

2(45)/2010

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Учредитель
ОАО «Издательство «Политехника»»

Главный редактор
М. Б. Сергеев,
доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора
Г. Ф. Мощенко

Редакционный совет:
Председатель А. А. Оводенко,
доктор технических наук, профессор
В. Н. Васильев,
доктор технических наук, профессор
В. Н. Козлов,
доктор технических наук, профессор
Ю. Ф. Подоплекин,
доктор технических наук, профессор
Д. В. Пузанков,
доктор технических наук, профессор
В. В. Симаков,
доктор технических наук, профессор
А. Л. Фрадков,
доктор технических наук, профессор
Л. И. Чубраева,
доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РАН
Р. М. Юсупов,
доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РАН

Редакционная коллегия:
В. Г. Анисимов,
доктор технических наук, профессор
Е. А. Крук,
доктор технических наук, профессор
В. Ф. Мелехин,
доктор технических наук, профессор
А. В. Смирнов,
доктор технических наук, профессор
В. И. Хищенко,
доктор технических наук, профессор
А. А. Шалыто,
доктор технических наук, профессор
А. П. Шепета,
доктор технических наук, профессор
З. М. Юлдашев,
доктор технических наук, профессор

Редактор: А. Г. Ларионова
Корректор: Т. В. Звертановская
Дизайн: А. Н. Колешко, М. Л. Черненко
Компьютерная верстка: С. В. Барашкова
Ответственный секретарь: О. В. Муравцова

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Тел.: (812) 494-70-44
Факс: (812) 494-70-18
E-mail: 80x@mail.ru
Сайт: www.i-us.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогам: «Роспечать»: № 48060, № 15385; «Пресса России»: № 42476.

© Коллектив авторов, 2010

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Гололобов Л. И. Закономерность и свойства совместной обработки и передачи данных операторами и техническими средствами 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Яковлев С. А., Суконщиков А. А. Обобщенная модель системы ситуационного интеллектуально-агентного моделирования 9
Васильевский А. С., Лапшин К. В. Темпоральные немонотонные логические системы в задачах моделирования систем управления сложными динамическими объектами 15
Сесин А. Е., Шепета Д. А. Математическая модель эхо-сигналов морской поверхности, наблюдаемых бортовыми локаторами летательных аппаратов 21
Аль-Джунейди Баджис зйяд, Лячек Ю. Т. Программная параметрическая модель безрезьбовых отверстий 26

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Новиков Ф. А., Тихонова У. Н. Автоматный метод определения проблемно-ориентированных языков (Часть 2) 31

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Григорьян А. К., Аветисова Н. Г. Методы внедрения цифровых водяных знаков в потоковое видео. Обзор 38

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

Акимцев В. В., Мещерин А. Н. Показатели качества разрешения радиолокационных сигналов 46
Кордеро Л. Шумовая температура антенного окна 52

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Автоматизированное проектирование устройств функционального диагностирования 55

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Сольнищев Р. И., Тревгода М. А. Алгоритмизация начальных этапов процесса проектирования замкнутой системы управления «Природа-техногеника» 61

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Босов Д. Б. Управление интеграцией инновационных проектов в предметную область 66

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Кублановский В. Б., Кошелев С. В. Математические модели и алгоритмы сглаживания входных сигналов бортовых автоматизированных систем контроля 71
Голубков В. А., Голубков А. В. Моделирование сил, вынуждающих вибрацию в опорах качения 75

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Памяти Ероша Игоря Львовича 78
Памяти Стогова Генриха Владимировича 79

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

80

АННОТАЦИИ

84

ЛР № 010292 от 18.08.98.

Сдано в набор 05.03.10. Подписано в печать 19.04.10. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,2. Уч.-изд. л. 12,8. Тираж 1000 экз. Заказ 174.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП. 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП. 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

УДК 658.310.11

ЗАКОНОМЕРНОСТЬ И СВОЙСТВА СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ОПЕРАТОРАМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

Л. И. Гололобов,

канд. техн. наук, доцент

Военно-морской институт радиозлектроники им. А. С. Попова

Определены мера объема и объект совместной обработки и передачи данных для моделирования деятельности и функционирования технических средств. Раскрыты закономерность и свойства совместной обработки и передачи данных операторами и техникой.

