / T. Saaty – M.: LKI, 2008. – 360 p.
4. Saaty, T. Decision making. Analytic hierarchy process / T. Saaty – M.: Radio and communication, 1993. – 278 p.
5. Leonenkov, A. V. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH / A.V. Leonenkov – SPb.: BHV – Petersburg, 2005. – 736 p.
6. Pospelov, D. A. Fuzzy sets in models of control and systems of artificial intelligence. / D.A. Pospelov – M.: Science, 1986. – 312 p.
7. Terano, T. Applied fuzzy systems / T. Terano, K. Asai – M.: World, 1993. – 368 p.

Поступила
12.01.2017

После доработки
22.02.2017

Принята к печати
06.03.2017

E. Rulko

THE APPROACH TO IMITATION DECISION-MAKING PROCESS IN SYSTEM OF MODELLING OF MILITARY OPERATIONS

Military Academy of the Republic of Belarus

The main requirement to imitating modeling of military operations - adequacy. Proceeding from it is necessary that the behavior of modeling objects has been as much as possible approached to behavior of real objects in the same conditions of conditions or, at least, did not contradict logic of common sense and requirements of authorized documents. It creates necessity of working out of the mechanism, allowing to formalize administrative experience of commanders of corresponding levels and automatically to deduce decisions, on the basis of parameters of a current situation and preliminary set solving rules.

As a rule, in decision-making process, the commander operates with difficult formalizable information at level of complex categories. Contrary to it, the object condition in modeling system is described in the form of a set of values of concrete parameters. For transformation of set of parameters of objects to parameters of higher level the method of the analysis of hierarchies is used.

Thus there is the second problem demanding the permission - synthesis of the device of decision-making on the basis of the received complex concepts. Use of the mechanism of an indistinct logic conclusion for this purpose is offered. In this case preference of a choice of this or that variant of behavior is set depending on character of crossing of the indistinct sets defined by the expert which functions of an accessory are constructed on axes generated before complex parameters. In quality konsekvents solving rules in advance generated strategy of behavior of modeling objects in this connection in offered algorithm actually there is no stage defuzzyfication act, and for accumulation of the conclusions the formula of algebraic association is

used. The offered approach allows to carry out an automatic choice of alternative of behavior during modeling without participation of the operator.

Keywords: Military operations, imitating modeling, decision-making, AHR, fuzzy logic.



Рутько Евгений Викторович, магистр технических наук. Научный сотрудник научно-исследовательского центра моделирования военных действий учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Сфера научных интересов: искусственный интеллект, рефлексивное управление.

E-mail: achtung-2@yandex.ru, тел. 2874863

Yauheni Rulko, the master of engineering science. The research assistant of the research center of modeling of military operations of establishment of formation «Military academy of the republic of Belarus». Sphere of scientific interests: artificial intelligence, reflective control.

**ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING
AND
DECISION-MAKING**

В. Э. МАРКЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ ПОМЕХ В РЛС ПЕРЕХВАТА ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ В РЕЖИМЕ ОБЗОРА

ОАО «АЛЕВКУРП»

Рассматривается модифицированный алгоритм адаптивной компенсации активных шумовых помех, основанный на использовании рекуррентной оценки обратной ковариационной матрицы помех в процессе самонастройки. Оценка матрицы формируется методом последовательной регрессии (МПР), являющегося следствием применения леммы об обращении матрицы к дифференциально-разностному уравнению для сглаженной оценки прямой ковариационной матрицы помех (КМП). Разовая оценка прямой КМП формируется как результат диадного произведения мгновенных векторов помех в каналах обработки. В парциальных каналах реализуются адаптивные трансверсальные фильтры с самонастройкой по величине сигнала суммарной ошибки.

В статье приведены структурные схемы устройств компенсации, реализованных различными способами. Выполнено математическое моделирование работы алгоритмов, реализованного методом наименьших квадратов (критерий минимума среднеквадратической ошибки) и методом последовательной регрессии.

Приводятся результаты математического моделирования работы устройства компенсации помех в условиях активного радиоэлектронного противодействия при многолучевом распространении сигналов и неидентичных амплитудных и фазовых характеристиках каналов обработки. Даны оптимальные значения технических параметров устройств компенсации помех, обеспечивающих получение требуемых величин коэффициента подавления. Выполнен сравнительный анализ показателей эффективности классического и предлагаемого алгоритмов компенсации. Показано преимущество алгоритма компенсации активных помех, использующего рекуррентную оценку обратной ковариационной матрицы помех.

Алгоритм функционирования на основе МПР позволяет существенно снизить требования к специализированным СБИС (ПЛИС) при реализации аппаратно-программных комплексов для первичной обработки радиолокационной, радиосвязной и радионавигационной информации в условиях воздействия активных шумовых помех при наличии эффектов многолучевого распространения сигналов, при наличии запаздывания сигналов по раскрытию антенной системы, а также при неустранимом технологическом разбросе амплитудно-фазовых характеристик СВЧ тракта каналов обработки.

Ключевые слова: активная шумовая помеха, адаптивная компенсация помех, ковариационная матрица помех, вектор весовых коэффициентов, метод последовательной регрессии.

Введение

В настоящее время для компенсации активных шумовых помех (АШП) в наземных РЛС перехвата воздушных целей, работающих в режимах обзора и сопровождения, используются устройства автоматической компенсации мешающих излучений (АКМИ), принцип работы которых основан на использовании взаимной корреляции помехи в основном и дополнительных (компенсационных) пространственных каналах приема и обработки сигналов. Высокая степень межканальной корреляции в каналах обработки определяется следующими условиями [1–5]:

1. Высокий уровень мощности АШП в основном и дополнительных каналах обработки

по сравнению с мощностью сигнала и уровнем внутренних шумов приемного устройства, в том числе – при приеме по дальним боковым лепесткам.

2. Расстояние между дополнительными приемными (компенсационными) антеннами удовлетворяет условию разделения обработки на пространственную и временную (межэлементное запаздывание сигналов по апертуре антенны пренебрежимо мало);

3. Обеспечивается требуемая степень амплитудной, фазовой и временной идентичности основного и дополнительных каналов обработки;

4. Многолучевое распространение АШП, обусловленное наличием на трассе участков

локального отражения и приводящее к искажению волнового фронта помехи на апертуре антенных систем, отсутствует;

5. Угловые направления помехи находятся за пределами основного лепестка диаграммы направленности антенной системы (ДНА АС) основного канала (ОК), число активных помех, воздействующих с различных угловых направлений, не превышает число антенных элементов.

Основным количественным показателем эффективности работы АКМИ является величина коэффициента подавления, характеризующего степень уменьшения мощности помехи на выходе устройства обработки, по сравнению со входом.

В ряде важных для практики случаев обеспечить выполнение перечисленных условий достаточно сложно, что неизбежно влечет за собой снижение эффективности работы АКМИ. Для обеспечения требуемого коэффициента подавления необходимо снижать влияние мешающих факторов за счет использования алгоритмических, аппаратных и технических решений, адаптированных к конкретной структуре устройства обработки сигналов. Данная статья открывает цикл публикаций, посвященных вопросам практической реализации современных алгоритмов обработки радиолокационных сигналов в условиях воздействия естественных и преднамеренных активных и пассивных помех.

В предлагаемой статье рассмотрен алгоритм, обеспечивающий заданную эффективность работы многофункциональной РЛС в режиме обзора при разбросе амплитудно-фазовых характеристик тракта обработки и воздействия нескольких скользящих по частоте хаотических импульсных помех (ХИП) с учетом многолучевого распространения сигналов.

Исходные данные и начальные условия для моделирования

Величина коэффициента подавления определяется следующим образом:

$$K_{\text{п}} = 10 \lg \left(\left(1 - \prod_{j=0}^{J-1} r_j^* r_j \right)^{-1} \right) > K_{\text{тп}} = \quad (1)$$

$$= 10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = (20 \dots 30) \text{ дБ},$$

где $K_{\text{п}}$, $K_{\text{тп}}$ – фактический и требуемый коэффициенты подавления помехи; r_j – парциаль-

ный коэффициент корреляции; P_1 , P_2 – мощность АШП в основном канале обработки на входе и выходе АКМИ соответственно; J – число независимых факторов, определяющих величину коэффициент подавления.

Для интегральной оценки эффективности подавления используется коэффициент подавления АШП, усредненный на интервале обзора по угловым координатам, длительностью 62 мс:

$$K_{\text{п}} = 10 \left(\lg \left(\sum_{k=0}^{K-1} P_{2k} \right) - \lg \left(\sum_{k=0}^{K-1} P_{1k} \right) \right), \quad (2)$$

$$P_{1k} = \mathbf{x}_k^H \mathbf{x}_k, \quad P_{2k} = \mathbf{\epsilon}_k^H \mathbf{\epsilon}_k,$$

где P_{1k} , P_{2k} – усредненные за период повторения импульсов мощности АШП на входе и выходе АКМИ; \mathbf{x}_k , $\mathbf{\epsilon}_k$ – вектор отсчетов входного и выходного сигнала АКМИ в основном канале обработки для k -го периода повторения (ПП) зондирующих импульсов; выходных K – общее число периодов повторения; \mathbf{x}_k^H , $\mathbf{\epsilon}_k^H$ – эрмитово-сопряженные вектора \mathbf{x}_k , $\mathbf{\epsilon}_k$.

Из соотношения оценим минимальное значение требуемого коэффициента корреляции r_0 , обеспечивающего заданный коэффициент подавления АКМИ:

$$r_0 = (1 - 10^{-0.1K_{\text{п}}})^{0.5}, \quad (3)$$

Так, для обеспечения коэффициента подавления $K_{\text{п}} = 20$ дБ результирующий коэффициент межканальной корреляции должен составлять $r_0 = 0.995$, а для $K_{\text{п}} = 30$ дБ $r_0 = 0.9995$. Видно, что требования, предъявляемые к степени идентичности АШП в каналах обработки являются достаточно жесткими и требуют реализации специальных мер по обеспечению заданного коэффициента подавления.

Рассмотрим упрощенную структурную схему устройства АКМИ, представленную на рис. 1, представлена одним основным и четырьмя дополнительными идентичными пространственными каналами приема.

Основной пространственный канал обработки представлен приемо-передающей зеркальной антенной с электромеханическим сканированием и трактом обработки, включающим СВЧ-приемник, УПЧ, АЦП и блок цифровой обработки (БЦО). Компенсационные каналы представлены слабонаправленными антеннами в количестве $N = 4$, основной лепесток диаграммы направленности (ДНА) которых

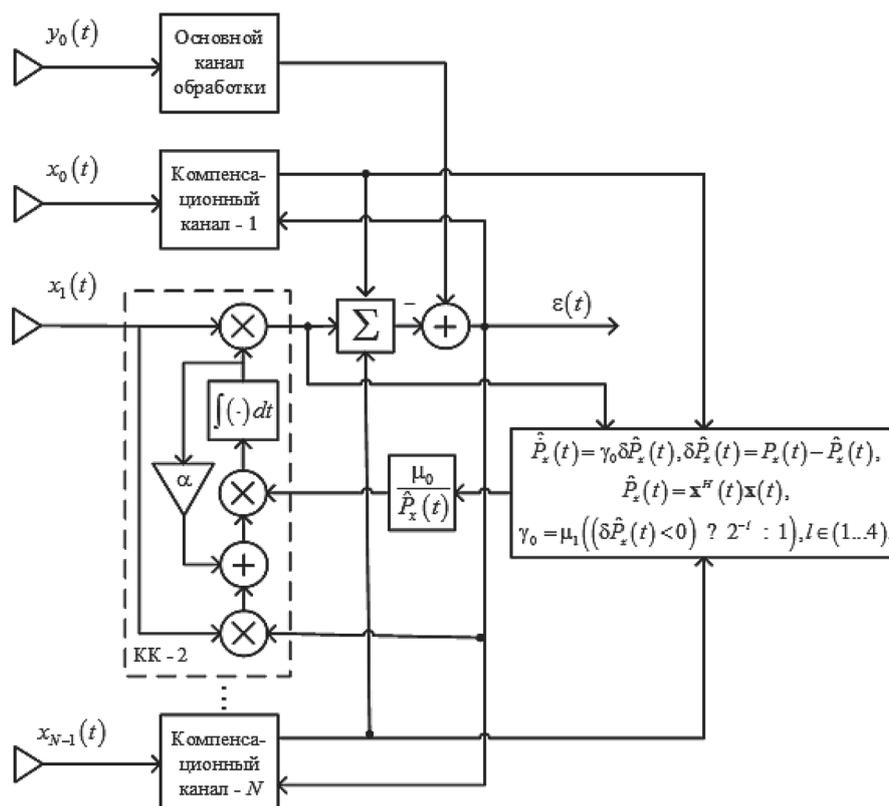


Рис. 1. Упрощенная структурная схема устройства АКМИ, реализующего алгоритм минимизации СКО ошибки оценивания

перекрывает сектор 15...17 градусов с центром в направлении оптической оси зеркальной антенны основного канала приема. Алгоритм адаптивной компенсации помех реализуется в БЦО в виде классической схемы с корреляционной обратной связью и самонастройкой [1–6].

Для адаптации к уровню мощности полезного сигнала используется модифицированный алгоритм самонастройки с дополнительным сигналом смещения, вводимого в контур обратной связи.

Дополнительная цепь отрицательной обратной связи с коэффициентом усиления α используется для исключения возможности подавления всех сигналов (включая помехи), уровень которых не превосходит определенной величины. В [1] показано, что за счет выбора параметра α можно исключить (минимизировать) подавление полезного сигнала и обеспечить одновременно компенсацию помех с высоким уровнем мощности. Поэтому выходное отношение сигнал – (помеха + шум) будет выше, чем в случае использования в контуре корреляционной обратной связи только интегратора.

Максимальная эффективность использования описанной схемы реализуется при выполнении условия:

$$P_n \ll P_s \ll P_j, \quad (4)$$

где P_n – мощность внутренних шумов в приемных каналах; P_s – мощность полезного сигнала; P_j – мощность АПП в приемных каналах.

Алгоритм формирования ВВК при использовании дополнительного сигнала в цепи корреляционной обратной связи, будет рассмотрен ниже.

На структурной используются устройства АКМИ следующие обозначения:

$\mathbf{x}(t) = (x_0(t) \ x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t))^T$ – вектор комплексных амплитуд сигналов на входах компенсационных каналов, образованный парциальными сигналами;; $y_0(t)$ – сигнал на входе основного (опорного) канала обработки с зеркальной антенной и высокими направленными свойствами; α – скалярный множитель, используемый для регулировки порогового уровня для исключения подавления слабых сигналов и помех; $\mu_1 = (2^{-2} \dots 2^{-7})$ – постоянная скалярная величина (эквивалент постоянной времени

сглаживания), определяющая начальный размер шага и параметры фильтра для сглаженной оценки мощности АШП; $\varepsilon(t)$ – выходной сигнал устройства АКМИ после подавления помехи; $N \in (1, 4)$ – число дополнительных каналов приема и обработки.

Характеристики антенной системы основного канала:

– ширина основного лепестка ДНА ОК, град – 1.2;

– уровень ближних боковых лепестков, дБ – минус 23;

– угловая скорость обзора, град/с – 278;

Характеристики антенных систем компенсационных каналов:

– ширина основного лепестка ДНА ОК, град – 15...17;

– уровень ближних боковых лепестков, дБ – минус 12;

– уровень кросс-поляризационной ДНА, дБ – минус 17;

Характеристики отраженного сигнала:

– длина волны зондирующего сигнала, м – 0.032;

– длительность зондирующего импульса, мкс – 0.3;

– период повторения импульсов, мкс – 280;

Характеристики активной шумовой помехи:

– эффективная ширина спектра, МГц – 3...4;

– длительность импульса, мкс – 0.3...30;

– период повторения импульсов, мкс – 1...100;

– спектральная плотность мощности АШП, кВт/МГц – 2...4;

Характеристики приемного устройства:

– частота дискретизации сигнала на выходе фильтра, МГц – 5.83(3);

– число импульсов в пределах цикла обзора по углам – 128;

– размер изображения на индикаторе дальность–угол, м×град – 42000×10.

Модель функционирования устройства адаптивной компенсации АШП на основе алгоритма минимума среднеквадратической ошибки

Рассмотрим наиболее важный для практики случай, когда не выполняются условия оптимальной обработки № 3 и № 4:

– существуют взаимные амплитудно-фазовые, частотные и временные неидентичности

в основном и дополнительных парциальных каналах обработки сигнала;

– прием сигнала и помехи происходит в условиях многолучевого распространения из-за переотражения АШП от подстилающей поверхности на трассе распространения (например, при воздействии специальной АШП типа «антипод»).

В качестве исходного алгоритма расчета ВВК используется модифицированный градиентный алгоритм функционирования адаптивного фильтра пространственной режекции помех (с учетом дополнительного контура отрицательной обратной связи), синтезированного по критерию минимума средней квадратической ошибки (минимума СКО) [1–6, 10]:

$$\xi(t, \mathbf{w}) = M \left(\varepsilon^2(t, \mathbf{w}) - \frac{1}{2} \alpha \mathbf{w}^H \mathbf{w} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial \xi(t, \mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}} = 0, \quad \varepsilon(t) = y_0(t) - \mathbf{w}^H(t) \mathbf{x}(t),$$

где $M(\varepsilon^2(t, \mathbf{w}))$ – среднее значение квадрата функции $\varepsilon(t, \mathbf{w})$; \mathbf{w} – комплексный вектор весовых коэффициентов (ВВК); $\mathbf{w}^H = \mathbf{w}^{*T}$ – эрмитово-сопряженный ВВК.

Работа контуров управления автоматической подстройкой весовых коэффициентов осуществляется в соответствии с дифференциальным уравнением:

$$\dot{\mathbf{w}}(t) = \left(\hat{\nabla}_{\mathbf{w}}(\xi(t, \mathbf{w})) - \alpha \mathbf{w} \right) = -2\mu_0 \left(\frac{\mathbf{x}^*(t)}{\hat{P}_x(t)} \varepsilon(t) - \alpha \mathbf{w} \right),$$

$$\hat{P}_x(t) = \gamma_0 \delta \hat{P}_x(t), \delta \hat{P}_x(t) = P_x(t) - \hat{P}_x(t), P_x(t) = \mathbf{x}^H(t) \mathbf{x}(t), \gamma_0 = \mu_1 \left(\left(\delta \hat{P}_x(t) < 0 \right) ? 2^{-l} : 1 \right), l \in (1...4), \quad (6)$$

где $\hat{\nabla}_{\mathbf{w}}(\xi(t, \mathbf{w}))$ – оценка градиента функции $\xi(t, \mathbf{w})$; $P_x(t)$ – оценка мгновенной мощности помехи в каналах обработки; $\mu_0 = (2^{-2}...2^{-8})$ – постоянная скалярная величина (коэффициент сходимости), определяющая размер шага и регулирующая скорость сходимости и устойчивость процесса самонастройки АКМИ.