Ключевые слова — операторы, технические средства, объект совместной обработки и передачи данных, производительность.

Исследование и разработка автоматизированных систем управления основываются на двух научных подходах. В одном из них моделируется и исследуется деятельность оператора для обеспечения оптимальных условий работы на технике [1] в общем цикле функционирования системы «человек—техника». В другом подходе акцент делается на моделирование и исследование технических средств [2, 3] в целях повышения их производительности с учетом требований обеспечения деятельности. Разработанные в рамках каждой теории модели воспроизводят сложные процессы деятельности и функционирования технических средств в определенном диапазоне условий, требований и локальных критериев. Причем одна группа фактов объясняется одной теорией, а другая — другой. Необходимо также отметить, что подход, основанный на выделении подсистем «человек» и «техника», усиливает стремление проигнорировать факты одной теории в рамках другой и приводит к недостаточной проработке математических моделей подсистем, порождает многочисленные и трудноразрешимые проблемы. В то же время деятельность человека и функционирование техники настолько взаимосвязаны, что их моделирование по отдельности на уровне подсистем «человек» и «техника» не позволяет в полной мере исследовать процесс совместной обработки и передачи данных оператором и техническими средствами и выявить закономерности этого процесса.

Сдерживающим фактором для исследования деятельности и функционирования технических

средств как целостного процесса обработки и передачи данных является проблема нагрузки. В работах [2, 3] подчеркивается, что практически не существует исследования по оценке производительности, для которого не встает вопрос о нагрузке. Нагрузка для вычислительных систем [2] и компьютерных сетей [3] определена как совокупность всей входной информации (программ, данных, команд), поступающей в систему извне за определенный период времени. Из данного определения следует, что нагрузка характеризуется объемом и временем. Д. Менаске и В. Алмейда [3], определяя нагрузку для компьютерных сетей, указывают, что распределенное окружение характеризуется сложными и разнообразными нагрузками. Они считают, что на определенном промежутке времени нагрузка на клиентский компьютер состоит из команд и «щелчков», отправляемых пользователем, и ответов серверов на пользовательские запросы. С точки зрения Web-сервера, нагрузка состоит из всех запросов пользователя, поступающих на его вход. Например, в Web на уровне сервера базы данных нагрузка — это совокупность всех транзакций (т. е. *http*-запросов на поиск и обновление), получаемых от клиентов и обрабатываемых сервером в течение определенного интервала времени. Нагрузку на сеть Д. Менаске и В. Алмейда представляют через такие параметры трафика, как распределение размеров пакетов и промежутков времени между пакетами.

В зависимости от уровня ресурсов, на котором анализируется их производительность, исполь-

зуются различные меры объема. Наиболее распространенными мерами объема, которые использовались ранее или используются ныне, считаются шаг задания, программа, процесс, сообщение, взаимодействие (обмен сообщениями), транзакция, сценарий, команда, пакет в сетях с коммутацией пакетов и т. п. В работе [2] отмечается, что ни одна из этих мер объема данных не обладает независимостью от самой нагрузки и системы. Эти два свойства необходимы, чтобы установить некую меру объема данных в качестве универсальной.