Дальнейшим развитием представленного на рис. 1 АКМИ является устройство адаптивной компенсации АШП с использованием КИХ-фильтров в каналах обработки.

Основные преимущества использования адаптивных КИХ – фильтров в устройствах пространственной компенсации АШП:

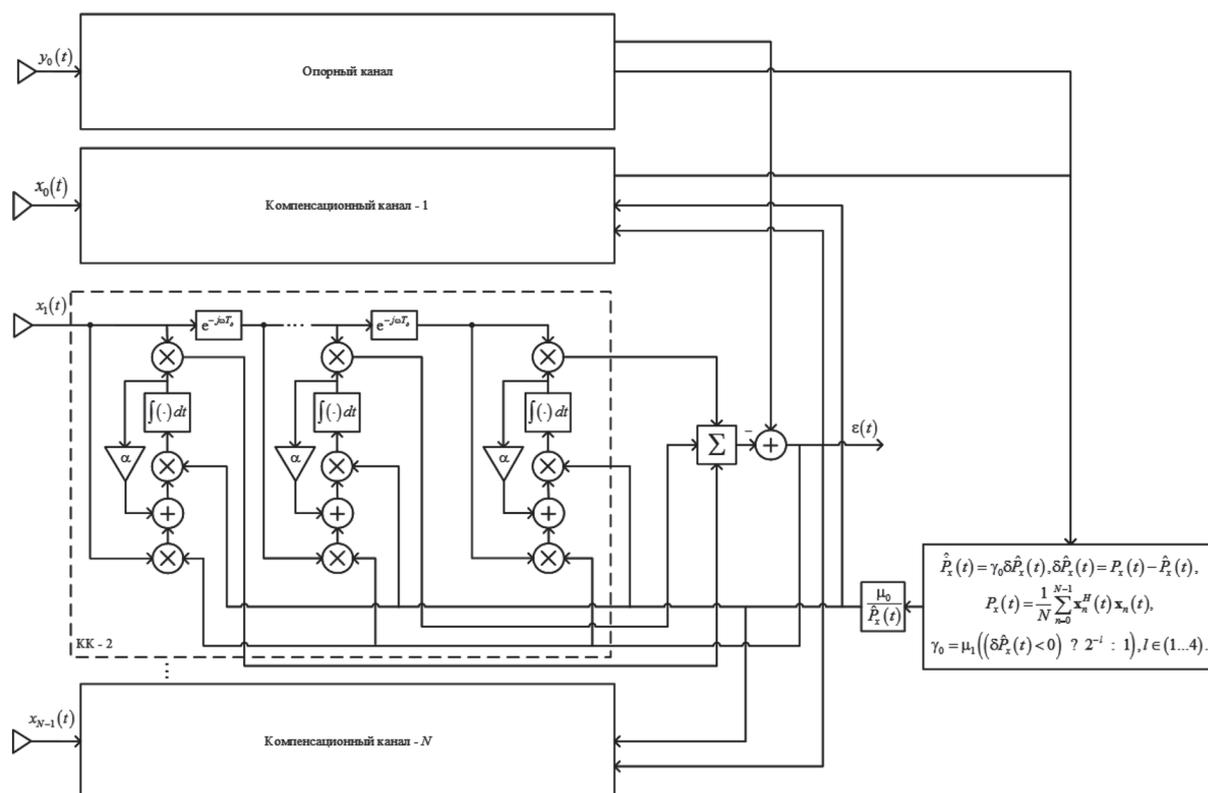


Рис. 2. Упрощенная структурная схема устройства АКМ, на основе адаптивных фильтров с КИХ в каналах обработки

– идентификация и выравнивание искажений импульсной характеристики трассы распространения сигнала (помехи), обусловленных наличием многолучевых каналов, в реальном масштабе времени;

– выравнивание амплитудно-фазовых характеристик каналов обработки, обусловленных различной электрической длиной трактов СВЧ и неидентичностью аналоговых фильтров СВЧ и УПЧ;

– компенсация задержки фронта сигнала, обусловленной распространением по раскрытию малоэлементной решетки, образованной дополнительными антенными элементами.

В этом случае ВВК будет представлен в виде составного вектора, образованного набором из N парциальных векторов размерностью L (где N – число каналов, L – размерность импульсной характеристики адаптивного фильтра в каналах обработки):

$$\mathbf{w} = \left(\mathbf{w}_0^T \dots \mathbf{w}_n^T \dots \mathbf{w}_{N-1}^T \right)^T, \quad (7)$$

$$\mathbf{w}_n = \left(w_{n,0} \ w_{n,1} \ \dots \ w_{n,L-1} \right)^T.$$

Выражение для сглаженной оценки мощности в этом случае примет вид:

$$\hat{P}_x(t) = \gamma_1 \delta \hat{P}_x(t), \delta \hat{P}_x(t) = P_x(t) - \hat{P}_x(t),$$

$$P_x(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{x}_n^H \mathbf{x}_n, \hat{P}_x(t) = LIM(P_{\min}, P_{\max}, \hat{P}_x(t)),$$

$$\gamma_1 = \mu_1 \left(\left(\delta \hat{P}_x(t) < 0 \right) ? 2^{-L} : 1 \right),$$

$$L \in (3 \dots 9), \hat{P}_x(0) = \mathbf{x}_0^H \mathbf{x}_0,$$

где $\mathbf{x}_n = (x_{n,0} \ x_{n,1} \ \dots \ x_{n,L-1})^H$ – вектор парциальных сигналов с выхода адаптивного КИХ – фильтра; $LIM(x_1, x_2, x)$ – функция ограничения входного аргумента $x(t)$ значениями x_1, x_2 ; P_{\min}, P_{\max} – минимальное и максимальное значение мощности АПП, используемое в системе обработки; Δt_d – интервал дискретизации входного сигнала (помехи); $\hat{P}_x(t)$ – сглаженная оценка мощности помехи; T_0 – постоянная времени сходимости процесса самонастройки АКМИ; T_ϕ – постоянная времени сглаживающего фильтра для мгновенной оценки мощности АПП.

На рис. 2 представлена упрощенная структурная схема АКМИ на базе адаптивных фильтров с КИХ в компенсационных каналах обработки. С целью упрощения на структурной схеме не показаны каналы фильтровой обработ-

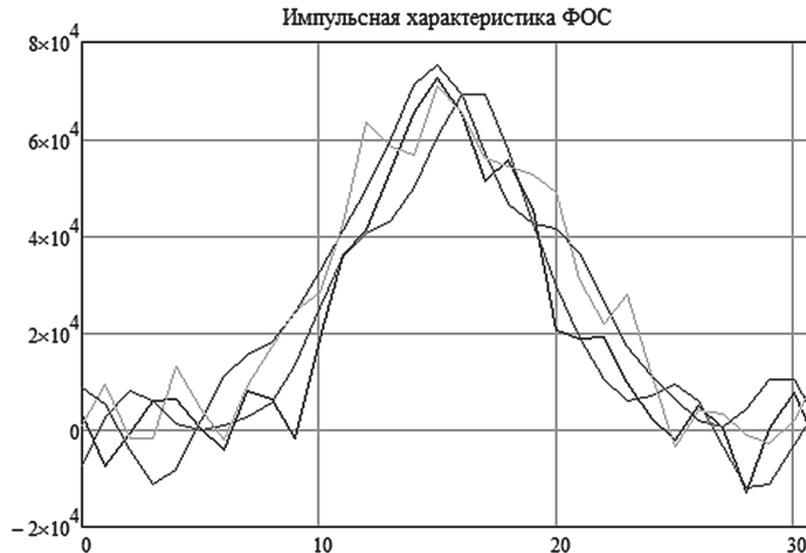


Рис. 3. Импульсные характеристики ФОС с гауссовской амплитудно-частотной характеристикой в каналах обработки АКМИ

ки входных сигналов и помех. При этом предполагается, что аддитивная смесь сигналов и помех, действующих на входе основного и компенсационных каналов, получена путем предварительной фильтрации в фильтре одиночного сигнала (ФОС) с гауссовской импульсной характеристикой (ИХ) в каждом канале обработки.

Моделировалась тактическая ситуация, в которой для прикрытия цели использовались три постановщика АШП-источника мешающих радиоизлучений (ИРИ) заданной интенсивности, генерирующих шумовую ХИП со случайным изменением периода повторения, длительности импульсов, а также линейной перестройкой частоты в пределах полосы пропускания ФОС. Многолучевое распространение учитывалось для первой АШП, число точек отражения от подстилающей поверхности принималось равным $N_p = 4$. Для оставшихся 2 ПАП многолучевой канал распространения сигнала не моделировался.

Амплитудно-фазовые искажения (неидентичности) трактов обработки учитывались путем формирования предварительно искаженных комплексных импульсных характеристик ФОС, независимо в каждом из каналов обработки.

На рис. 3 приведены импульсные характеристики фильтра одиночного сигнала (ИХ ФОС) длиной $L_f = 32$ отсчета, используемые для предварительной частотной селекции в каналах обработки. Неидентичность фильтровых каналов моделировалась введением случайных отклонений (разброса) амплитуды дискретных

отсчетов ИХ ФОС относительно номинальных значений.

Угловое положение целей и ПАП в пределах сектора обзора представлено на рис. 4. По осям обозначено угловое отклонение относительно линии визирования РЛС – цель в радианах.

На рис. 5 представлены результаты моделирования работы устройства АКМИ при наличии трех источников АШП. Слева приведено изображение индикатора угол – дальность при выключенном АКМИ, справа – при включенном АКМИ. По оси абсцисс отложен номер углового дискрета (0...127) в пределах сектора сканирования, по оси ординат – номер дискрета дальности (0...1630). Величина углового дискрета составляет 0.08 градуса, величина дискрета дальности – 25 метров, размер изображения в координатах дальность – угол составляет 42000 м × 10 град.

На рис. 6 приведены синфазная и квадратурная составляющие комплексной амплитуды сигналов в основном канале обработки на входе и выходе АКМИ.

Оценка интегрального коэффициента подавления составляет (7...11) дБ, что свидетельствует о невысокой эффективности компенсации АШП.

Модель функционирования устройства адаптивной компенсации АШП на основе алгоритма последовательной регрессии

Алгоритм последовательной регрессии основан на использовании в рекуррентном алго-

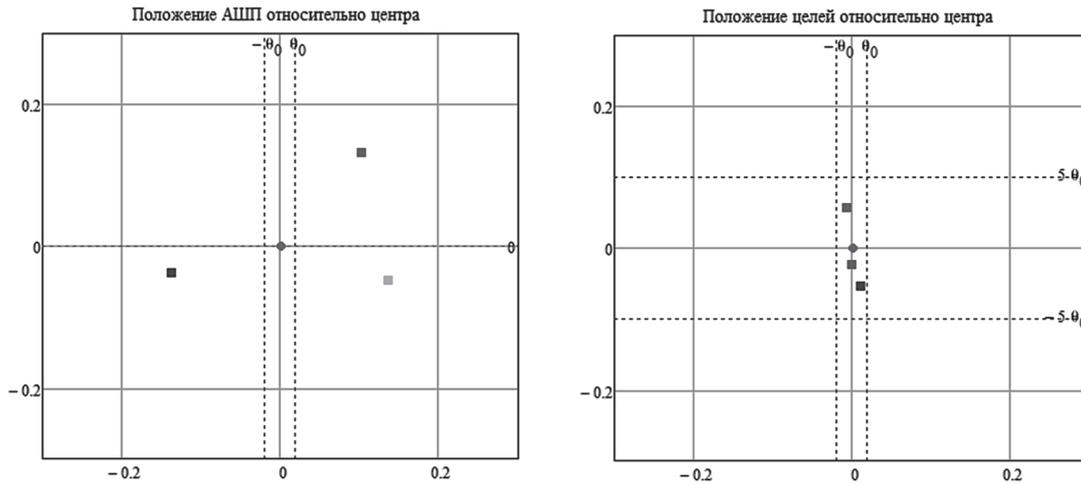


Рис. 4. Угловое положение ПАП и целей в пределах сектора обзора наземной РЛС

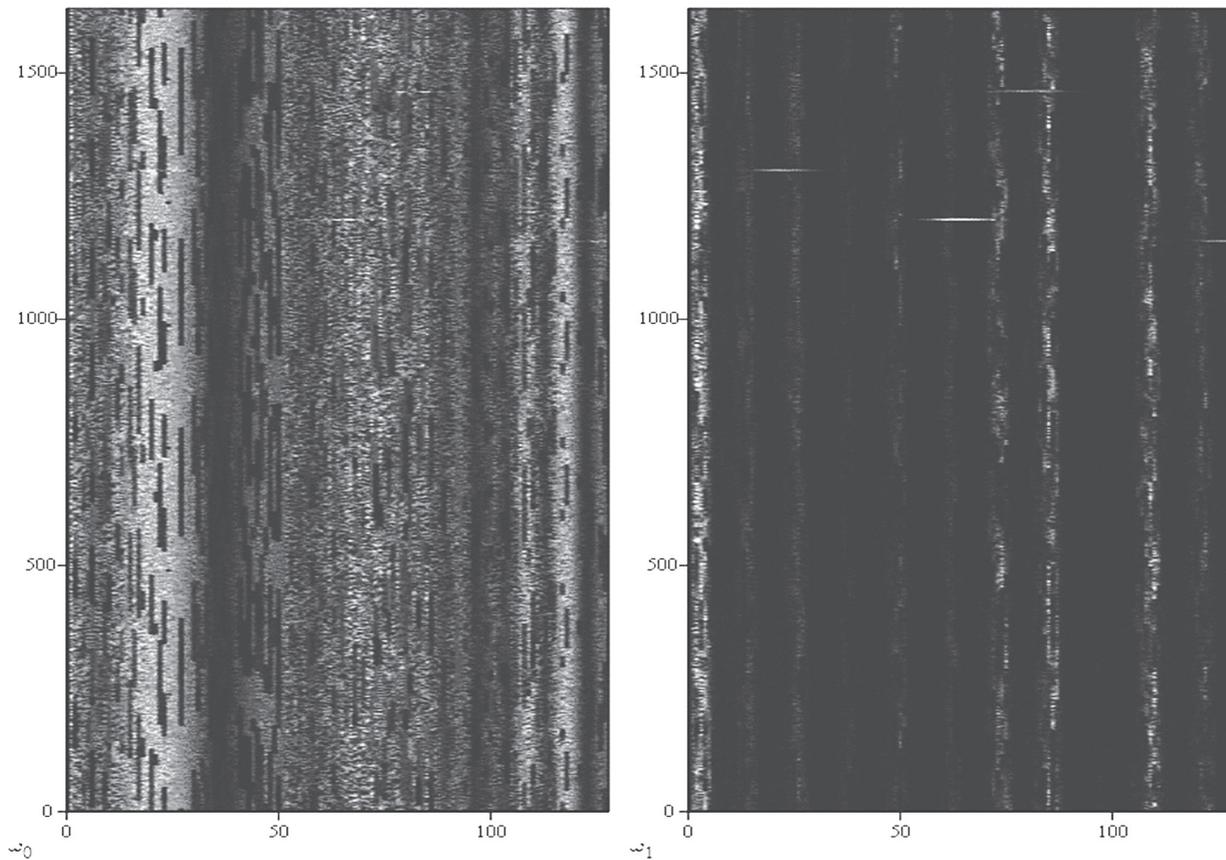


Рис. 5. Экраны индикаторов дальность – угол при выключенном и включенном АКМИ для рекурсивного МНК – алгоритма

ритме поиска оптимального ВВК (минимума многомерной функции) методом Ньютона оценки обратной ковариационной матрицы помех (КМП):

$$\dot{\mathbf{w}}(t) = \mu_0 \hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(t) \hat{\mathbf{V}}_w(\xi(t, \mathbf{w})) = -\mu_0 \hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(t) \mathbf{x}^*(t) \varepsilon(t), \quad (8)$$

где $\hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(t)$ – оценка обратной ковариационной матрицы помехи.

Классический метод получения оценки обратной КМП состоит в нахождении выборочной или рекурсивной оценки ковариационной матрицы $\hat{\mathbf{R}}_{xx}(t)$ с последующим ее обращением:

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx}(t) = \frac{1}{T_\delta} \mathbf{R}_{xx}(t) - \hat{\mathbf{R}}_{xx}(t), \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_{xx}(t) = \frac{1}{J} \sum_{j=0}^{J-1} \mathbf{x}_j(t) \mathbf{x}_j^H(t),$$

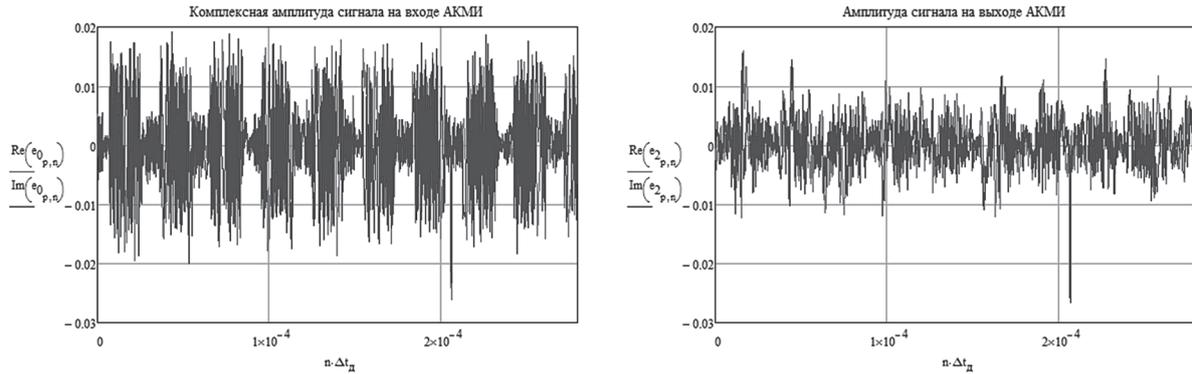


Рис. 6. Синфазная и квадратурная компоненты комплексной амплитуды сигнала в основном канале обработки в зависимости от дальности для фиксированного периода повторения $T_{mn} = 65$

где $\mathbf{x}_j(t)$ – j -е выборочное значение вектора $\mathbf{x}(t)$; J – число выборочных значений вектора $\mathbf{x}(t)$, используемых для расчета оценки; T_Φ – постоянная времени сглаживания оценки $\hat{\mathbf{R}}_{xx}(t)$ в рекурсивной фильтре первого порядка.

Оценка обратной КМП $\hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(t)$, полученной согласно (9), требует повышенной производительности сигнальных процессоров, а также мер по снижению чувствительности оценки к степени обусловленности (отношению максимального и минимального собственных значений) матрицы, что влечет за собой увеличение разрядности и вычислительных затрат сигнального процессора. При плохо обусловленной КМП (отношения максимального и минимального собственных чисел составляет 100 и более) погрешность оценки возрастает, что приводит к снижению отношения сигнал – помеха на выходе АКМИ и уменьшению коэффициента подавления.

Одним из путей преодоления указанных трудностей является построение рекуррентного алгоритма оценки обратной ковариационной матрицы $\mathbf{R}_{xx}^{-1}(t)$, исходя из уравнения:

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(t) = \left(\frac{1}{T_\Phi} \left(\sum_{j=0}^{J-1} \mathbf{x}_j(t) \mathbf{x}_j^H(t) - \hat{\mathbf{R}}_{xx}(t) \right) \right)^{-1}, \quad (10)$$

В дискретной форме уравнение примет вид:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(t_n) = \\ = \left(\hat{\mathbf{R}}_{xx}(t_{n-1}) + \alpha_0 \left(\hat{\mathbf{R}}_{xx}(t_{n-1}) - \sum_{j=0}^{J-1} \mathbf{x}_j(t) \mathbf{x}_j^H(t) \right) \right)^{-1}, \quad (11) \\ \alpha_0 = \frac{\Delta t_d}{T_\Phi}. \end{aligned}$$

где Δt_d – интервал дискретизации входного сигнала (помехи).

Вместо переменной t_n в дальнейшем будем использовать подстановку $t_n \Rightarrow n$.

Используя для оценки обратной КМП тождество Шермана–Моррисона–Вудбери (лемму об обращении матрицы) [10...13]:

$$\begin{aligned} (\mathbf{A} + \mathbf{UCV})^{-1} = \\ = \mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1} \mathbf{U} (\mathbf{C}^{-1} + \mathbf{VA}^{-1} \mathbf{U})^{-1} \mathbf{VA}^{-1}, \quad (12) \end{aligned}$$

где \mathbf{A} , \mathbf{C} – квадратные невырожденные матрицы размерностью $(n \times n)$ и $(k \times k)$ соответственно, а \mathbf{V} , \mathbf{U} – матрицы размерностью $(n \times k)$ и $(k \times n)$ соответственно, можно существенно снизить требования к производительности вычислительных средств, а также решить проблему плохой обусловленности (большого разброса собственных чисел) КМП.

Выполняя подстановку $\mathbf{A} = \mathbf{R}_{xx}(t)$, $\mathbf{U} = \mathbf{x}(t)$, $\mathbf{V} = \mathbf{x}^H(t)$ и $\mathbf{C} = 1$, получим:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(t_n) = \frac{1}{1 - \alpha_0} \left(\hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(t_{n-1}) + \right. \\ \left. + \alpha_0 \frac{\hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(t_{n-1}) \mathbf{x}(t_n) \mathbf{x}^H(t_n) \hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(t_{n-1})}{(1 - \alpha_0) + \alpha_0 \mathbf{x}^H(t_n) \hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(t_{n-1}) \mathbf{x}(t_n)} \right), \quad (13) \end{aligned}$$

В начальный момент времени можно принять

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(0) = \mu_{xx} \mathbf{I} = \frac{1}{\sigma_{xx}^2} \mathbf{I}, \quad \sigma_{xx}^2 = \sum_{j=0}^{N-1} \mathbf{x}_j^H \mathbf{x}_j, \quad (14)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица размером $(n \times n)$; σ_{xx}^2 – мощность помехи на входе; \mathbf{x}_j – вектор сигнальных отсчетов на входе соответствующих отводов адаптивного КИХ-фильтра; $\mathbf{x}_j(t_n) = \mathbf{h}_j^H \mathbf{z}_j$ – выходной сигнал ФОС в j -м канале обработки в момент времени t_n ; $s_0(t_n)$, $\mathbf{z}_j(t_n)$ – сигнал на входе антенных систем основного и дополнительных каналов.

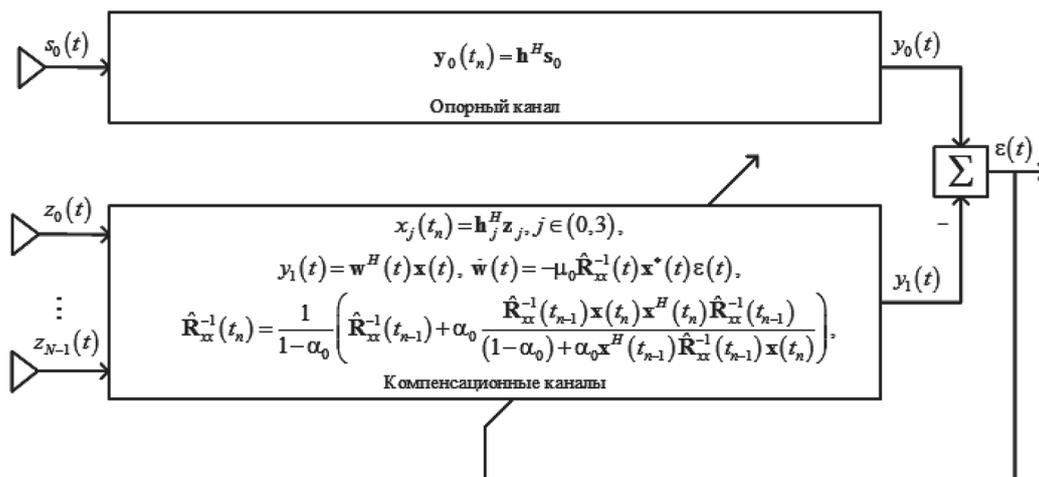


Рис. 7. Упрощенная структурная схема устройства АКМИ с использованием алгоритма последовательной регрессии для оценивания обратной КМП

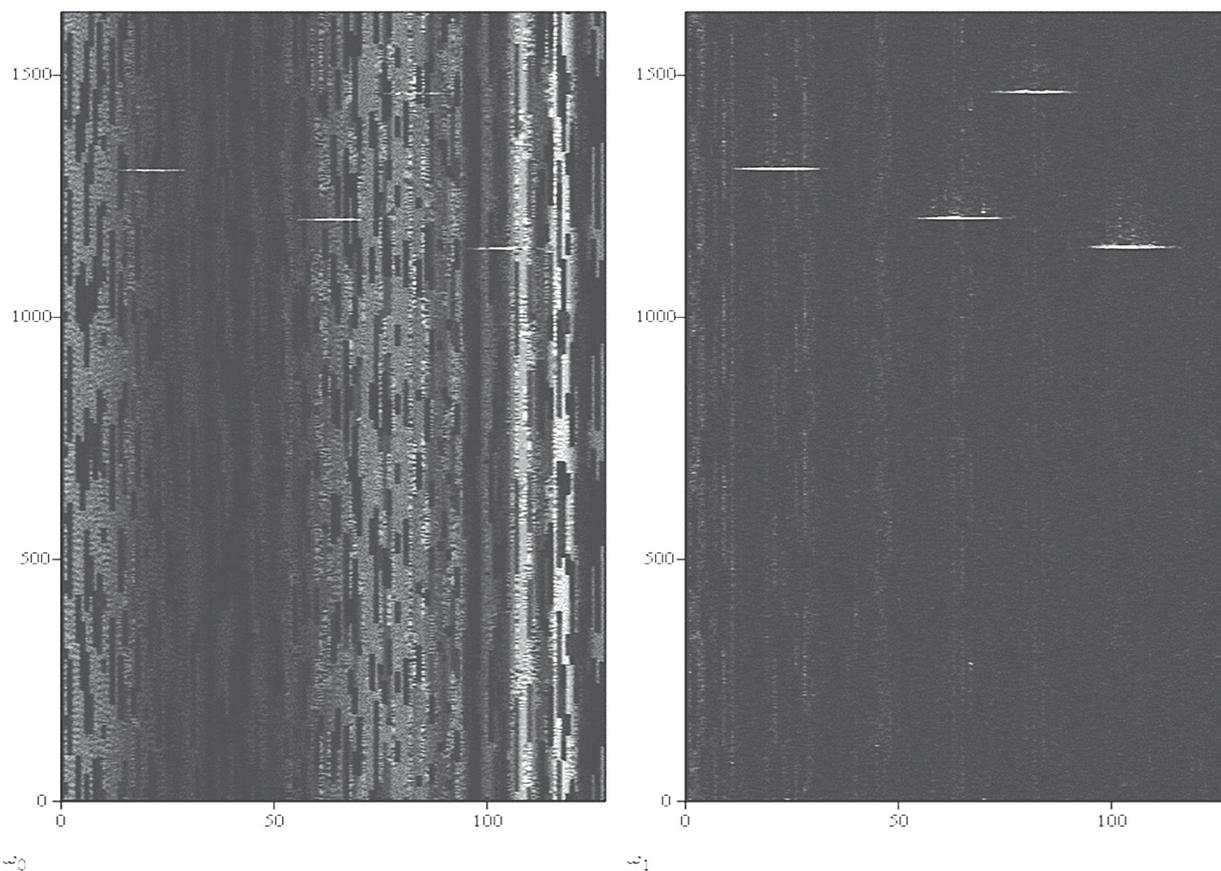


Рис. 8. Экраны индикаторов дальность – угол при выключенном/включенном АКМИ для рекуррентного метода оценки обратной КМП

На рис. 7 представлена упрощенная структурная схема устройства АКМИ с использованием алгоритма ПР для оценивания обратной КМП.

Проблема плохой обусловленности матрицы $\hat{R}_{xx}(n)$ в большинстве практически значимых случаев подавления АШП решается эври-

стическим методом за счет соответствующего выбора величины μ_{xx} , который в данном случае имеет смысл параметра регуляризации. На рис. 8, 9 приведены результаты моделирования работы устройства АКМИ при использовании алгоритма последовательной регрессии при условиях, указанных выше.

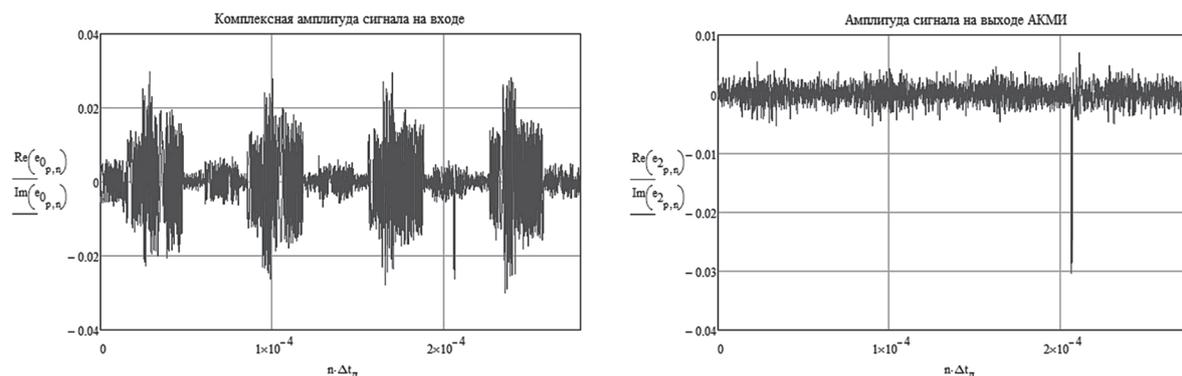


Рис. 9. Синфазная и квадратурная компоненты комплексной амплитуды сигнала в основном канале обработки в зависимости от дальности для фиксированного периода повторения $I_{mn} = 65$

Оценка интегрального коэффициент подавления составляет (12...19) дБ, что на (5...6) дБ превосходит эффективность работы АКМИ, реализованного на основе рекурсивного МНК – алгоритма.

Анализ результатов математического моделирования показывает:

- эффективность компенсации АШП в условиях многолучевого распространения сигналов, а также при неидентичных каналах обработки существенно зависит от используемого алгоритма оценки ВВК;

- для получения максимальной эффективности подавления АШП необходимо использовать методы, основанные на использовании обратной КМП, полученной непосредственным обращением исходной оценки матрицы помех либо путем последовательного приближения (регрессии);

- использовании для расчета ВВК рекуррентной оценки КМП по алгоритму последо-

вательной регрессии позволяет повысить эффективность работы АКМИ на (5...6) дБ, по сравнению с МНК – алгоритмом.

Заключение

Рассмотрен алгоритм расчета вектора весовых коэффициентов с использованием рекуррентной оценки обратной КМП по методу последовательной регрессии. Показаны преимущества данного метода оценивания, по сравнению с классическим алгоритмом рекуррентного оценивания по методу наименьших квадратов в условиях многопутного распространения сигналов и неидеальных трактах обработки сигнала. Данный алгоритм может быть использован в системах обработки радиосвязной, радионавигационной и радиолокационной информации, в том числе – при наличии жестких ограничений, накладываемых на производительность специализированных цифровых сигнальных процессоров.

Литература

1. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. Пер с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с., ил.
2. Адаптивные фильтры. Пер с англ. / Под ред. Коузена К. Ф., Гранта П. М. – М.: Мир, 1988. – 392 с., ил.
3. Пистолькорс А. А., Литвинов О. С. Введение в теорию адаптивных антенн. – М.: Наука, 1991. – 200 с., ил.
4. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с., ил.
5. Адаптивная компенсация помех в каналах связи. / Под ред. Лосева В. И. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
6. Журавлев А. К., Лукошкин А. П., Поддубный С. С. Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках. – Л.: Изд. ЛГУ, 1983. – 240 с., ил.
7. Сверхбольшие интегральные схемы и современная обработка сигналов: Пер. с англ. / Под ред. С Гуна, Х. Уайтхауса, Т. Кайлата. – М.: Радио и связь, 1989. – 472 с., ил.
8. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М.: Радио и связь, 2003. – 200 с.
9. Дж. Голуб, Ч. Ван Лоун. Матричные вычисления. Пер с англ. – М.: Мир, 1999. – 548 с., ил.
10. Haykin S. Adaptive Filter Theory. Prentice – Hall, Inc., NJ, USA. 1996. – 992 p.
11. Woodbury matrix identity [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Woodbury_matrix_identity. – Дата доступа: 05.12.2016.
12. Sherman–Morrison formula [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Sherman–Morrison_formula. – Дата доступа: 05.12.2016.

13. **Quasi-Newton method** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-Newton_method. – Дата доступа: 05.12.2016.

References

1. **Monzingo P. A., Miller T. U.** Adaptive antenna arrays: Introduction in the theory. Translate with English – M: Radio and communication, 1986. – 448 p.
2. **The Adaptive filters.** Translate with English / Under the editorship of Kouena K. F., the Grant of Item M. – M: the World, 1988. – 392 p.
3. **Pistolkors A. A., Litvinov O. S.** Introduction in the theory of adaptive antennas. – M: Science, 1991. – 200 p.
4. **Shirman J. D., Manzhos V. N.** The theory and technics of handling of the radar-tracking information against noises. – M: Radio and communication, 1981. – 416 p.
5. **The Adaptive compensating of noises in communication paths.** / Under the editorship of Losev V. I. – M: Radio and communication, 1988. – 208 p.
6. **Zhuravlev A. K., Lukoshkin A. P., Poddubny S. S.** Signal processing in the adaptive antenna arrays. – L: LSU, 1983. – 240 p.
7. **Very-large scale integrated circuits and the modern signal processing.** Translate with English / Under the editorship of With Guna, H. Uajthausa, T. Kajlata. – M: Radio and communication, 1989. – 472 p.
8. **Ratynsky M. V.** Adaptation and super-resolution in antenna arrays. – M: Radio and communication, 2003. – 200 p.
9. **J. Golub, C. Van Loun.** Matrix calculations. Translate with English. – M: World, 1999. – 548 p.
10. **Haykin S.** Adaptive Filter Theory. Prentice Hall, Inc., NJ, USA. 1996. – 992 p.
11. **Woodbury matrix identity.** [The Electronic resource]. – The Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Woodbury_matrix_identity. – Access Date: 10.12.2016.
12. **Sherman-Morrison formula** [the Electronic resource]. – The Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Sherman-Morrison_formula. – Access Date: 03.12.2016.
13. **Quasi-Newton method** [the Electronic resource]. – The Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-Newton_method. – Access Date: 23.11.2016.

Поступила
05.02.2017

После доработки
22.02.2017

Принята к печати
06.03.2017

Markevich V. E.

INCREASE OF EFFICIENCY OF SUPPRESSION OF THE ACTIVE NOISE JAMMING IN RADAR INTERCEPTION OF AIR TARGETS IN THE REVIEW MODE

The modified algorithm of the adaptive compensating of the active noise jamming, based on usage of the recurrence estimation of inverse covariance matrix of jamming in the course of an self-tuning is considered. The matrix estimation is formed by a method of a serial regression (SRM), a consequence application of a lemma about inverting of a matrix to differential – to the difference equation for a rounded estimation of direct covariance matrix of jamming (CMJ). The single estimation of straight line CMJ is formed as result dyad products of the instant vectors of noises in handling channels. In partial channels the adaptive transversal filters with the self-tuning on value of a signal of an aggregate error are implemented.

In article skeleton diagrams of devices of the compensating implemented by various methods are resulted. Mathematical modeling of operation of the algorithms, implemented by a method of the least squares (criterion of a minimum RMS error) and a method of a serial regression is performed.

Results of mathematical modeling of operation of the device of compensating of active noises jamming in the conditions of the active radio-electronic counteraction at multipath propagation of signals both non-identical amplitude and phase characteristics of channels of handling are resulted. Optimal values of technical parameters of devices of compensating of the active noises jamming providing obtaining of demanded values of coefficient of suppression are given. The comparative analysis of indexes of efficiency of classical and offered algorithms of compensating is made. Advantage of algorithm of compensating of the active noises jamming, using the recurrence estimation of a inverse covariance matrix of jamming is shown.

The algorithm of functioning on the basis of SRM allows to lower essentially requirements to specialized VLSI (FPGA) at implementation is hardware – program complexes for preprocessing of the radar, radio communication and radio – navigation information in the conditions of influence of the active noises jamming in the presence of effects of multipath propagation of signals, in the presence of delay of signals on an antenna system aperture, and also at unremovable technological dispersion amplitude and phase characteristics of the microwave of channels of handling.

Keywords: *the active noise jamming, the adaptive compensating of noises jamming, covariance matrix of jamming, a vector of weight coefficients, a method of a serial regression.*



Маркевич Виталий Эдмундович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ОАО «АЛЕВКУРП», e-mail: mark.vit@tut.by.