В то же время вполне очевидно, что каждая из перечисленных мер объема (команда, программа, транзакция, *http*-запрос, пакет и т. п.) состоит из символов для оператора и байтов для технических средств, которые обрабатываются человеком и вычислительной системой и передаются в сетях. Учитывая сказанное, для моделирования совместной обработки и передачи данных предлагается на уровне оператора и технических средств за минимальную меру объема, нагрузку, единицу информации и объект совместной обработки и передачи данных взять символ, а время обработки и передачи символов — за характеристику функционирования человека и техники. На уровне оператора и техники обрабатываются символы, представленные графическим пространством имен, которое инкапсулирует основные графические функции. В терминах Microsoft эти функции известны как *GDI+* (*Graphical Device Interface*). Класс *Graphics* является фундаментальным для *GDI+*, так как определяет графическую поверхность, на которой отображаются обрабатываемые данные, и действует как посредник между человеком и техникой, объединяя трудовой процесс и процесс функционирования техники в одно целое. Обработке оператором каждого клавиатурного и дисплейного символа соответствует машинная процедура из сотен и тысяч и большего числа символов (байтов), составляющих программы и данные. Например, Web-страница, запрошенная оператором при обращении к Web-серверу, состоит из программного кода и данных.

Опишем в формализованном виде целостный процесс совместной обработки и передачи данных в системе «человек—техника» (рис. 1). К тех-



■ Рис. 1. Совместная обработка и передача данных операторами и техническими средствами

ническим средствам относятся отдельные ЭВМ, одна или несколько компьютерных сетей. В системе *i*-й оператор взаимодействует с *j*-м оператором, $i, j = 1, 2, \dots, l$. Суммарные временные затраты *i*-го оператора и используемых им технических средств равны

$$T_i = (T_{i1} + T_{i2} + \dots + T_{ij} + \dots + T_{il}) + F_i$$

$$\text{или } T_i = \sum_{j=1}^l T_{ij} + F_i, \quad (1)$$

где T_{ij} — временные затраты технических средств на взаимодействие *i*-го с *j*-м оператором; F_i — временные затраты *i*-го оператора; l — число включенных рабочих станций (число операторов может быть меньше или равно l). Если $i = j$ и $T_{ij} = 0$, то *i*-й оператор не работает, но *i*-я рабочая станция включена.

Если $i = j$ и $T_{ij} \neq 0$, имеет место индивидуальная работа *i*-го оператора. Для случая $i \neq j$ и $T_{ij} \neq 0$ *i*-й оператор взаимодействует с *j*-м оператором (групповая работа). Временные затраты технических средств на взаимодействие *i*-го оператора с *j*-м оператором описываются квадратной матрицей временных затрат $|T_{ij}|$. Введем в (1) коэффициент использования технических средств a_{ij} в процессе взаимодействия *i*-го с *j*-м оператором, $a_{ij} = T_{ij}/T_j$. После подстановки в (1) $T_{ij} = a_{ij}T_j$ система уравнений (1) принимает вид

$$T_i = \sum_{j=1}^l a_{ij}T_j + F. \quad (2)$$

Система линейных уравнений (2) в матричном виде

$$\mathbf{T} = \mathbf{AT} + \mathbf{F} \quad (3)$$

или

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_i \\ \vdots \\ T_l \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{1l} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2l} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{il} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{l1} & a_{l2} & \dots & a_{lj} & \dots & a_{ll} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_l \end{pmatrix}.$$

Если в матричном уравнении (3) неотрицательная квадратная матрица \mathbf{A} невырожденная, то для любого положительного вектора \mathbf{F} имеет место отношение

$$\mathbf{T} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{F}, \quad (4)$$

где \mathbf{A} — квадратная матрица коэффициентов использования (загруженности) ресурсов технических средств; \mathbf{I} — единичная матрица размерностью $l \times l$;

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix};$$

$(I - A)$ — матрица коэффициентов использования (загруженности) трудовых ресурсов.