Markevich Vitaliy Edmundovich – Candidate of Engineering Sciences, leader scientist, OJSC «ALEVKURP». E-mail: mark.vit@tut.by

MOUSTAFA M. KURDI

HYBRID COMMUNICATION NETWORK OF MOBILE ROBOT AND QUAD-COPTER

Belarusian National Technical University

This paper introduces the design and development of QMRS (Quadcopter Mobile Robotic System). QMRS is a real-time obstacle avoidance capability in Belarus-132N mobile robot with the cooperation of quadcopter Phantom-4. The function of QMRS consists of GPS used by Mobile Robot and image vision and image processing system from both robot and quad-copter and by using effective searching algorithm embedded inside the robot. Having the capacity to navigate accurately is one of the major abilities of a mobile robot to effectively execute a variety of jobs including manipulation, docking, and transportation. To achieve the desired navigation accuracy, mobile robots are typically equipped with on-board sensors to observe persistent features in the environment, to estimate their pose from these observations, and to adjust their motion accordingly. Quadcopter takes off from Mobile Robot, surveys the terrain and transmits the processed Image terrestrial robot. The main objective of research paper is to focus on the full coordination between robot and quadcopter by designing an efficient wireless communication using WIFI. In addition, it identify the method involving the use of vision and image processing system from both robot and quadcopter; analyzing path in real-time and avoiding obstacles based-on the computational algorithm embedded inside the robot. QMRS increases the efficiency and reliability of the whole system especially in robot navigation, image processing and obstacle avoidance due to the help and connection among the different parts of the system.

Keywords: Image processing, Multi-functional Mobile robot, Quad-copter Mobile Robot System, Wireless communication.

Introduction

A robot is an electro-mechanical device designed to accomplish variety of tasks in different aspects of our life. Service robots mainly designed to serve humans in multilateral sectors of education, medical, military, security, emergency cases, entertainment, research, production and agriculture [1].

Unmanned Ground Vehicles (UGV), often called ground robots, which are used both in military and civilian purposes, for the protection and rescue of people in the performance of tasks in life-threatening conditions. Generally, these ground robots used to produce work with explosive ordnance and mine clearance, reconnaissance, search and rescue operations, inspection of buildings and infrastructure, patrolling as well as freight traffic. There are many obstacles (rock, big stones, buildings, mountains, cars and civilians) at outdoor environment which considered as a problem for each mobile robot. To overcome this dilemma, we designed and developed a Quad-copter Mobile Robotic System [2] for agriculture purpose application to help emergency situations (in the liqui-

dation of the threat of explosion, poisoning, fire-fighting and in agriculture for spraying pesticides). The method involves using domestic serial chassis mini-tractor Belarus-123N includes different functions like capturing real world data using digital image processing used to detect its obstacle which is found in its path. To increase the efficiency of mobile robot, we use Phantom-4 Vision Quadcopter to help the mobile in navigation and in direction.

For detecting and avoiding obstacles in their paths, robots should be able to monitor and adapt their surrounding by embedding system to analyze its view and environment [3]. Distinctive cameras from both Mobile Robot and Quad-copter and sensors are used to detect obstacle [4].

For navigation and position, mobile robot has to solve two problems: to determine the current location, and build path of the upcoming journey, free from obstacles.

The first problem is solved by system of visual image positioning from robot and quadcopter. Image with moving robot is analyzed to highlight specific points of their unique ensemble allows

for the repeated analysis of the image, the new range of travel, to reliably determine its location. The problem of detection of obstacles encountered on the way of movement of the robot is very typical. However, robots cope with this task stereo video camera. Depth map construction space in front of the stereo cameras, and accordingly, in the way of movement of the robot, allows the robot to choose the path free of obstacles directions.

This article is concentrating on an international project (Belarus, Kazakhstan and Azerbaijan) to create a multifunctional Quad-copter Mobile Robotic system based on the chassis serial domestic mini-tractors and commercial quad-copter to introduce the concept of controlling such a robot using wireless communication [5].

Belarus 132n mobile robot

During the stage of designing and implementing the mobile robot, we address reliability and simplicity of design of the robotic system. We use platform chassis of tractors "Belarus-132N" [5].

Belarus-132N is an international project (Belarus, Kazakhstan and Azerbaijan) is a four-wheeled small-size unmanned ground terrain vehicle, dimensions 120×120×180 cm (length, width and height respectively), and weighing about 500 kg. The power and traction, originally designed for plowing the soil, it is sufficient to ensure that the movement of the trolley up to 500 kg, or clearing blockages with regular attachments. Physical specifications allow transporting it in simple and small vehicle with a medium wheelbase or a conventional single-axle trailer. General view of the current prototype robotic system with the original attachments designed for firefighting is shown in Fig. 1.

The Belarus-132N Mobile Robot consists of the following systems and components: a video system for driving, positioning and navigation; mechatronic motion control system; on-board computer; telecommunication systems with a remote control unit; staff attachments.



Fig. 1. General View of the Belarus 132N Robotic System

Quadcopter

A quadcopter or quad-rotor is a multi-rotor helicopter that is departed and landed by four rotors. Quadcopter is a small Unmanned Aerial Vehicle (UAV) has significantly increased in recent decades. Quadcopter is one of the most successful vertical take-off and landing vehicle with autonomous flight control and stable hovering capabilities. These features have significantly increased the uses of Quadcopter in all researches in the universities including Electrical, Mechanical, Computer science, and Control system, Real-Time Embedded Systems, Robotics and Navigation. The UAVs are usually used for military, research or civilian operations. The main applications in civilian operations are search and rescue operations, agriculture, fire control, search and rescue operations and inspection of critical areas [6].

A Quad-copter (Quad-rotor helicopter) is a multi-rotor aerial vehicle that is taken-off and lands by four rotors. It has two rotors per axes and each of the axes is aligned with the other where two rotors run clockwise (CW) and two rotors counter-clockwise (CCW) as shown in Fig. 2.

A wireless remote control is used to interact with the flight controller system for changing the flight path. Quad-copter uses the Stable Mode. In this mode, data from accelerometer and gyro sensor is combined to calculate the quadcopter angle. Once the remote control stick is moved to non-idle location, the quadcopter angle is changed accordingly and held at the angle as shown in Fig. 3.

Phantom-4 Vision Quad-copter is a lightweight, multi-functional integrated aircraft and camera with a camera remote-control by DJI VISION APP

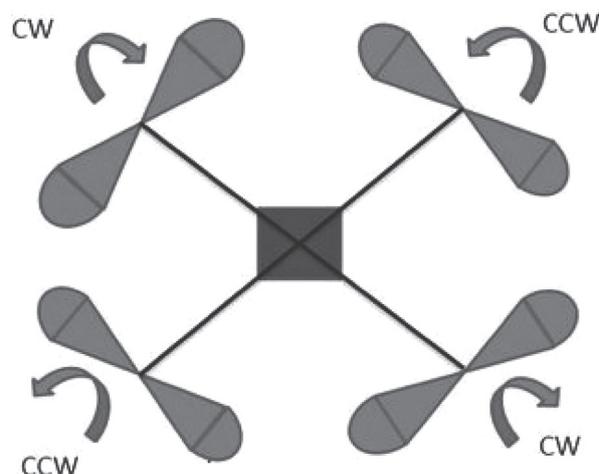


Fig. 2. Rotating of rotors per axis of Quad-copter

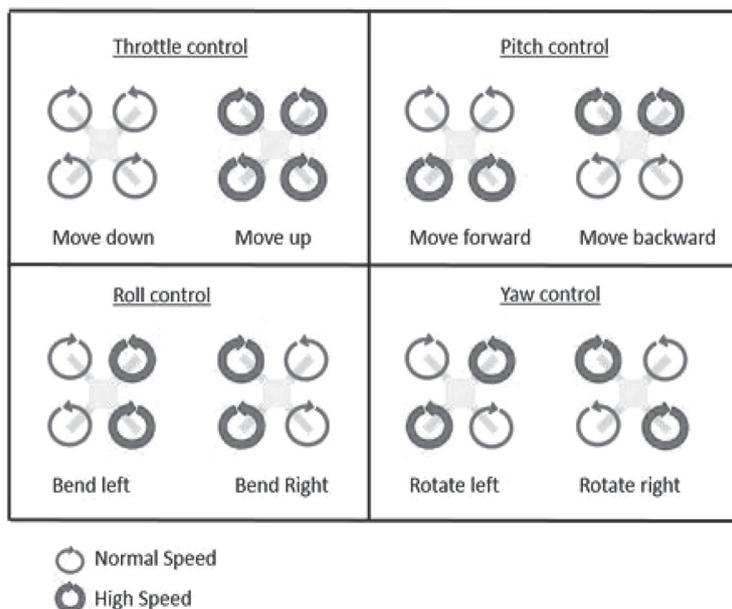


Fig. 3. Different control mode related to the movement of Quad-copter



Fig. 4. General View of Phantom-4 Pro Vision Quad-copter as shown in Fig. 4. Its range extender increases Wi-Fi distance to 5 km. Due to its reliability, Phantom-4 Vision Quad-copter use anti-vibration camera platform with single axis stabilization. It operates at low-voltage protection with virtual radar aircraft locator on mobile device. The image processing uses HD Video Recording (H.264 and H.265) and save the sequence of image in JPEG and DNG picture formats and video in MP4/MOV (AVC/H.264; HEVC/H.265) formats. The specifications of Phantom-4 Vision Quad-copter are shown in the Table.

Specification of Phantom-4 Vision Quad-copter

Weight (Battery & Propellers Included)	1388 g
Diagonal Size (Propellers Excluded)	350 mm
Max Ascent Speed	S-mode: 6 m/s P-mode: 5 m/s
Max Descent Speed	S-mode: 4 m/s P-mode: 3 m/s

Max Speed	S-mode: 45 mph (72 kph) A-mode: 36 mph (58 kph) P-mode: 31 mph (50 kph)
Max Flight Time	Approx. 30 minutes
Satellite Positioning Systems	GPS/GLONASS
Vision System	Forward Vision System Backward Vision System Downward Vision System
Altitude Range	0–33 feet (0 - 10 m)
Lens	FOV 84° 8.8 mm/24 mm (35 mm format equivalent) f/2.8– f/11 auto focus at 1 m –∞
ISO Range	Video: 100–3200 (Auto) 100–6400 (Manual) Photo: 100–3200 (Auto) 100–12800 (Manual)
Photo	JPEG, DNG (RAW), JPEG + DNG
Video	MP4/MOV (AVC/H.264; HEVC/H.265)
Operating Temperature Range	32° to 104 °F (0° to 40 °C)
Capacity (Battery)	5870 mAh
Voltage (Battery)	15.2 V
Battery Type	LiPo 4S
Energy (Battery)	89.2 Wh
Net Weight	468 g
Max Charging Power	100 W
Rated Power (Charger)	100 W
Stabilization	3-axis (pitch, roll, yaw)
Controllable Range	Pitch: –90° to +30°
Max Controllable Angular Speed	Pitch: 90°/s
Angular Control Accuracy	±0.01°

Proposed work

Development and construction of QMRS consists of two parts: Mobile Robot and Quadcopter. The robot is equipped with sensors and cameras used for surveillance operation in outdoor environment area. For surveillance we use image processing concepts. Image processing systems receive data from a variety of cameras and from Quadcopter to determine the distance to an object (obstacle) with the captured output to an external computer [7] to increase efficiency as shown in Fig. 5.

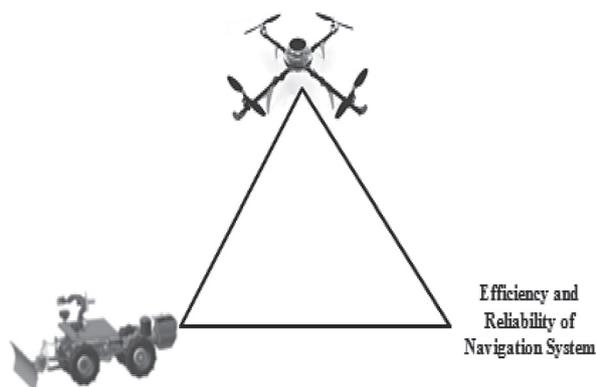


Fig. 5. General view of Quad-copter Mobile Robotics System

Thus, the present project of QMRS has four main levels of computing modules: an external computer (user); on-board computer; multi-channel controller actuators; quadcopter. Each module was necessary to define the specification of functions, commands to initialize them, the service information data and inter-module interfaces [5].

Quadcopter Mobile Robotic System

Automatic detection and tracking of objects observed in a sequence of images is an actual problem, often occurring in the development of navigation systems manned and unmanned aircraft. The Quadcopter Mobile Robotic System consists of Quadcopter and Mobile robot by using image processing to determine the optimal route for mobile robot.

An essential requirement for the developed algorithm is the ability to implement it in the on-board data processing systems, enough effective approach to the automatic detection of objects in the conditions of uncertainty of the location and orientation.

Algorithm of coordination QMRS

The QMRS detects, tracks any moving or stable objects in outdoor environment by using image processing system [8].

Each noticeable object in outdoor environment has following properties:

1. Identifier – a unique number assigned to the new object detection. Number assigned to this object as long as there is no decision on the loss of the object;
2. Coordinates the left edge of the object.
3. Coordinates the top edge of the object.
4. Width.
5. Height
6. Life Time – the number of frames of a video sequence in which the object was present since the first detection
7. Object type.

The composition of the group of robots involved of one main (or base) mobile robot (MBR) with quad-copters/s on board.

The algorithm of solving the problem and specification of functions of robots:

1) MBR has modes of remote, semi-autonomous and autonomous control. On board carries the server on which the loaded geographic information system (GIS) with a digital map of the site location. (Similar map launched on computer operator remote PC). MBR has the GPS – receiver, which determines current coordinates on map; XY rotary video system that allows MBR and computer operator to control the movement and “to look round” during the stop, and other sensors of the current situation.

2) The operator can control the MBR remotely (receiving video data from the board) or in semi-automatic mode, by specifying a point on a digital map, which must arrive, or reference point in the video frame in the direction of which it is necessary to move (or concerning which it is necessary to perform the movement). Data from the GPS-receiver is constantly updated, are linked to a digital map and compared with video analytics.

3) In the simplest case, the quadcopter plays a supporting role by duplicating the rotary video system onboard the MBR. If necessary (or on command from the remote control) the quadcopter takes off and hovers over the robot at a height of 15–20 meters. Video data from quadcopters transmitted to the MBR server wirelessly, which increases visibility and allows operating effective-

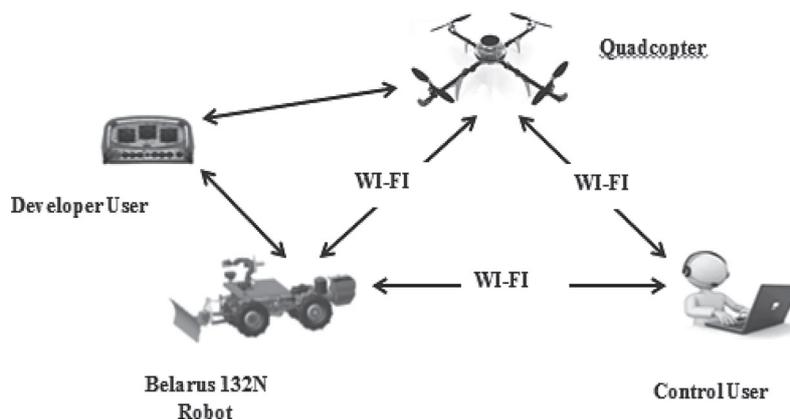


Fig. 6. Communication of different parts of Quad-copter Mobile Robotic System (QMRS)

ly the movement of remote control mode, and also serve for updating the situation on a digital map of the district site area.

4) Mobile robots can be controlled remotely by the operator, remotely or autonomously MBR. Optionally they can be equipped with video cameras, GPS, other sensors, and technological equipment such as manipulator. The simplest examples of the application – the automatic following of the MBR and the management of transmission of wireless communication or transferring the video picture from hard-to-reach places on the MBR to the operator. In more difficult situation - MBR distributed on the territory according to the given program, specified coordinates with elements of autonomous control.

Mobile Robot and Quad-copter Communication System

Communications and communications protocols will play an important role in mobile robot systems able to address real world applications [10] as shown in Fig. 6.

A mobile robot system might employ communications in any or all of the following modes:

- Between a robot and control user to send command tasking from the user to the mobile robot and to receive back from the robot system status and environmental data.

- Between a quadcopter and control user to send command from the user. Quadcopter synchronizes with user control to see what the camera located at quadcopter records. The user use joystick or remote control in order to direct the quadcopter in space.

- Between robot and quad-copter in a hybrid robot system to support both planning and coordi-

nated execution of cooperative behaviors between robots i.e. mobile robot and quadcopter.

- Between robot and the robotic system developer, to eliminate errors and increment implementation productivity and efficiency by providing software downloading and system debugging implements to exercise and validate hardware as well as software.

- Between quad-copter and the robotic system developer, to eliminate errors and increment implementation productivity and efficiency by providing software downloading and system debugging implements to exercise and validate hardware as well as software.

CONCLUSION AND FUTURE WORK

The objective of this project is to design a communication network for hybrid robots (QMRS) to transmit real-time video back to a host computer for monitoring and controlling purpose. The choice of using WI-FI to develop the communication system resulted in a system that is capable of transmitting data within a local wireless network.

Quad-copter Mobile Robotic System is a real-time obstacle avoidance capability in Belarus-132N mobile robot with the cooperation of quadcopter Phantom-4. The article identifies the method that use vision and image processing system from both robot and quadcopter; analyzing path in real-time and avoiding obstacles based-on the computational algorithm embedded inside the robot.

The next step of the future work will involve positioning and navigation of mobile robot in a merging cooperation of quad-copter in an unknown environment by using digital map, GPS, image processing, and sensors.

References

1. G. Bekey, R. Ambrose, V. Kumar, D. Lavery, A. Sanderson, B. Wilcox, J. Yuh, and Y. Zheng. *Robotics: State of the Art and Future Challenges*, Imperial College Press, 2008, pp. 89–92.
2. H. Jaffa, A. Soh, W. Hasan, M. Marhaban, S. Rashid. "A Wireless Flipper Robot Using Interface Free Controller," *IEEE Trans. on Industrial Electronics and Applications*, ISBN 978-1-4673-6322-8, June 2013.
3. C. Karaoguz, T. Rodemann, B. Wrede, C. Goerick. "Learning Information Acquisition for Multitasking Scenarios in Dynamic Environments," *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, vol. 5, No. 1, March 2013.
4. I. Mezei, V. Malbasa, I. Stojmenovic. "Task Assignment in Wireless Sensor and Robot Networks," *IEEE Trans. telecommunication forum*, ISBN 978-1-4673-2984-2, January 2012.
5. A. Dadykin, M. Kurdi, M. Tatur. "Multifunction System of Mobile Robotics," presented at the 3rd International Conference on Electrical, Electronics, Computer Engineering and their Applications, Beirut, April 21–23, 2016.
6. UA-Vision. (2013). "UAV Applications", Portugal, Torres Vedras. [Online]. Available: <http://www.uavision.com/#!applications/c1tsl>.
7. A. Cavoukian. (August 2012). *Privacy and Drones: Unmanned Aerial Vehicles*. Information and Privacy Commissioner, Toronto, Canada, Privacy by Design. [Online]. Available: <http://www.ipc.on.ca/images/Resources/pbd-drones.pdf>
8. T. Neumann, A. Ferrein, S. Kallweit and I. Scholl. "Towards a Mobile Mapping Robot for Underground Mines," in *Proc. of the 2014 PRASA, RobMech and AfLaI Int. Joint Symposium*, Cape Town, South Africa, 2014.
9. I. Sa, P. Corke. "Vertical Infrastructure Inspection Using a Quadcopter and Shared Autonomy Control," *Field and Service Robotics*, Edited by K. Yoshida, S. Tadokoro. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin-Heidelberg, 2014, pp. 219–232.
10. W. Gage. "Network Protocols for Mobile Robot Systems," in *Proc. Space and Naval Warfare Systems Center*, Pittsburgh PA, 1997, pp. 107–118.

Поступила
03.02.2017

После доработки
27.02.2017

Принята к печати
06.03.2017

Moustafa M. Kurdi

КОММУНИКАЦИОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ ГИБРИДА МОБИЛЬНОГО РОБОТА И КВАДРОКОПТЕРА

Белорусский национальный технический университет

В статье рассматривается проектирование и разработка МРКК (мобильного робототехнического комплекса с квадрокоптером). МРКК в составе мобильного робота на базе трактора Беларусь-132N в режиме реального времени обеспечивает возможность преодоления препятствий при взаимодействии с квадрокоптером Фантом-4. Функционально комплекс состоит из GPS, мобильного робота и системы обработки изображений, получаемых как от робота, так и от квадрокоптера, также используется эффективный алгоритм поиска, встроенный внутри робота. Способность точной ориентации является одной из основных возможностей мобильного робота для эффективного выполнения множества рабочих функций, включая различные манипуляции, стыковку и транспортировку. Для достижения требуемой точности навигации, мобильные роботы, как правило, оснащены датчиками на борту для наблюдения непрерывных изменений в окружающей среде, оценки позиции, исходя из этих наблюдений, и корректировки их движения, соответственно. Квадрокоптер взлетает с мобильного робота, обследует местность и передает обработанное изображение наземному роботу. Основной целью исследовательской работы является концентрация внимания на полной координации между роботом и квадрокоптером путем разработки эффективной беспроводной связи с использованием Wi-Fi. Кроме того, определения метода, включающего в себя использование визуального наблюдения и системы обработки изображений от обоих: робота и квадрокоптера, анализируя путь в режиме реального времени и избегая препятствий на основании вычислительного алгоритма, встроенного внутри робота. МРКК повышает эффективность и надежность всей системы, особенно в навигации роботов, обработке изображений и избегании препятствий благодаря системе помощи и связи между различными частями комплекса.

Ключевые слова: обработка изображений, многофункциональный мобильный робот, мобильный робототехнический комплекс с квадрокоптером, система беспроводной связи.



Moustafa M. Kurdi received the BE degree from the Department of Computer Engineering, Beirut Arab University, Lebanon, in 2002, and the MBA degree from the Department of Business Management, Lebanese International University at Lebanon, in 2010. He is presently a Ph.D. candidate at the Electrical and Computer Engineering Department of Belarusian National Technical University, studying control, system analysis and data processing. Currently, he is coordinator of faculty of applied sciences, American University of Technology (Lebanon). He has more than 10 years of academic teaching experience in the fields of computer, software and networking engineering. Mr. Kurdi is member of IEEE. His current research interests include robotics, computer vision, intelligent mobile

robots, navigation system, image watermarking, and design automation.

Email: mostafa.alkirdi@aut.edu.

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

INFORMATION SECURITY

УДК 510.644

¹О. Н. ЖДАНОВ, ²А. В. СОКОЛОВ

МЕТОД СИНТЕЗА БАЗОВЫХ ТРОИЧНЫХ БЕНТ-КВАДРАТОВ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТОРА ТРИАДНОГО СДВИГА

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. академика М. Ф. Решетнева

²Одесский национальный политехнический университет

Применение совершенных алгебраических конструкций в современных системах передачи информации, основанных на технологии кодового разделения каналов MC-CDMA (Multi Code Code Division Multiple Access), а также в криптографии, диктует необходимость их дальнейшего исследования. Одними из наиболее часто используемых совершенных алгебраических конструкций являются двоичные бент-функции, обладающие равномерным спектром амплитуд Уолша-Адамара и, соответственно, максимально удаленные от кодовых слов аффинного кода. Помимо двоичных бент-функций в настоящее время особое внимание уделяется разработке методов синтеза их многозначных аналогов. В частности, одним из эффективных методов синтеза многозначных бент-функций признан метод, основанный на бент-квадратах Агиевича. В настоящей статье разработан регулярный метод синтеза троичных бент-квадратов на основе произвольного спектрального вектора и регулярного оператора триадного сдвига. Проведена классификация спектральных векторов длин $N = 3$ и $N = 9$. На основе проведенной классификации уточнено определение многозначной бент-последовательности с учетом феномена существования многозначных бент-последовательностей для длин, определяющихся нечетной степенью основания. Полученные в статье результаты являются ценными для практического применения: разработки новых кодов постоянной амплитуды для технологии MC-CDMA, криптографических примитивов, алгоритмов сжатия информации, сигнальных конструкций, алгоритмов блочного и поточного шифрования, основанных на перспективных принципах многозначной логики. Разработанный метод синтеза бент-квадратов Агиевича также является базой для дальнейших теоретических исследований: разработки методов перестановок строк и столбцов базовых бент-квадратов, синтеза составных бент-квадратов. Кроме того, полученные данные о спектральной классификации векторов органично ставят задачу синтеза бент-функций длин $N = 3^{2k+1}$, $k \in \mathbb{N}$.

Ключевые слова: бент-функции, многозначная логика, бент-квадрат Агиевича.

Введение

Применение совершенных алгебраических конструкций получает все большее распространение в современных системах передачи и обработки информации. Данное обстоятельство обуславливает внимание исследователей к разработке методов синтеза и изучению свойств классов совершенных двоичных решеток, конструкций полей Галуа, последовательностей де Брейна, бент-последовательностей. Последние обладают большой практической ценностью ввиду их использования в криптографии для построения S-блоков подстановки, а также в технологии кодового разделения каналов MC-CDMA (Multi-Code Code Division Multiple Access) для конструирования кодов постоянной амплитуды (С-кодов), снижающих пик-фактор передаваемых в системе сигналов [1].

Еще одной тенденцией в построении новейших систем передачи информации является переход к использованию принципов многозначной логики с целью повышения помехоустойчивости [2]. Данное обстоятельство диктует необходимость разработки новых методов синтеза многозначных бент-последовательностей, в частности, троичных бент-последовательностей, описанных в [3]. Тем не менее, практика показывает [4], что задача описания классов бент-последовательностей является сложной и многогранной, требует разработки новых видов представления данных структур. Одним из значительных достижений в теории синтеза двоичных бент-последовательностей стали бент-квадраты Агиевича [5, 6], позволившие провести классификацию полного множества бент-функций в соответствии с видом спектра Уолша-Ада-

мара их сегментов. Описание бент-последовательностей с помощью бент-квадратов Агиевича в настоящее время переросло в целое направление теории бент-последовательностей, в частности, разработаны методы их синтеза и размножения [7]. В связи с актуальностью и практической ценностью вопросов исследования многозначных совершенных алгебраических конструкций особый интерес представляет разработка метода синтеза троичных бент-квадратов Агиевича произвольного порядка \sqrt{N} .

Целью настоящей статьи является разработка метода синтеза троичных бент-квадратов Агиевича на основе регулярного оператора триадного сдвига.

Рассмотрим множество корней третьей степени из единицы

$$z_k = e^{j\frac{2p}{3}k}, \quad k \in \{0, 1, 2\}, \quad (1)$$

тогда алфавит рассматриваемых векторов будет состоять из следующих значений

$$z_0 = e^{j\frac{2p}{3} \cdot 0} = 1; \quad z_1 = e^{j\frac{2p}{3}}; \quad z_2 = e^{j\frac{4p}{3}} = z_1^2. \quad (2)$$

Рассмотрим матрицу Виленкина-Крестенсона третьего порядка:

$$V_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & z_1 & z_2 \\ 1 & z_2 & z_1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Построение матриц Виленкина-Крестенсона порядков 3^L , $L \in \mathbb{N}$ может быть выполнено на основе следующего рекуррентного правила

$$V_{3^L} = \begin{bmatrix} V_{3^{L-1}} & V_{3^{L-1}} & V_{3^{L-1}} \\ V_{3^{L-1}} & (V_{3^{L-1}} + 1) \bmod 3 & (V_{3^{L-1}} + 2) \bmod 3 \\ V_{3^{L-1}} & (V_{3^{L-1}} + 2) \bmod 3 & (V_{3^{L-1}} + 1) \bmod 3 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $(V_{3^{L-1}} + 1) \bmod 3$ – матрица, у которой индексы всех элементов увеличены на 1 по модулю 3.

Например, матрица V_9 будет иметь следующий вид

$$V_9 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & z_1 & z_2 & 1 & z_1 & z_2 & 1 & z_1 & z_2 \\ 1 & z_2 & z_1 & 1 & z_2 & z_1 & 1 & z_2 & z_1 \\ \hline 1 & 1 & 1 & z_1 & z_1 & z_1 & z_2 & z_2 & z_2 \\ 1 & z_1 & z_2 & z_1 & z_2 & 1 & z_2 & 1 & z_1 \\ 1 & z_2 & z_1 & z_1 & 1 & z_2 & z_2 & z_1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 & z_2 & z_2 & z_2 & z_1 & z_1 & z_1 \\ 1 & z_1 & z_2 & z_2 & 1 & z_1 & z_1 & z_2 & 1 \\ 1 & z_2 & z_1 & z_2 & z_1 & 1 & z_1 & 1 & z_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

1. Спектральная классификация последовательностей длины $N = 3$

Рассмотрим сначала последовательности длины $N = 3$. Каждый вектор из данного множества может быть представлен в виде

$$A = \{a_1 \quad a_2 \quad a_3\}, \quad a_i = z_k = e^{j\frac{2p}{3}k}, \quad k \in \{0, 1, 2\}. \quad (6)$$

Для данного вектора определено преобразование Виленкина-Крестенсона как новый вектор $S = A \cdot \bar{V}_3$, где \bar{V}_3 – матрица из элементов, комплексно сопряженных к элементам матрицы V_3 , вектор S имеет вид

$$S = \{s_1 \quad s_2 \quad s_3\}, \quad s_i \in \mathbb{Z}. \quad (7)$$

Для каждого вектора A однозначно определен вектор S . Заметим, что обратное неверно, т. е. не для каждого вектора S , $s_i \in \mathbb{Z}$ существует соответствующий ему вектор с координатами $a_i \in \{1, z_1, z_2\}$, такой что справедливо равенство $S = A \cdot \bar{V}_3$.

Определение 1 [3]. Троичная последовательность $H = [h_0, h_1, \dots, h_i, \dots, h_{N-1}]$ длины $N = 3^{2m}$, $m \in \mathbb{N}$, где коэффициенты $h_i \in \pm 1 \{1, z_1, z_2\}$, называется бент-последовательностью в базисе Виленкина-Крестенсона, если она имеет равномерный по модулю спектр Виленкина-Крестенсона, который представим в матричной форме

$$|\Omega_B(\omega)| = |H \cdot \bar{V}_N| = const, \quad \omega = \overline{0, N-1}, \quad (8)$$

где V_N – матрица Виленкина-Крестенсона порядка N .

В общем случае, задача поиска бент-функций является задачей поиска последовательностей, обладающих заданными спектральными свойствами, что требует детального изучения области допустимых значений $s_i \in \mathbb{Z}$, для которых существуют векторы A во временной области, т.е. проведение спектральной классификации полного множества векторов длины $N = 3$.

Спектральную классификацию векторов $\{a_i\}$ длины $N = 9$ будем проводить в соответствии с подходом [8], основанным на наборах абсолютных значений спектральных векторов.

Определение 2. Элементарной структурой спектрального вектора S назовем набор абсолютных значений его спектральных компонент.

Выясним, какие значения могут принимать элементы s_i . Рассмотрим, например, первый

спектральный коэффициент s_1 , который является результатом произведения последовательности A на первый столбец матрицы преобразования Виленкина-Крестенсона. Элементы последовательности A принадлежат алфавиту $\{z_0, z_1, z_2\}$, который представим в алгебраической форме

$$z_0 = 1, z_1 = -0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}, z_2 = -0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (9)$$

Обозначим через $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ количество элементов z_0, z_1, z_2 в последовательности A соответственно. Тогда коэффициент s_1 будет принимать значение

$$s_1 = [\alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2)(-0,5)] + j \left[\alpha_1 \frac{\sqrt{3}}{2} + \alpha_2 \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right], \quad (10)$$

причем

$$\begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 = 3, \\ \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2 \in \{0, 1, 2, 3\}. \end{cases} \quad (11)$$

Полное рассмотрение всех возможных вариантов показало: существует всего 10 троек чисел $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$, удовлетворяющих условию (11)

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_0 & \alpha_1 & \alpha_2 \\ 0 & 0 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 3 & 0 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 3 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Для нахождения возможных значений модуля коэффициента s_1 подставим решения (12) в (10), после чего, найдя модуль комплексного числа, получим:

$$|s_1| = \sqrt{[\alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2)(-0,5)]^2 + \left[\alpha_1 \frac{\sqrt{3}}{2} + \alpha_2 \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right]^2} \in \{0, \sqrt{3}, 3\}. \quad (13)$$

Утверждение. Множество значений (13), и только они, являются возможными значениями всех модулей коэффициентов преобразования Виленкина-Крестенсона векторов длины $N = 3$.

Действительно, выразим значения первого коэффициента преобразования Виленкина-Крестенсона через элементы исходной последовательности

$$s_1 = [a_1 \ a_2 \ a_3] [\overline{z_0} \ \overline{z_0} \ \overline{z_0}]^T = [a_1 \ a_2 \ a_3] [1 \ 1 \ 1]^T = a_1 + a_2 + a_3, \quad a_i \in \{1, z_1, z_2\}. \quad (14)$$

Аналогично, рассмотрим i -й коэффициент преобразования Виленкина-Крестенсона

$$s_i = [a_1 \ a_2 \ a_3] [\overline{z_0} \ \overline{z_0} \ \overline{z_0}]^T = [e^{j\beta_1} \ e^{j\beta_2} \ e^{j\beta_3}] [e^{j\gamma_1} \ e^{j\gamma_2} \ e^{j\gamma_3}]^T = [e^{j(\beta_1+\gamma_1)} \ e^{j(\beta_2+\gamma_2)} \ e^{j(\beta_3+\gamma_3)}]. \quad (15)$$

Так как $\beta_i, \gamma_i \in \{1, z_1, z_2\}$, то для каждого s_i существует последовательность $A' = [a'_1 \ a'_2 \ a'_3]$, преобразование Виленкина-Крестенсона которой имеет коэффициент s_1 , равный заданному s_i .

Проведенные вычисления показывают, что для векторов длины $N = 9$ существуют десять спектральных классов векторов (табл. 1). В табл. 1 для краткости приняты следующие обозначения: $\{9(1), 0(8)\}$. Смысл обозначений данного примера следующий: элемент 9 встречается один раз, элемент 0 повторяется восемь раз.

Т а б л и ц а 1. Классы векторов длины $N = 3$

№	Спектральный класс в виде иррациональностей	Мощность класса	Последовательность-представитель
1	$\{3(1), 0(2)\}$	9	$\{0 \ 0 \ 0\}$
2	$\{\sqrt{3}(3)\}$	18	$\{0 \ 0 \ 1\}$

Анализ данных табл. 1 показывает, что существует всего 18 последовательностей длины $N = 3^1 = 3$, обладающих равномерным по модулю спектром Виленкина-Крестенсона. Данное обстоятельство позволяет обобщить определение бент-последовательности для многозначного случая.

Определение 3. Для матрицы Виленкина-Крестенсона порядка $N = p^k$, p – простое число, $k \in \mathbb{N}$ бент-последовательностью называется последовательность $H = [h_0, h_1, \dots, h_i, \dots, h_{N-1}]$ над алфавитом

$$h_i \in \left\{ e^{j \frac{2\pi}{m} \nu} \right\}, \nu = 0, 1, \dots, m-1,$$

если она имеет равномерный по модулю спектр Виленкина-Крестенсона, который представим в матричной форме

$$|\Omega_B(\omega)| = |H \cdot \overline{V}_N| = const, \quad \omega = \overline{0, N-1}, \quad (16)$$

где V_N – матрица Виленкина-Крестенсона порядка N над алфавитом

$$h_i \in \left\{ e^{j \frac{2\pi}{m} v} \right\}, v = 0, 1, \dots, m-1.$$

Актуальной является задача описания множества значений m , для которых существуют бент-последовательности.

2. Спектральная классификация последовательностей длины $N = 9$

Рассмотрим полное множество троичных векторов длины $N = 9$. Каждый вектор из данного множества может быть представлен в общем виде

$$A = \{a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7 a_8 a_9\}, a_i \in \{1, z_1, z_2\}. \quad (17)$$

Аналогично случаю $N = 3$, определяем преобразование Виленкина-Крестенсона как вектор $S = A \cdot \bar{V}$, где S имеет координаты

$$S = \{s_1 s_2 s_3 s_4 s_5 s_6 s_7 s_8 s_9\}, s_i \in \mathbb{Z}, \quad (18)$$

а V – матрица Виленкина-Крестенсона порядка $N = 9$.