Производительность систем обработки и передачи данных характеризуется продуктивностью (объемом информации, обрабатываемой в единицу времени), реактивностью (временем между предъявлением системе входных данных и появлением соответствующей выходной информации) и степенью использования ресурсов. В моделях (3) и (4) установлена связь между реактивностью системы и использованием ресурсов. В (3) и (4) присутствуют такие показатели производительности, как время отклика T системы, время отклика F операторов и коэффициенты использования трудовых $(I - A)$ и технических (A) ресурсов. Отношение (4) описывает закономерность совместной обработки и передачи данных человеком и техническими средствами в виде зависимости между временными затратами системы (T) , человека (F) и используемыми трудовыми $(I - A)$ и техническими (A) ресурсами. На основании (4) раскроем закономерность в процессе совместной обработки и передачи данных и определим место (3) в этом процессе. С этой целью выполним некоторые преобразования для (4). Так как для матриц $(I - A)$ и $(I - A)^{-1}$ существует равенство $(I - A)(I - A)^{-1} = I$, то $F = (I - A)T$. Для $A = 0$ имеем $T = F$. Это значит, что все действия по обработке и передаче данных выполняет человек. Технические средства не используются. Если $F = 0$, то имеет место $(I - A)T = 0$. Так как временные затраты F операторов равны нулю, то очевидно, загруженность трудовых ресурсов $(I - A) = 0$. Это значит $A = I$ и $T = T$, что соответствует автоматическому режиму обработки и передачи данных без участия человека. Наконец, если $F \neq 0$ и $A \neq 0$, то $T = AT + F$, т. е. выполняется автоматизированная обработка и передача данных. Таким образом, решение (4) уравнения (3) представляет все режимы обработки и передачи данных (табл. 1) операторами и техническими средствами. Следовательно, (3) охватывает ручной, автоматизированный и автоматический режимы обработки и передачи данных. Выявленная закономерность позволяет исследовать деятельность человека и функционирование техники в процессе обработки и передачи данных не на уровне подсистем «человек» и «техника», а системы в целом.

Чтобы раскрыть технологическое единство людей, информации и техники, в (3) необходимо

■ Таблица 1. Режимы совместной обработки и передачи данных

Работа оператора без технических средств автоматизации деятельности	Автоматизированный режим обработки и передачи данных	Автоматический режим обработки и передачи данных
$T_i = \sum a_{ij}T_j + F_i,$ $T_{ij} = 0,$ $a_{ij} = T_{ij} / T_j,$ $a_{ij} = 0, T_i = F_i$	$T_i = \sum_j^l a_{ij}T_j + F_j,$ $F_i \neq 0, T_{ij} \neq 0,$ $a_{ij} \neq 0$	$T_i = \sum_j^l a_{ij}T_j + F_j,$ $F_i = 0, a_{ij} \neq 0,$ $T_i = \sum_{j=1}^l T_j$
$T = AT + F, A = 0,$ $T = F$	$T = AT + F, F \neq 0,$ $A \neq 0$	$T = A + F, F = 0,$ $A = I, T = T$

в процессе моделирования использовать определенные выше меру объема данных и объект совместной обработки и передачи данных и перейти на уровне подсистем «человек» и «техника» к такому показателю производительности трудовых и технических ресурсов, как продуктивность.

Рассмотрим подсистему «человек» в общем цикле функционирования системы «человек—техника». В работе i -го оператора можно выделить компьютерную и информационную деятельность. Работа на персональной ЭВМ с использованием клавиатуры, экрана и манипулятора мышью относится к компьютерной деятельности операторов. Информационная составляющая характеризует содержательную деятельность. Информационная деятельность оператора связана с ведением базы данных, формированием документов на основании информации из базы данных, получением и отправкой документов.

Покажем, что компьютерная и информационная деятельность — две стороны одной и той же деятельности. Представим деятельность i -го оператора на уровне действий над символами с помощью клавиатуры, экрана и манипулятора мышью. Тогда загруженность оператора можно выразить через объем данных в виде количества обрабатываемых символов, действия над каждым символом и время выполнения каждого действия. Пусть объем данных в процессе работы i -го оператора с клавиатурой, экраном дисплея и мышью равен

$$N_i = ns_i + np_i + nd_i + nw_i + nr_i + m1_i + m2_i + m3_i + m4_i + m5_i,$$

где количество символов, обрабатываемых оператором с использованием клавиатуры и экрана дисплея, равно: ns_i — при входе в систему, np_i — во время работы с данными, nd_i — в ходе форми-

рования документа, nw_i — на этапе отправки документа, nr_i — при получении документа; количество символов, обрабатываемых на экране дисплея манипулятором мышью, равно: $m1_i$ — во время входа в систему, $m2_i$ — во время работы с данными, $m3_i$ — в ходе формирования документа; $m4_i$ — в процессе передачи документа, $m5_i$ — на этапе приема документа.