Обозначим через $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ число элементов $1, z_1, z_2$ в последовательности A , соответственно. Тогда коэффициент s_1 будет принимать значение

$$s_1 = [\alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2)(-0,5)] + j \left[\alpha_1 \frac{\sqrt{3}}{2} + a_2 \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right], \quad (19)$$

причем

$$\begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 = 9, \\ \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2 \in \{0, 1, 2, \dots, 9\}. \end{cases} \quad (20)$$

Полное рассмотрение всех вариантов показало: существует всего 55 троек чисел $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$, удовлетворяющих условию (20)

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_0 & \alpha_1 & \alpha_2 \\ 0 & 0 & 9 & 1 & 1 & 7 & 2 & 3 & 4 & 3 & 6 & 0 & 5 & 4 & 0 \\ 0 & 1 & 8 & 1 & 2 & 6 & 2 & 4 & 3 & 4 & 0 & 5 & 6 & 0 & 3 \\ 0 & 2 & 7 & 1 & 3 & 5 & 2 & 5 & 2 & 4 & 1 & 4 & 6 & 1 & 2 \\ 0 & 3 & 6 & 1 & 4 & 4 & 2 & 6 & 1 & 4 & 2 & 3 & 6 & 2 & 1 \\ 0 & 4 & 5 & 1 & 5 & 3 & 2 & 7 & 0 & 4 & 3 & 2 & 6 & 3 & 0 \\ 0 & 5 & 4 & 1 & 6 & 2 & 3 & 0 & 6 & 4 & 4 & 1 & 7 & 0 & 2 \\ 0 & 6 & 3 & 1 & 7 & 1 & 3 & 1 & 5 & 4 & 5 & 0 & 7 & 1 & 1 \\ 0 & 7 & 2 & 1 & 8 & 0 & 3 & 2 & 4 & 5 & 0 & 4 & 7 & 2 & 0 \\ 0 & 8 & 1 & 2 & 0 & 7 & 3 & 3 & 3 & 5 & 1 & 3 & 8 & 0 & 1 \\ 0 & 9 & 0 & 2 & 1 & 6 & 3 & 4 & 2 & 5 & 2 & 2 & 8 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 8 & 2 & 2 & 5 & 3 & 5 & 1 & 5 & 3 & 1 & 9 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Для нахождения возможных значений модуля коэффициента s_1 подставим решения (21) в (19), после чего воспользуемся формулой нахождения модуля комплексного числа

$$\begin{aligned} |s_1| &= \\ &= \sqrt{[\alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2)(-0,5)]^2 + \left[\alpha_1 \frac{\sqrt{3}}{2} + a_2 \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right]^2} \in \\ &\in \{0, \sqrt{3}, 3, \sqrt{12}, \sqrt{21}, \sqrt{27}, 6, \sqrt{39}, \sqrt{57}, 9\}. \end{aligned} \quad (22)$$

Поскольку умножение вектора A на любой другой столбец матрицы Виленкина-Крестенсона $V_{:,j}$, по сути, эквивалентно следующей записи $s_i = (A \cdot V_{:,j}) \cdot V_{:,1} = B \cdot V_{:,1}$, а последовательность $B = A \cdot V_{:,j}$ принадлежит линейному векторному пространству векторов длины над алфавитом $\{1, z_1, z_2\}$, то значения, полученные в (22), будут такими же для всех коэффициентов преобразования Виленкина-Крестенсона $s_i, i = 1, 2, \dots, 9$.

Проведенные исследования показывают, что для векторов длины $N = 9$ существуют десять спектральных классов векторов (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Классы векторов длины $N = 9$

№	Спектральный класс в виде иррациональностей	Мощность класса	Последовательность-представитель
1	{9(1), 0(8)}	27	{0 0 0 0 0 0 0 0 0}
2	{ $\sqrt{57}$ (1), $\sqrt{3}$ (8)}	486	{0 0 0 0 0 0 0 0 1}
3	{ $\sqrt{39}$ (1), $\sqrt{12}$ (2), $\sqrt{3}$ (6)}	1944	{0 0 0 0 0 0 0 1 1}
4	{6(1), 3(5), 0(3)}	1944	{0 0 0 0 0 0 0 1 2}
5	{ $\sqrt{27}$ (3), 0(6)}	216	{0 0 0 0 0 0 1 1 1}
6	{ $\sqrt{27}$ (1), 3(6), 0(2)}	3888	{0 0 0 0 0 1 0 1 1}
7	{ $\sqrt{21}$ (3), $\sqrt{3}$ (6)}	1944	{0 0 0 0 0 0 1 1 2}
8	{ $\sqrt{21}$ (2), $\sqrt{12}$ (2), $\sqrt{3}$ (5)}	5832	{0 0 0 0 0 1 0 1 2}
9	{ $\sqrt{21}$ (1), $\sqrt{12}$ (4), $\sqrt{3}$ (4)}	2916	{0 0 0 0 0 1 1 1 2}
10	{3(9)}	486	{0 0 0 0 1 2 0 2 1}
Σ		19683	

3. Метод синтеза бент-квадратов на основе произвольного набора коэффициентов преобразования Виленкина-Крестенсона

Рассмотрим процесс формирования бент-квадратов порядка $N = 9$ на основе каждого из

приведенных классов спектральных векторов длины $N = 9$ с помощью регулярного оператора триадного сдвига.

Определение 2 [9]. Оператором m -сдвига числа a на величину b называется поразрядное сложение чисел a и b , представленных в m -ичной системе счисления по модулю m .

Хорошо известен оператор диадного сдвига [10], который используется для построения матриц ортогонального преобразования, а также бент-квадратов [7].

В нашем случае, для получения оператора триадного сдвига положим $m = 3$. Например, рассмотрим тривиальную монотонно возрастающую последовательность чисел от 0 до 8, каждый элемент которой представим в виде двухразрядного троичного числа

$$\begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 00 & 01 & 02 & 10 & 11 & 12 & 20 & 21 & 22 \end{matrix}. \quad (23)$$

Последовательно проведем 3-сдвиг данной последовательности на величины от 00_3 до 22_3 , представляя результат в виде последовательности десятичных чисел

$$BS_4 = \begin{bmatrix} 6 & 3 & 0 & 3e^{-\pi/3} & 3e^{2\pi/3} & 0 & 3e^{\pi/3} & 3e^{-2\pi/3} & 0 \\ 3 & 0 & 6 & 3e^{2\pi/3} & 0 & 3e^{-\pi/3} & 3e^{-2\pi/3} & 0 & 3e^{\pi/3} \\ 0 & 6 & 3 & 0 & 3e^{-\pi/3} & 3e^{2\pi/3} & 0 & 3e^{\pi/3} & 3e^{-2\pi/3} \\ 3e^{-\pi/3} & 3e^{2\pi/3} & 0 & 3e^{\pi/3} & 3e^{-2\pi/3} & 0 & 6 & 3 & 0 \\ 3e^{2\pi/3} & 0 & 3e^{-\pi/3} & 3e^{-2\pi/3} & 0 & 3e^{\pi/3} & 3 & 0 & 6 \\ 0 & 3e^{-\pi/3} & 3e^{2\pi/3} & 0 & 3e^{\pi/3} & 3e^{-2\pi/3} & 0 & 6 & 3 \\ 3e^{\pi/3} & 3e^{-2\pi/3} & 0 & 6 & 3 & 0 & 3e^{-\pi/3} & 3e^{2\pi/3} & 0 \\ 3e^{-2\pi/3} & 0 & 3e^{\pi/3} & 3 & 0 & 6 & 3e^{2\pi/3} & 0 & 3e^{-\pi/3} \\ 0 & 3e^{\pi/3} & 3e^{-2\pi/3} & 0 & 6 & 3 & 0 & 3e^{-\pi/3} & 3e^{2\pi/3} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Шаг 3. Выполняя обратное преобразование каждой строки, получаем троичный бент-квадрат во временной области

$$BKT_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Шаг 4. Путем последовательной конкатенации строк временного бент-квадрата (27) получаем бент-функцию длины $N = 81$

сдвиг	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2	0	4	5	3	7	8	6
2	2	0	1	5	3	4	8	6	7
3	3	4	5	6	7	8	0	1	2
4	4	5	3	7	8	6	1	2	0
5	5	3	4	8	6	7	2	0	1
6	6	7	8	0	1	2	3	4	5
7	7	8	6	1	2	0	4	5	3
8	8	6	7	2	0	1	5	3	4

Рассмотрим процесс построения бент-квадрата с помощью конкретных шагов, которые прокомментированы примером на основе последовательностей четвертого класса.

Шаг 1. Выберем временную троичную последовательность и её спектр Виленкина-Крестенсона

$$t_4 = \{0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 2\};$$

$$S_4 = \{6 \ 3 \ 0 \ 3e^{-\pi/3} \ 3e^{2\pi/3} \ 0 \ 3e^{\pi/3} \ 3e^{-2\pi/3} \ 0\}. \quad (25)$$

Шаг 2. Применим к выбранной на Шаге 1 троичной последовательности оператор триадного сдвига (24).

В результате получаем бент-квадрат

$$B = \{0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 2 \ 0 \ 2 \ 1 \ 0 \ 2 \ 1 \ 1 \ 2 \ 0 \ 0 \ 1 \\ 2 \ 0 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 1 \ 0 \ 0 \ 2 \ 1 \ 2 \ 1 \ 0 \ 2 \\ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 2 \ 1 \ 0 \ 2 \ 1 \\ 1 \ 0 \ 2 \ 0 \ 1 \ 2 \ 0 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}. \quad (28)$$

Отметим, что для получения троичного бент-квадрата на основе оператора триадного сдвига может быть использован любой троичный вектор длины $N = 9$, принадлежащий любому спектральному классу.

В отличие от двоичных бент-квадратов Агивича, спектральное представление троичных бент-квадратов является весьма громоздким, поэтому для краткости приведем по одному представителю временных бент-квадратов для каждого класса (табл. 2)

$$\begin{aligned}
BKT_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 2 & 0 & 1 \end{bmatrix}; & BKT_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 2 & 0 & 2 \end{bmatrix}; & BKT_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 2 & 2 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 2 & 1 & 2 \end{bmatrix}; \\
BKT_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}; & BKT_5 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 2 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}; & BKT_6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 1 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 2 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 \end{bmatrix}; \\
BKT_7 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 2 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; & BKT_8 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 2 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}; & BKT_9 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \\
BKT_{10} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{29}$$

Полученные бент-квадраты (29) являются основой для построения классов троичных бент-последовательностей длины $N = 81$, а также для конструирования троичных бент-квадратов большего порядка.

Выводы

1. В статье разработан регулярный метод синтеза троичных бент-квадратов произвольного порядка на основе оператора триадного сдвига. Данный метод позволил получить полное множество базовых бент-квадратов девятого порядка, которые являются основой для построения троичных бент-функций длины $N = 81$.

2. Проведена спектральная классификация полного троичного кода длин $N = 3$ и $N = 9$, в результате чего выделены 10 спектральных подклассов векторов длины $N = 9$, обладающих уникальной элементарной структурой. Спектральная классификация векторов длины $N = 3$ позволила установить, что существуют троичные последовательности длины $N = 3$, обладающие равномерным по модулю спектром Виленкина-Крестенсона.

3. Уточнено определение многозначной бент-последовательности, в котором учтен феномен существования многозначных бент-последовательностей длин $N = p^k$, где p – простое число, $k \in \mathbb{N}$.

Литература

1. **Paterson K. G.** Sequences For OFDM and Multi-code CDMA: two problems in algebraic coding theory // K. G. Paterson. – Sequences and their applications. Seta 2001. Second Int. Conference (Bergen, Norway, May 13–17, 2001). Proc. Berlin: Springer, 2002. – P. 46–71.
2. **Петелин, Ю. В.** Перспективы использования сигнально-кодовых конструкций типа троичных M-последовательностей в спутниковых каналах связи / Ю. В. Петелин, М. А. Ковалев, А. А. Макаров // Информационно-управляющие системы. – 2006. – № 5. – С. 32–35.
3. **Соколов, А. В.** Построение троичных бент-последовательностей / А.В. Соколов, О.Н. Жданов, Н.А. Барабанов // Материалы XIX международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков. – Т. 3. – С. 131–132.
4. **Соколов, А. В.** Генератор псевдослучайных ключевых последовательностей на основе тройственных наборов бент-функций / А.В. Соколов, О.Н. Жданов, Н.А. Барабанов. – Проблемы физики, математики и техники, 2016. – №1(26). – С. 85–91.
5. **Agievich S. V.** «On the representation of bent functions by bent rectangles». – Probabilistic Methods in Discrete Mathematics: Proceedings of the Fifth International Petrozavodsk Conference (Petrozavodsk, June 1–6, 2000). Utrecht, Boston: VSP, 2002, P. 121–135.
6. **Agievich, S. V.** «Bent Rectangles», Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Boolean Functions in Cryptology and Information Security (Moscow, September 8–18, 2007). Amsterdam: IOS Press. – 2008. – p. 3–22.
7. **Соколов, А. В.** Регулярный метод синтеза базовых бент-квадратов произвольного порядка / А. В. Соколов // Наука и техника. – 2016. – № 4. – С. 345 – 352.
8. **Соколов, А. В.** Алгоритм устранения спектральной эквивалентности компонентных булевых функций S-блоков конструкции Нибберг / А.В. Соколов, Н.А. Барабанов // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2015. – Т. 58, N 5. – С. 41–49.
9. **Трахтман, А. М.** Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах / А. М. Трахтман, В. А. Трахтман. – М.: Советское радио, 1975. – 208 с.
10. **Мазурков, М. И.** Быстрые ортогональные преобразования на основе бент-последовательностей / М. И. Мазурков, А. В. Соколов // Информатика та математичні методи в моделюванні. – Одеса, 2014. – № 1. – С.5–13.

References

1. **Paterson K. G.** Sequences For OFDM and Multi-code CDMA: two problems in algebraic coding theory // K. G. Paterson. – Sequences and their applications. Seta 2001. Second Int. Conference (Bergen, Norway, May 13–17, 2001). Proc. Berlin: Springer, 2002. – P. 46–71.
2. **Petelin, V.** The perspectives of usage of signal-code structures such as ternary M-sequences in the satellite communication channels / J. V. Petelin, M. A. Kovalev, A. A. Makarov // Information and Control Systems. – 2006. – № 5. – P. 32–35.
3. **Sokolov, A. V.** Construction of ternary bent sequences / A. V. Sokolov, O. N. Zhdanov, N. A. Barabanov // Proceedings of the XIX International youth forum «Radioelectronics and youth in XXI century», Kharkiv. – V. 3. – P.131–132.
4. **Sokolov, A. V.** Pseudo-random key sequence generator based on triple sets of bent-functions / A. V. Sokolov, O. N. Zhdanov, N. A. Barabanov. – Problems of physics, mathematics and technology, 2016. – №1 (26). – P. 85–91.
5. **Agievich S. V.** «On the representation of bent functions by bent rectangles». – Probabilistic Methods in Discrete Mathematics: Proceedings of the Fifth International Petrozavodsk Conference (Petrozavodsk, June 1–6, 2000). Utrecht, Boston: VSP, 2002, P. 121–135.
6. **Agievich, S. V.** «Bent Rectangles», Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Boolean Functions in Cryptology and Information Security (Moscow, September 8–18, 2007) .Amsterdam: IOS Press. – 2008. – p. 3 – 22.
7. **Sokolov, A. V.** The regular synthesis method of bent-squares of any order / A.V. Sokolov // Science and Technology. – 2016. – № 4. – S. 345 – 352.
8. **Sokolov, A. V.** Algorithm for removing the spectral equivalence of component Boolean functions of Nyberg-design S-boxes / A. V. Sokolov, N. A. Barabanov // Proceedings of the higher educational institutions. Radioelectronics. – 2015. – Т. 58, N 5. – P. 41–49.
9. **Trakhtman, A. M.** Fundamentals of the theory of discrete signals on finite intervals / A. M. Trakhtman, V. A. Trakhtman. – Moscow: Soviet Radio, 1975. – p. 208.
10. **Mazurkov, M. I.** Fast orthogonal transforms based on bent-sequences / M.I. Mazurkov, A. V. Sokolov // Informatics and mathematical methods in simulation. – Odessa, 2014. – №1. – P. 5–13.

Поступила
07.12.2016

После доработки
08.02.2017

Принята к печати
06.03.2017

Zhdanov O. N., Sokolov A. V.

A SYNTHESIS METHOD OF BASIC TERNARY BENT-SQUARES BASED ON THE TRIAD SHIFT OPERATOR

Practical application of advanced algebraic constructions in modern communication systems based on MC-CDMA (Multi Code Code Division Multiple Access) technology and in cryptography necessitates their further research. One of the most commonly used advanced algebraic construction is the binary bent-function having a uniform amplitude spectrum of the Walsh-Hadamard transform and, accordingly, having the maximal distance from the codewords of affine code. In addition to the binary bent-functions researchers are currently focuses on the development of synthesis methods of their many-valued analogues. In particular, one of the most effective methods for the synthesis of many-valued bent-functions is the method based on the Agievich bent-squares. In this paper, we developed a regular synthesis method of the ternary bent-squares on the basis of an arbitrary spectral vector and the regular operator of the triad shift. The classification of spectral vectors of lengths $N = 3$ and $N = 9$ is performed. On the basis of spectral classification more precise definition of many-valued bent-sequences is given, taking into account the existence of the phenomenon of many-valued bent-sequences for the length, determined by odd power of base. The paper results are valuable for practical use: the development of new constant amplitude codes for MC-CDMA technology, cryptographic primitives, data compression algorithms, signal structures, algorithms of block and stream encryption, based on advanced principles of many-valued logic. The developed bent-squares design method is also a basis for further theoretical research: development of methods of the permutation of rows and columns of basic bent-squares and their sign coding, synthesis of composite bent-squares. In addition, the data on the spectral classification of vectors give the task of constructing the synthesis methods of bent-functions of lengths $N = 3^{2k+1}$, $k \in \mathbb{N}$.

Keywords: bent-functions, many-valued logic, Agievich bent-square.



Жданов Олег Николаевич родился 16 апреля 1964 года. В 1986 году окончил Красноярский Государственный Университет. Кандидатская диссертация по специальности «математический анализ» защищена в 1994 году. В настоящее время доцент кафедры безопасности информационных технологий Сибирского Государственного Аэрокосмического университета.

Читаемые лекционные курсы: «Криптографические методы защиты информации» (имеется удостоверение Института Криптографии, Связи и Информатики о соответствующем повышении квалификации), «Теоретико-числовые алгоритмы криптографии», «Теория надежности».

Общее количество публикаций 73, из них 7 – учебные пособия (в соавторстве с учениками).

Сфера научных интересов: системы дифференциальных уравнений в частных производных, являющиеся моделями процессов в механике сплошных сред. Получены точные решения уравнений пластичности плоского напряженного состояния, предложен новый подход к исследованию смешанной задачи для системы уравнений плоского напряженного состояния среды Мизеса, построен алгоритм нахождения решения задачи Коши для системы уравнений, описывающей одномерный поток гранулированного материала.

Еще одной областью научных интересов является защита информации: разработка реализации алгоритмов шифрования данных при передаче по открытому каналу с привлечением к этой работе студентов старших курсов для выполнения ими курсового и дипломного проектирования. Совместно с учениками разработал методику выбора ключевой информации для реализации алгоритмов блочного шифрования. Получено авторское свидетельство (совместно с Чалкиным Т.А.) на программный комплекс, реализующий выбор ключевой информации для шифрования данных по действующему стандарту России.