Очевидно, i -й оператор для обработки s -го символа использует клавиатуру и экран, экран и манипулятор мышью. Представим временные затраты на работу с клавиатурой через $tnsklv_{is}$, $tnpklv_{is}$, $tndklv_{is}$, $tnwklv_{is}$, $tnrklv_{is}$, с экраном — через $tnsscr_{is}$, $tnpscr_{is}$, $tndscr_{is}$, $tnwscr_{is}$, $tnrscr_{is}$ и с манипулятором мышью — через $tm1_{is}$, $tm2_{is}$, $tm3_{is}$, $tm4_{is}$, $tm5_{is}$. Тогда временные затраты F_i i -го оператора на компьютерную деятельность выражаются через время, затраченное на обработку символов клавиатурой (K_i), экраном (D_i), манипулятором мышью (M_i), и косвенные временные затраты (E_i), не связанные с обработкой и передачей данных. Величина E_i рассматривается как среднее время согласования (координации) действий i -го оператора k -го уровня иерархии со стороны операторов вышестоящего уровня. Например, уточнение задания, определение порядка выдачи данных, уточнение полученной информации, актуализация данных операторами вышестоящего уровня иерархии и т. д. В ситуациях, жестко регламентированных временем, $E_i \rightarrow 0$. Однако если косвенные временные затраты оказывают существенное влияние на общие временные затраты i -го оператора (F_i), то возникает объективная необходимость их учета ($E_i \neq 0$) по определенным методикам. Будем исходить из предположения, что в критических по времени ситуациях каждый оператор в иерархии взаимодействия четко действует в соответствии с инструкцией, временные затраты на согласование несущественны и $E_i \rightarrow 0$. Поэтому считаем, что $E_i = 0$. Тогда временные затраты i -го оператора на компьютерную деятельность равны:

$$F_i = K_i + D_i + M_i + E_i,$$

$$\begin{aligned} \text{где } K_i &= tnsklv_i + tnpklv_i + tndklv_i + tnwklv_i + \\ &+ tnrklv_i, \quad tnsklv_i = \sum_{s=1}^{ns_i} tnsklv_{is}, \quad tnpklv_i = \sum_{s=1}^{np_i} tnpklv_{is}, \\ tndklv_i &= \sum_{s=1}^{nd_i} tndklv_{is}, \quad tnwklv_i = \sum_{s=1}^{nw_i} tnwklv_{is}, \\ tnrklv_i &= \sum_{s=1}^{nr_i} tnrklv_{is}; \\ D_i &= tnsscr_i + tnpscr_i + tndscr_i + tnwscr_i + tnrscr_i, \\ tnsscr_i &= \sum_{s=1}^{ns_i} tnsscr_{is}, \quad tnpscr_i = \sum_{s=1}^{np_i} tnpscr_{is}, \end{aligned}$$

$$tndscr_i = \sum_{s=1}^{nd_i} tndscr_{is}, \quad tnwscr_i = \sum_{s=1}^{nw_i} tnwscr_{is},$$

$$tnrscr_i = \sum_{s=1}^{nr_i} tnrscr_{is};$$

$$M_i = tm1_i + tm2_i + tm3_i + tm4_i + tm5_i;$$

$$tm1_i = \sum_{s=1}^{m1_i} tm1_{is}, \quad tm2_i = \sum_{s=1}^{m2_i} tm2_{is}, \quad tm3_i = \sum_{s=1}^{m3_i} tm3_{is},$$

$$tm4_i = \sum_{s=1}^{m4_i} tm4_{is}, \quad tm5_i = \sum_{s=1}^{m5_i} tm5_{is}; \quad E_i = 0.$$

Временные затраты V_i i -го оператора на информационную деятельность состоят из времени, затраченного на вход в систему (B_i), работу с данными (U_i), формирование документа (G_i), передачу документа (W_i), получение документа (R_i), и косвенных временных затрат (H_i). Здесь косвенные временные затраты также приняты равными нулю ($H_i = 0$). Тогда суммарные временные затраты V_i i -го оператора на информационную деятельность равны:

$$V_i = B_i + U_i + G_i + W_i + R_i + H_i,$$

$$\begin{aligned} \text{где } B_i &= tnsklv_i + tnsscr_i + tm1_i, \quad tnsklv_i = \sum_{s=1}^{ns_i} tnsklv_{is}, \\ tnsscr_i &= \sum_{s=1}^{ns_i} tnsscr_{is}, \quad tm1_i = \sum_{s=1}^{m1_i} tm1_{is}; \\ U_i &= tnpklv_i + tnpscr_i + tm2_i, \quad tnpklv_i = \sum_{s=1}^{np_i} tnpklv_{is}, \\ tnpscr_i &= \sum_{s=1}^{np_i} tnpscr_{is}, \quad tm2_i = \sum_{s=1}^{m2_i} tm2_{is}; \\ G_i &= tndklv_i + tndscr_i + tm3_i, \quad tndklv_i = \sum_{s=1}^{nd_i} tndklv_{is}, \\ tndscr_i &= \sum_{s=1}^{nd_i} tndscr_{is}, \quad tm3_i = \sum_{s=1}^{m3_i} tm3_{is}; \\ W_i &= tnwklv_i + tnwscr_i + tm4_i, \quad tnwklv_i = \sum_{s=1}^{nw_i} tnwklv_{is}, \\ tnwscr_i &= \sum_{s=1}^{nw_i} tnwscr_{is}, \quad tm4_i = \sum_{s=1}^{m4_i} tm4_{is}; \\ R_i &= tnrklv_i + tnrscr_i + tm5_i, \quad tnrklv_i = \sum_{s=1}^{nr_i} tnrklv_{is}, \\ tnrscr_i &= \sum_{s=1}^{nr_i} tnrscr_{is}, \quad tm5_i = \sum_{s=1}^{m5_i} tm5_{is}; \quad H_i = 0. \end{aligned}$$

Из полученных математических зависимостей видно, что составляющие B_i , U_i , G_i , W_i , R_i и H_i временных затрат V_i i -го оператора на информационную деятельность формируются из составляющих K_i , D_i , M_i и E_i временных затрат F_i на компьютерную деятельность, т. е. компоненты временных затрат F_i на компьютерную деятельность перераспределяются между компонентами временных затрат V_i на информационную деятельность. Во взаимодействии i -го с j -м оператором временные затраты технических средств на компьютерную деятельность описываются ма-

трицей $|T_{ij}|$, а на информационную деятельность — транспонированной матрицей.

Суммарные временные затраты T_i i -го оператора F_i и используемых им технических средств X_i на компьютерную деятельность равны $T_i = F_i + X_i$

$$\left(X_i = \sum_{j=1}^l T_{ij} \right)$$

и суммарные временные затраты T_j j -го оператора V_j и используемых технических средств Y_j на информационную деятельность равны

$$T_j = V_j + Y_j, \left(Y_j = \sum_{i=1}^l T_{ji} \right), \text{ где } T_i = T_j \text{ (табл. 2).}$$

Суммарные временные затраты всех операторов и техники на компьютерную деятельность и на информационную деятельность соответственно равны \mathbf{T} , т. е. $\mathbf{T} = \mathbf{K} + \mathbf{D} + \mathbf{M} + \mathbf{E} + \mathbf{X}$ и $\mathbf{T} = \mathbf{B} + \mathbf{U} + \mathbf{G} + \mathbf{W} + \mathbf{R}$. Таким образом, одно из свойств совместной обработки и передачи данных состоит в том, что суммарные временные затраты операторов и используемой ими техники на компьютерную деятельность равны суммарным временным затратам операторов и техники на информационную деятельность:

$$T = \sum_{i=1}^l F_i + \sum_{i=1}^l X_i = \sum_{j=1}^l V_j + \sum_{j=1}^l Y_j.$$

Следовательно, для исследования деятельности операторов и функционирования технических средств можно использовать компьютерную или информационную составляющую.