Два ученика стали лауреатами стипендии губернатора Красноярского края, а один – лауреат стипендии Правительства России и победитель конкурса на лучшую студенческую научную работу.

Награжден Благодарственным Письмом Законодательного Собрания Красноярского края. Награжден нагрудным знаком Министерства Образования и Науки РФ «За развитие научно-исследовательской работы студентов».

Zhdanov Oleg Nikolaevich was born on April 16, 1964. He graduated from Krasnoyarsk State University in 1986. The Ph. D. thesis in mathematical analysis was defended in 1994. At the moment

O. N. Zhdanov is Associate Professor of Informational Technologies subdepartment of Siberian State Space University and associate professor of Algebra and mathematical logic department of Siberian Federal university.

O. N. Zhdanov gives the following lecture courses: «Cryptographic methods of information security» (there is a certificate of Institute of Cryptography, Communication and Information Sciences of the corresponding advanced training), «Number-theoretic algorithms of cryptography», «Reliability theory».

The total number of his publications – 75. Eight of them are study guides.

Together with pupils, he developed a key information choice method for realization of block encryption algorithms. Together with Chalkin T. A. he received the copyright certificate on the program complex realizing the choice of key information for data encryption according to the current standard of Russia.

O. N. Zhanov was awarded by a letter of thanks from Legislative Assembly of Krasnoyarsk Krai, a breastplate of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation «For development of students research activity».



Артем Викторович Соколов родился 15 апреля 1990 года в Одессе, УССР. Получил степень бакалавра (с отличием) по специальности «Системы технической защиты информации» в 2011 году, степень магистра (с отличием) по специальности «Системы технической защиты информации, автоматизация её обработки» в 2013 году и степень кандидата технических наук по специальности «Системы защиты информации» в 2014 году в Одесском национальном политехническом университете, г. Одесса, Украина.

С 2012 по 2014 работал младшим научным сотрудником кафедры Информационной безопасности в Одесском национальном политехническом университете. С 2014 года является старшим преподавателем кафедры Информационной безопасности Одесского национального политехнического университета. Является автором монографии и более 60 научных публикаций. Научные интересы включают в себя методы защиты информации на основе совершенных алгебраических конструкций, методы синтеза алгоритмов шифрования данных и нелинейных S-блоков.

Артем Соколов награжден Золотой медалью за высокие достижения в учебе, Дипломом победителя в конкурсе Магистров, 2013 год; Дипломом победителя Всеукраинского конкурса научно-исследовательских работ «Телекоммуникационные системы и сети», 2012 год; Дипломом за высокие академические и исследовательские достижения, 2010 год.

Artem V. Sokolov was born in Odessa, USSR, in 1990. He received a Bachelor (Hons) degree in systems of technical data protection in 2011, Master (Hons) degree in systems of technical data protection and automation of it's processing in 2013 and Ph. D. degree in data protection systems in 2014 from Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine.

From 2012 to 2014 he was a Junior Researcher of the Data Security department in Odessa National Polytechnic University. Since 2014 he has been a senior lecturer of the Data Security department in Odessa National Polytechnic University. He is the author of a book and more than 60 articles. His research interests include data protection methods based on perfect algebraic constructions, nonlinear S-box synthesis method, and stream encryption algorithms.

A. V. Sokolov awards and honors include: Gold medal for high achievements in education, Hons Diploma of Winner in Master Competition, 2013; winner of «Information and communication networks» Ukrainian competition of research papers, 2012; Diploma for excellent academic and research activities, 2010.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

INFORMATION TECHNOLOGIES IN EDUCATION

Ю. Б. ПОПОВА, С. В. ЯЦЫНОВИЧ

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МИГРАЦИИ КОНТЕНТА ПО СТАНДАРТУ SCORM В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ОБУЧЕНИЕМ

Белорусский национальный технический университет

Применение автоматизированных систем управления обучением увеличивает возможности преподавателя и обучаемого в достижении своих целей в образовательном процессе. Такие системы предоставляют учебный контент, помогают организовать и контролировать обучение, собирают статистику прогресса. Однако при переходе от одной системы обучения к другой возникает проблема миграции контента, ведь все учебные материалы и тесты должны быть либо созданы заново, либо каким-то образом перенесены в новую систему. Перенос контента вручную является весьма трудоемким процессом, поэтому ведущими разработчиками систем обучения был предложен стандарт для организации и хранения контента, названный SCORM (англ., Sharable Content Object Reference Model). Созданный по такому стандарту контент должен мигрировать в системы управления обучением при условии его поддержки этими системами. Стандарт SCORM позволяет создавать учебный контент, не зависящий от системы управления обучением, но свободно встраиваемый в нее. Такой подход позволяет преподавателям разрабатывать уникальные курсы и выставлять их в свободный доступ либо на продажу в сети Интернет для всех заинтересованных лиц, а также использовать учебный контент, созданный лучшими специалистами всего мира для проведения своих занятий. Использование контента по стандарту SCORM накладывает определенные требования на системы обучения, поскольку они не должны искажать учебный материал и правильно взаимодействовать с тестами. Целью данной работы является программная реализация миграции контента по стандарту SCORM из других систем управления обучением в собственную разработку, используемую на кафедре программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем факультета информационных технологий и робототехники Белорусского национального технического университета.

Ключевые слова: SCORM, автоматизированные системы управления обучением, миграция контента, LMS, система управления учебным процессом, SCO-объект, учебный контент.

Введение

В настоящее время существует множество систем управления обучением (англ., Learning Management System, LMS), которые используются в различных сферах деятельности человека. Подробное описание и классификация таких систем приведена в [1]. Следует отметить, что основной проблемой использования систем обучения является сложность миграции контента. Системы разработаны разными производителями с отличающимися требованиями к организации и хранению учебно-методических материалов, тестов, отчетов и т.д. Например, созданные в одной системе тесты вряд ли эффективно могут быть использованы в другой системе без дополнительных трудозатрат. Поэтому для унификации создаваемого контента необходим стандарт, т.е. формат кон-

тента, утвержденный признанным институтом стандартизации или принятый предприятиями отрасли де-факто в качестве образца. При этом основой для взаимодействия различных частей систем обучения должны стать не частные технические решения, определяемые договоренностями между их разработчиками, а открытые интерфейсы, независимые от конкретных аппаратно-программных средств и технологий, регламентируемые общедоступными нормативно-техническими документами. Это, в свою очередь, должно привести к созданию благоприятных условий для интеграции механизмов взаимодействия между компонентами обучающих систем, пользователями и внешними системами.

Попыток создания стандартов для систем обучения было не так уж и много. Первым по-

явился стандарт AICC (англ., Airline Industry CBT (Computer Based Training) Committee). Он был построен на основе обмена текстовых файлов и не в полной мере отражал новые возможности технологий сети Интернет. Для создания следующего стандарта был организован консорциум из всемирно известных компаний таких, как Apple, IBM, Oracle, Sun Microsystems, Microsoft и др. Результатом их работы стал стандарт IMS (англ., Instructional Management Systems), который объединил достижения разработок в дистанционном образовании и специфицировал их в формате XML. Затем на основе стандарта IMS был разработан SCORM (англ., Sharable Content Object Reference Model) для электронного обучения с использованием сетевых технологий. Несмотря на наличие последователя этого стандарта под названием Tin Can API, большинство учебного контента уже создано по модели SCORM, поэтому его применение в системах управления обучением остается крайне актуальным. Реализация программного модуля, входящего в состав разработанной авторами LMS, для миграции учебного контента из других систем обучения является целью данного исследования.

1. Описание стандарта SCORM

Разработчики SCORM сформулировали несколько требований ко всем системам, которые будут разрабатываться в соответствии с данным стандартом [2]:

– доступность – это способность системы определять местонахождение и получать доступ к учебным компонентам из точки удаленного доступа, а также поставлять их другим точкам;

– адаптируемость – это способность адаптировать учебную программу согласно потребностям организаций и индивидуумов;

– эффективность – это способность увеличивать производительность, сокращая время и затраты на доставку инструкции;

– долговечность – это способность соответствовать новым технологиям без дополнительной и дорогостоящей доработки;

– интероперабельность – это способность использовать учебные материалы вне зависимости от платформы, на которой они созданы;

– многократность использования – это способность использовать материалы необходи-

мое количество раз в различных приложениях и системах.

Образовательный контент в SCORM понимается как множество небольших образовательных объектов, собранных в курсы, главы, модули, задания и т. п. Эти единицы содержания разработаны таким образом, что могут быть использованы многократно в разных контекстах. Например, однажды созданный контент по электричеству затем может быть использован в любом курсе физики, когда возникнет необходимость.

Образовательный объект в SCORM – это любой учебный материал, который может быть отображен в веб-браузере (например, тексты, картинки, аудио- и видеофайлы, флэш-ролики, веб-страницы), а также любое их сочетание, предназначенное для образовательных целей и собранное вместе специальным образом. Кроме того, в веб-браузере должна быть реализована и включена поддержка языка JavaScript. Таким образом, стандарт SCORM описывает контейнеры для учебных материалов. Каждый контейнер – это zip-архив, в котором содержатся [3]:

– учебные материалы в виде текстов, doc- или pdf-файлов, html-страниц, аудио и видеофайлов;

– произвольный динамический контент: любые Java-апплеты, флэш-ролики, JavaScript-код и другие объекты, которые могут отображаться внутри браузера. Динамический контент может сообщать LMS информацию об успехах учащегося;

– все учебные материалы структурируются, т.е. разбиваются на уроки или темы;

– указывается описание последовательности прохождения материала. Например, определенный текст нужно предоставить учащемуся только после того, как он ознакомится с другим текстом или пройдет тестирование.

В SCORM-пакеты можно запаковывать учебные курсы целиком или частично (например, пакет может содержать только один тест). SCORM-пакеты для LMS являются «черными ящиками», т. е. при их отображении создается новое окно (или окно внутри окна – iframe), и туда выводится содержимое пакета без его анализа. Одним из следствий такой миграции контента является недостаток, что оформление материала в пакете практически всегда не соответствует оформлению LMS.

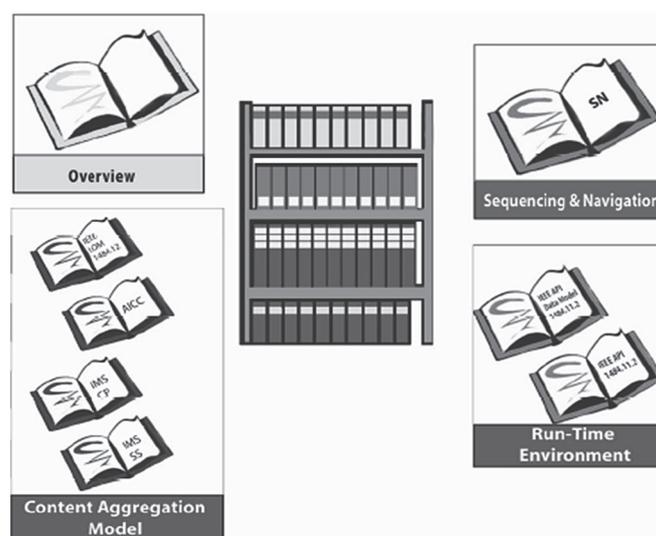


Рис. 1. Визуальное описание стандарта SCORM [2]

Кроме предоставления учебных курсов динамические компоненты пакета могут сообщать системе обобщенные данные о результатах обучения. Например, выполняя задание, студент получил некоторое количество баллов и потратил на выполнение какое-то количество времени. Само содержание задания система при этом узнать не может.

Визуально описание стандарта SCORM можно представить в виде набора книг на книжной полке [2], причем каждая описывает определённую часть стандарта (рис. 1).

Книга SCORM Content Aggregation Model (CAM) описывает компоненты, используемые в образовательных системах, соответствующих стандарту SCORM, способы обмена этими компонентами и их описания для поиска и запуска, а также правила упорядочения компонентов. CAM описывает, каким образом осуществлять хранение содержания курсов, его маркировку, открытие содержания. SCORM CAM также определяет требования к созданию содержания (например, курсов, уроков, модулей и т. д), содержит информацию о применении метаданных к компонентам внутри пакета, применении правил упорядочения и навигации. Некоторые главы CAM взаимосвязаны с главами книги RTE.

Книга SCORM Run-Time Environment (RTE) описывает требования к LMS в части управления окружением времени выполнения т.е. процессом запуска и обменом информацией. В ней описывается, какие методы и свойства должна поддерживать LMS и окружение выполнения.

Эти методы могут использоваться как для обмена данными между LMS и образовательными объектами, так и для управления процессом обучения.

Книга SCORM Sequencing & Navigation (SN) описывает правила и методы для осуществления упорядочения учебного материала (курсов, отдельных уроков, заданий и так далее). Под упорядочением в данном случае понимается расположение этих частей при прохождении курса обучения. Таким образом, в этой книге описывается, как именно должен происходить переход между различными частями курса: по каким правилам, какими действиями может быть инициирован переход, какие формы перехода разрешены, какие нет.

2. Реализация миграции контента по стандарту SCORM

Образовательный объект, разработанный по стандарту SCORM, будем называть SCO-объектом и представим варианты его использования для проектирования программного модуля.

Назначение: для добавления, просмотра и взаимодействия с учебными данными.

Основной поток событий: начинается, когда преподаватель намеревается работать с учебными курсами, содержащими SCO-объекты. Система должна предлагать на выбор одно из возможных действий:

1) Добавление курса:

– система предоставляет специальную форму для загрузки файла;

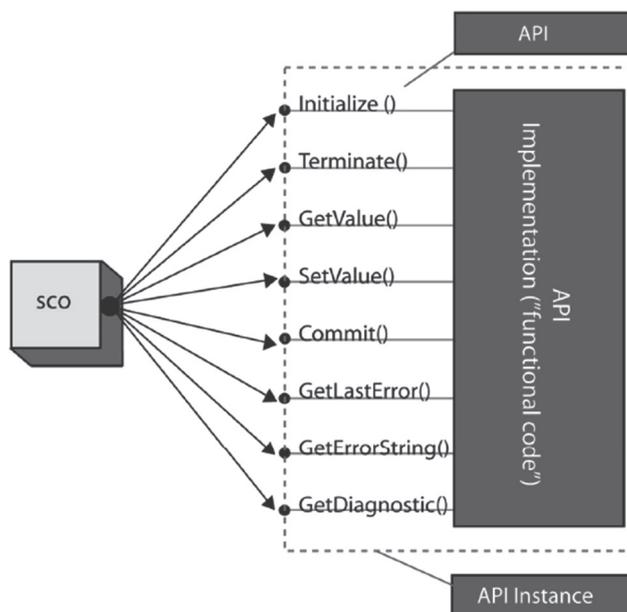


Рис. 2. Структура библиотеки API [2]

– преподаватель выбирает нужный zip-файл;

– система сохраняет файл на сервере после его добавления.

2) Удаление курса:

– преподаватель удаляет необходимый курс;

– система удаляет файлы с сервера.

3) Взаимодействие с курсом:

– пользователь выбирает курс для просмотра;

– система открывает выбранный курс, начинается взаимодействие с сервером;

– пользователь работает с курсом.

Альтернативные потоки:

1) Добавление отменено. Если во время выполнения подчиненного потока «Добавление курса» преподаватель решил не добавлять курс, добавление не производится, и основной поток начинается сначала.

2) Удаление отменено. Если во время выполнения подчиненного потока «Удаление курса» преподаватель решил не удалять курс, удаление не производится, и основной поток начинается сначала.

Предусловия: преподаватель должен войти в систему.

Постусловия: если вариант использования завершится успешно, курс будет добавлен, и пользователь успешно ознакомится с курсом, либо курс будет удален.

Для реализации стандарта были разработаны 4 основные библиотеки: SCORM.RTE,

SCORM.CAM, SCORM.NM и SCORM.API. Назначение RTE, CAM и NM были приведены выше, а структура библиотеки API приведена на рис. 2. В общем случае, SCO-объект – это файл или набор файлов, структурированных определенным образом и включающих в себя средства для взаимодействия с LMS [2]. Каждый SCO-объект должен включать в себя вызов как минимум двух методов SCORM.API – *LMSInitialize()* и *LMSFinish()*, реализованных на языке JavaScript. Поскольку включать реализацию этих методов в каждый файл, из которых состоит SCO-объект, нерационально вследствие дополнительного увеличения размера файла и усложнения отслеживания изменений в реализации методов, то размещать их правильнее в отдельном файле. При таком подходе непосредственно из файлов будет происходить только вызов этих методов.

Перед любыми действиями, связанными с вызовом функций API, происходит поиск API-реализации, предоставляемой той LMS, которая является поставщиком учебного контента. Конкретная реализация API запускается самим браузером, который в данном случае является объектом класса *window* и передается как параметр в функцию *findAPI(win)*. Таким образом, браузер – это родительский объект по отношению к объекту, который содержит реализацию API. Файлы, которые являются реализацией API в конкретной LMS, передаются браузеру от LMS тем же путём, что и сам обу-

```
private void CreateCourseDom()
{
    var d = new DomDocument<Manifest>();

    ADL.SCORM.Namespaces.LoadNamespaceMappings(d);
    pMessages = new UserMessageCollection();
    if (d.Load(this.pMessages, this.pManifestFileInfo))
    {
        this.pManifest = d.DocumentElement;
    }
    else
    {
        throw new ApplicationException("The imsmanifest that was selected could not be loaded.");
    }
}

private void LoadImsManifest(bool createDom, bool createData)
{
    if (createDom)
    {
        this.CreateCourseDom();
    }
}
```

Рис. 3. Загрузка *imsmanifest*

чающий контент – непосредственно в момент соединения браузера клиента с сервером, на котором находится LMS. Далее эта реализация хранится на клиенте в течение всего сеанса работы с LMS.

Несмотря на то, что функций API всего 8, они позволяют выполнять любые действия по управлению обучением. Таким образом, можно отметить, что одно из достижений стандарта SCORM заключается в том, что он предоставляет единую структуру данных, которая применяется для управления обучением, а также предоставляет API, с помощью которого осуществляется управление этой структурой данных и их изменение.

Для взаимодействия системы управления учебным процессом со SCO-объектами необходимо научить ее читать файл манифеста *imsmanifest*. Манифест – это XML-документ, включающий в себя полный список учебного материала пакета. Если пакет предназначен для доставки конечному пользователю, манифест также включает информацию о схеме организации учебного материала и последовательности его предоставления. Манифест может быть создан как для малой части курса, так и для всего курса целиком или даже для набора курсов. Общим правилом является то, что пакет обычно включает в себя главный манифест, в который может быть включено несколько подманифестов. Манифест верхнего уровня обычно описывает пакет в целом, а подманифесты описывают учебный материал на

том уровне, на котором они вложены в главный манифест.

На рис. 3 представлен метод, который используется для загрузки файла манифеста. Как видно из рисунка, происходит создание объекта *pManifest*, который и является прототипом файла манифеста. Далее этот объект анализируется, и происходит создание структуры курса.

3. Апробация разработки

Для проверки корректности работы программного модуля миграции контента по стандарту SCORM из других LMS рассмотрим несколько SCO-объектов. Положительные результаты тестирования должны быть следующими:

- курс корректно загрузился в систему;
- система смогла распознать и открыть загруженный курс;
- система корректно взаимодействует с курсом на уровне API и пользовательского интерфейса.

Апробация разработанного программного модуля проходила со SCO-объектами, свободно размещенными в сети Интернет и предназначенными для изучения магнитных полей, электричества и игры в гольф. Также был апробирован SCO-объект для изучения углов из геометрии, разработанный аспирантом Лиссабонского технического университета Густаво Сантосом [4] в рамках его стажировки в Белорусском национальном техническом университете под руководством одного из авторов данной работы. Эксперимент проводился на базе

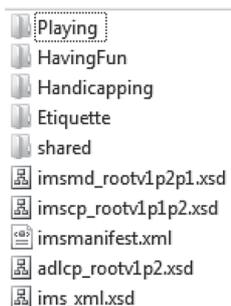


Рис. 4. Содержимое SCO-объекта

Лицея БНТУ в январе 2014 года в 11-х классах с использованием нескольких систем управления обучением. До эксперимента было проведено тестирование начальных знаний учащихся, затем обучение с использованием модели SCORM, затем проведено повторное тестирование с целью проверки знаний после проведения обучения. Разработанный SCO-объект был удачно интегрирован с автоматизированными системами Ilias, Odijoo, Scorm Cloud, а также с LMS ФИТР БНТУ, основная функциональность которой описана в [5].

Рассмотрим, как происходит загрузка SCO-объектов и дальнейшее взаимодействие с системой управления учебным процессом. Для примера воспользуемся SCO-объектом, размещенным на сайте разработчиков SCORM-реше-

ний, предлагаемым в качестве демонстрационной версии и предназначенным для обучения игры в гольф [3]. SCO-объект представляет собой zip-файл с данными курса, содержимое которого представлено на рис. 4.

После загрузки SCO-объекта можно заметить, что весь контент разделен на главы, и после изучения некоторых глав предоставляется возможность пройти тест на усвоение материала (рис. 5, 6). Вывод содержания изучаемого курса удалось реализовать в меню слева, а весь учебный контент расположен в центральном окне LMS ФИТР БНТУ.

Аналогичные действия были проведены со SCO-объектом для изучения электромагнитных явлений из курса физики, предоставленным крупнейшим разработчиком образовательных ресурсов Великобритании [6]. Данный SCO-объект содержит богатый иллюстративный материал для изучения понятий электрического заряда, электрического тока, напряжения, сопротивления, последовательного и параллельного соединения электрической цепи, магнита, магнитного поля и многих других. Также имеется возможность проводить виртуальные опыты для изучения электромагнитных явлений. Например, на рис. 7 представлена воз-

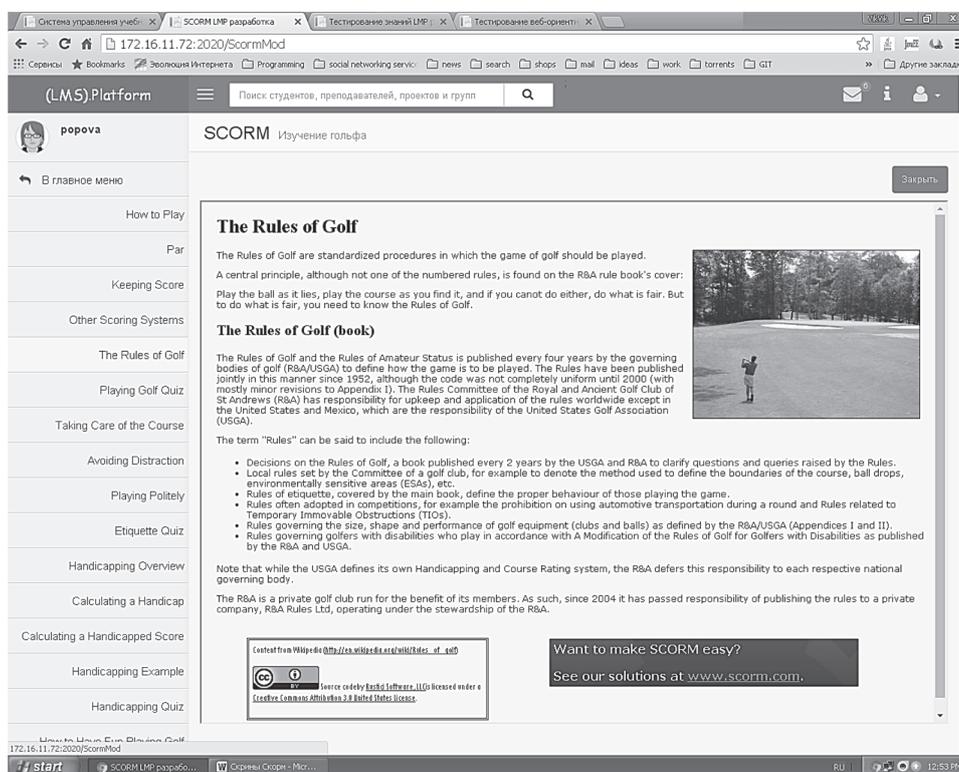


Рис. 5. Учебный контент SCO-объекта для изучения игры в гольф

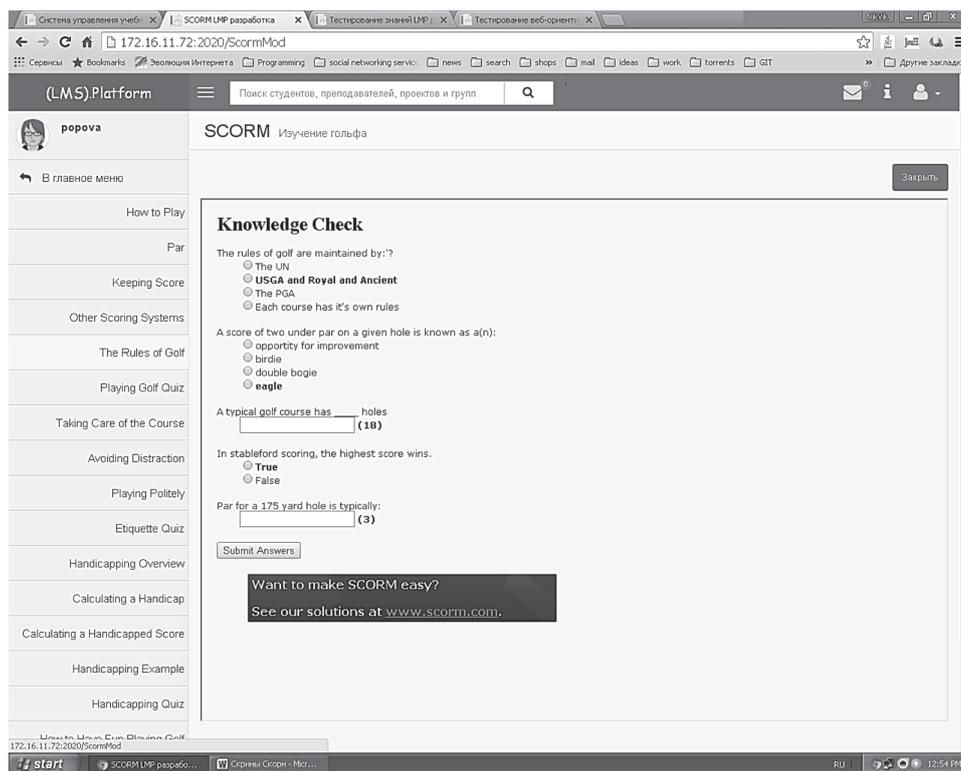


Рис. 6. Прохождение теста из SCO-объекта для изучения игры в гольф

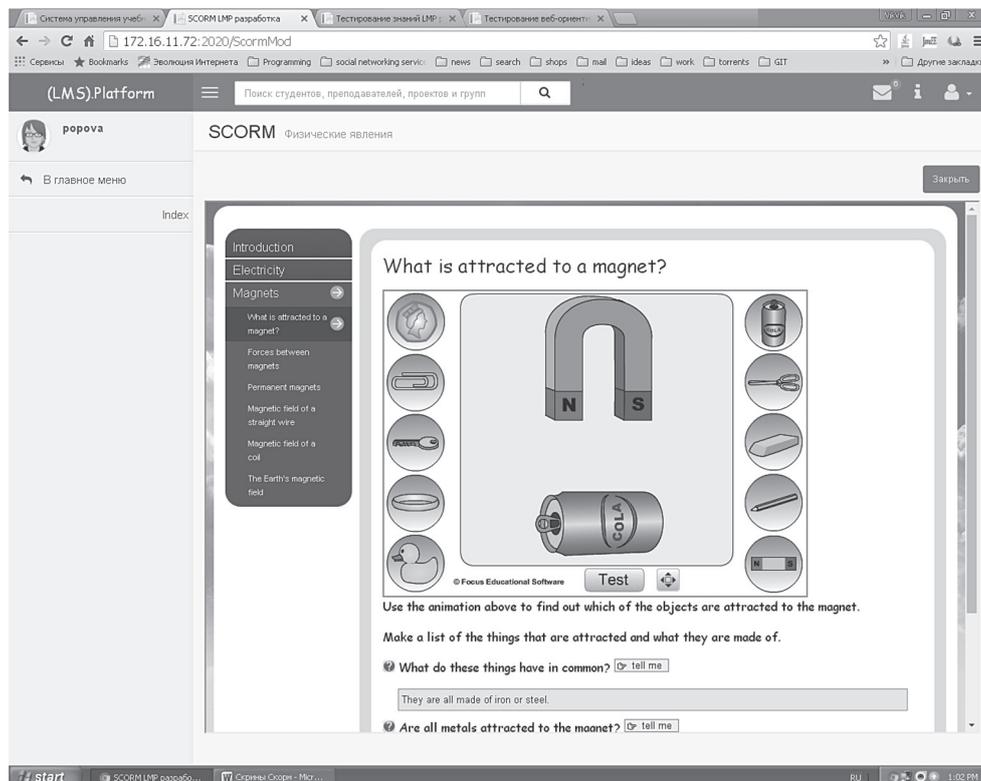


Рис. 7. Результаты апробации SCO-объекта по физике

возможность проверить, какие предметы притягивает магнит. Имеется десять предметов, выбирая по очереди каждый из них и нажимая на кнопку Test, будет происходить визуализация

притяжения, если она возможна. Параллельно в ходе экспериментов формируется список теоретических вопросов по изучаемой теме. Несомненно, такое наглядное изучение курса бу-

дет способствовать большей заинтересованности юных физиков. Весь учебный контент здесь выводится в центральную часть системы управления обучением.

По результатам проведенной апробации можно сделать вывод, что абсолютно разные предметные курсы, созданные в сторонних системах по стандарту SCORM, «безболезненно» открываются и взаимодействуют с системой управления учебным процессом, разработанной авторами и используемой на кафедре программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем факультета информационных технологий и робототехники БНТУ, размещенной в локальной сети по адресу [<http://172.16.11.72:2020>] и доступной во всех корпусах университета, включая лицей БНТУ. Каждый апробированный курс уникален и требует от системы тщательно разработанной инфраструктуры и соответствия стандарту разработки, что удалось реализовать в предлагаемой LMS ФИТР БНТУ.

Заключение

Внедрение модели SCORM в систему управления учебным процессом позволило не только использовать готовые качественные учебные материалы, разработанные лучшими преподавателями всего мира, но и сократить время и ресурсы, затрачиваемые при переносе контента из одной системы в другую. Так при переносе теста, например, из 15 вопросов из одной LMS в другую без использования стандарта SCORM необходимо каждый вопрос создать заново через редактор либо скопировать.

При таком процессе на создание одного вопроса с несколькими вариантами ответа уходит от 1 до 3 мин, и в среднем получается, что для такого теста понадобится около 30 минут. В то же время, при поддержке стандарта SCORM обеими системами затраченное время будет связано только с загрузкой SCO-объекта в требуемую LMS. Это время получается равным около 1 мин. Экономия времени миграции контента только на одном тесте в 30 раз доказывает эффективность предлагаемой разработки.

Перспективным направлением стандартизации электронного обучения является наследник SCORM – модель Tin Can API, основные преимущества которого следующие [7]:

- позволяет учитывать виды учебной активности, недоступные в SCORM: мобильное обучение, игры, симуляции, неформальное обучение, действия обучающихся в реальном мире;
- отслеживает события без связи с сетью Интернет;
- обладает улучшенной безопасностью и аутентификацией.

Несмотря на то, что Tin Can API обладает рядом преимуществ по сравнению со стандартом SCORM, последний списывать со счетов пока рано, поскольку он поддерживает большинство существующих систем управления обучением. Именно этот фактор послужил причиной выбора SCORM для реализации в системе управления обучением. Одновременно авторами ведется разработка по созданию программного модуля для поддержки стандарта Tin Can API.

Литература

1. **Попова, Ю. Б.** Классификация автоматизированных систем управления обучением / Попова, Ю.Б. // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – №2. – С. 51–58.
2. **Стандарт SCORM** [Электронный ресурс]. – Режим доступа – http://cccp.ifmo.ru/scorm/___scorm1.html – Дата доступа: 05.05.2016.
3. **SCORM** решение // Сайт разработчика [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <http://www.scorm.com> – Дата доступа: 22.03.2016.
4. **Santos, G.** Interoperable Intelligent Tutoring Systems as Open Educational Resources / G. Santos, J. Jorge [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6509890> – Дата доступа: 01.02.2017.
5. **Попова, Ю. Б.** Автоматизированная система поддержки учебного процесса в вузе / Ю.Б. Попова, В.В. Яцынович // Информатизация образования – 2010: педагогические аспекты создания информационно-образовательной среды: материалы междунар. науч. конф., 27–30 окт. 2010 г. – Минск: БГУ, 2010. – С. 400–404.
6. **Ресурсы** обучающей платформы [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://www.focuseducational.com/html/vle-learning-platform-scorm.php> – Дата доступа: 01.02.2017.
7. **What is the Tin Can API** [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://tincanapi.com/overview/> – Дата доступа: 01.02.2017.

References

1. **Popova, Ju. B.** Klassifikacija avtomatizirovannyh sistem upravlenija obucheniem / Popova, Ju.B. // Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika. – 2016. – №2. – S. 51–58.
2. **Standart SCORM** [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa – http://cccp.ifmo.ru/scorm/___scorm1.html – Data dostupa: 05.05.2016.
3. **SCORM reshenie** // Sajt razrabotchika [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa – <http://www.scorm.com> – Data dostupa: 22.03.2016.
4. **Santos, G.** Interoperable Intelligent Tutoring Systems as Open Educational Resources / G. Santos, J. Jorge [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa – <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6509890> – Data dostupa: 01.02.2017.
5. **Popova, Ju. B.** Avtomatizirovannaja sistema podderzhki uchebnogo processa v vuze / Ju.B. Popova, V.V. Jacynovich // Informatizacija obrazovanija – 2010: pedagogicheskie aspekty sozdanija informacionno-obrazovatel'noj sredy: materialy mezhdunar. nauch. konf., 27–30 okt. 2010 g. – Minsk: BGU, 2010. – С. 400–404.
6. **Resursy obuchajustchej platformy** [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa – <https://www.focuseducational.com/html/vle-learning-platform-scorm.php> – Data dostupa: 01.02.2017.
7. **What is the Tin Can API** [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://tincanapi.com/overview/> – Дата доступа: 01.02.2017.

Поступила
17.02.2017

После доработки
01.03.2017

Принята к печати
06.03.2017

Y.B. Popova, S.V. Yatsynovich

SOFTWARE IMPLEMENTATION FOR SCORM CONTENT MIGRATION IN THE LEARNING MANAGEMENT SYSTEM

Belarusian National Technical University

Using of learning management systems increases the possibility of teachers and students in achieving their goals in education. Such systems provide learning content, help to organize and to monitor training progress, help to collect statistics. However, the transition from one LMS to another there is a problem of content migration, because all training materials and tests should either be recreated, or somehow be migrated to the new system. Content migration by hand is a very time-consuming process, so the leading developers of the learning management systems developed a standard for the organization and storage of content, called SCORM (Eng., Sharable Content Object Reference Model). Created by this standard, the content must migrate to the learning management system provided its support for these systems. SCORM standard allows you to create training content that is not dependent on the learning management system, but the loosely embedded in it. This approach enables teachers to develop unique courses and put them free available or for sale in the Internet for all interested persons, and to use educational content created by the best specialists around the world to carry out their activities. The content on the SCORM standard imposes certain requirements on the learning management systems, as they do not distort the training content and properly interact with the tests. The aim of this article is a software implementation of a content migration by SCORM standard from other learning management systems in its own development used at the Software Department of the Faculty of Information Technology and Robotics of the Belarusian National Technical University.

Keywords: SCORM, learning management systems, content migration, the LMS, e-learning, SCO-object, training content.

Работа выполнялась в рамках научно-исследовательской работы ГБ 11-254 «Математическое и программное обеспечение систем обработки информации в образовании и автоматизированных систем управления техническими объектами».



Yuliya B. Popova, PhD, Associate Professor at the Software Department of the Belarusian National Technical University. Her research interests include methods and algorithms of optimization in technical systems, engineering of adaptive learning systems and learning management systems (LMS), modeling of student knowledge, software testing and quality assurance.

Email: julia_popova@mail.ru

Попова Юлия Борисовна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем БНТУ. Ее научные интересы связаны с методами и алгоритмами оптимизации технических систем, разработкой адаптивных обуча-

ющих систем, автоматизированных систем управления учебным процессом, моделированием знаний, а также с вопросами тестирования и качества программного обеспечения.



Siarhei Yatsynovich received the graduate degree in software engineering from the Belarusian National Technical University in 2014 and the Master's degree in system analysis and control of information processing in 2015. He is currently working on PhD degree program. His research interests are related to the methods of decision-making, neural networks, learning management systems and the development of web applications.

Email: hawkrai@yandex.ru

Яцынович Сергей Викторович закончил Белорусский национальный технический университет по специальности «Программное обеспечение информационных технологий» в 2014 году и магистратуру по специальности «Системный анализ, управление и обработка информации» в 2015 году. В настоящее время является аспирантом кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем БНТУ. Его научные интересы связаны с методами принятия решений, нейронными сетями, системами управления обучением, а также с разработкой веб-приложений.