Для вычисления временных затрат $tnsklv_{is}$, $tnpklv_{is}$, $tndklv_{is}$, $tnwklv_{is}$, $tnrklv_{is}$, $tnsscr_{is}$, $tnpscr_{is}$,

■ Таблица 2. Временные затраты совместной обработки и передачи данных

	1	2	...	j	...	l	X	K	D	M	E	F	T
1	T_{11}	T_{12}	...	T_{1j}	...	T_{1l}	X_1	K_1	D_1	M_1	E_1	F_1	T_1
2	T_{21}	T_{22}	...	T_{2j}	...	T_{2l}	X_2	K_2	D_2	M_2	E_2	F_2	T_2
...
i	T_{i1}	T_{i2}	...	T_{ij}	...	T_{il}	X_i	K_i	D_i	M_i	E_i	F_i	T_i
...
l	T_{l1}	T_{l2}	...	T_{lj}	...	T_{ll}	X_l	K_l	D_l	M_l	E_l	F_l	T_l
Y	Y_1	Y_2	...	Y_j	...	Y_l	Z	K	D	M	E	F	T
B	B_1	B_2	...	B_j	...	B_l	B	0	0	0	0	0	0
U	U_1	U_2	...	U_j	...	U_l	U	0	0	0	0	0	0
G	G_1	G_2	...	G_j	...	G_l	G	0	0	0	0	0	0
W	W_1	W_2	...	W_j	...	W_l	W	0	0	0	0	0	0
R	R_1	R_2	...	R_j	...	R_l	R	0	0	0	0	0	0
H	H_1	H_2	...	H_j	...	H_l	H	0	0	0	0	0	0
V	V_1	V_2	...	V_j	...	V_l	V	0	0	0	0	0	0
T	T_1	T_2	...	T_j	...	T_l	T	0	0	0	0	0	0

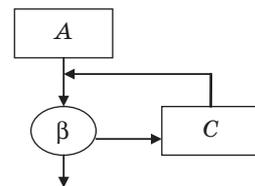
$tnscr_{is}$, $tnwscr_{is}$, $tnrscr_{is}$, $tm1_{is}$, $tm2_{is}$, $tm3_{is}$, $tm4_{is}$, $tm5_{is}$ применяются математические методы моделирования деятельности, используемые в исследованиях подсистемы «человек». К ним относятся алгоритмическая алгебра, аппарат функциональных сетей, вероятностно-временные зависимости описания действий оператора в рабочих, контрольных и диагностических операциях, нелинейные регрессионные зависимости и другие средства [1]. Оператор, работая с символами, обрабатывает каждый из них: вводит, контролирует и при появлении ошибки устраняет ее. Алгоритм \mathcal{R} действий оператора над символом показан на рис. 2. В алгоритме \mathcal{R} технологическая операция A_{op}^{is} обработки символа представлена в виде блок-схемы работа — визуальный контроль — доработка. Средствами алгоритмической алгебры технологическая операция A_{op}^{is} описывается функциональной сетью

$$A_{op}^{is} = A \beta (\Psi \cup C) \Pi, \quad (5)$$

где A — рабочая функциональная единица обработки символа; β — контроль результата выполнения рабочего оператора A ($\beta = 1$, если оператор выполнен без ошибки, и $\beta = 0$, если оператор выполнен с ошибкой); C — функциональная единица доработки, выполняемая при устранении ошибки, обнаруженной при контроле; Ψ — функциональная единица, интерпретируемая как фиксация на экране дисплея результата выполнения рабочей функциональной единицы A ; Π — функциональная единица, интерпретирующая передачу символа. Входящие в соотношение (5) элементарные действия моделируются функциональными сетями

$$A = (A_s)^{N_i}; C = (A_s)^{\theta N_i}; \Pi = A_s, \quad (6)$$

где A_s — обобщенная операция взаимодействия оператора с клавиатурой, экраном и мышью при обработке s -го символа; N_i — число обрабатываемых символов; θ — безразмерный коэффициент, характеризующий долю перенабираемых символов при обработке данных объема N_i . При переходе от алгоритмических формул (5) и (6) к их вероятностно-временным эквивалентам имеют место следующие зависимости [4]:



■ Рис. 2. Алгоритм \mathcal{R} выполнения технологической операции A_{op}^{is}

$$\begin{aligned}
 P_{A_{op}}^1 &= [P_A^1 K_\beta^{11} + (P_A^1 K_\beta^{10} + P_A^0 K_\beta^{00}) P_C^1] P_\Pi^1; \\
 T_{A_{op}} &= T_A + T_\beta + (P_A^1 K_\beta^{10} + P_A^0 K_\beta^{00}) T_C + T_\Pi; \quad (7) \\
 P_A^1 &= (P_s)^{N_i}; \quad P_A^0 = 1 - P_A^1; \quad T_A = N_i T_s; \quad T_\beta = N_i T_s; \\
 P_C^1 &= (P_s^1)^{\theta N_i}; \quad T_C = \theta N_i T_s; \quad P_\Pi^1 = P_s; \quad T_\Pi = T_s,
 \end{aligned}$$

где P_A^1 — вероятность и T_A — среднее время выполнения без ошибок технологической операции A_s ; P_s — вероятность и T_s — среднее время безошибочного выполнения операции над s -м символом, $s = 1, 2, \dots, N_i$; $K_\beta^{11}(K_\beta^{10})$ — вероятность отсутствия (наличия) ошибок при визуальном контроле на экране N_i обрабатываемых символов, причем $K_\beta^{11} + K_\beta^{10} = 1$; $K_\beta^{00}(K_\beta^{01})$ — вероятность наличия (отсутствия) ошибок при визуальном контроле на экране N_i обрабатываемых символов, причем $K_\beta^{00} + K_\beta^{01} = 1$. Для учета факторов, влияющих на безошибочность и быстродействие оператора при выполнении алгоритма \mathcal{R} над символом, используем регрессионные модели. Наиболее удобны нелинейные регрессионные модели, которые в отличие от традиционных полиномиальных моделей допускают содержательную интерпретацию параметров. Для вычисления P_s и T_s из (7) используются нелинейные регрессионные модели в виде пары взаимосвязанных зависимостей

$$\begin{aligned}
 P_s &= \{1 - [e^{-q_1 x_1} + (q_2 - e^{-q_1 x_1}) e^{-q_3(x_2 - x_3)}]\} e^{-q_4(x_4 - x_5)}; \\
 T_s &= (a_0 + a_2 e^{-a_1 x_1}) [1 + e^{-q_3(x_2 - x_3)} (a_3 - 1)] + \\
 &\quad + a_4 e^{-a_5 x_4} + (e^{-a_6 x_4} - 1) - a_7,
 \end{aligned}$$

где P_s — вероятность и T_s — математическое ожидание времени безошибочного выполнения оператором технологической операции A_s ; x_1 — квалификация оператора; $(x_2 - x_3)$ — дефицит времени, оцениваемый разностью предельно допустимого (x_2) и фактически затрачиваемого (x_3) времени на выполнение элементарной операции; x_4 — продолжительность работы оператора; a_0 — математическое ожидание времени выполнения технологической операции A_s неутомленным оператором высшей квалификации, т. е. высший достижимый уровень быстродействия оператора; a_2, a_4 — максимальные добавки к затратам времени на выполнение операции при необученности и вработываемости соответственно; a_3 — коэффициент изменения времени выполнения операции в условиях наибольшей операционной напряженности; a_1, a_5, a_6 — параметры, характеризующие скорость изменения времени выполнения операции из-за необученности, вработываемости и утомляемости соответственно; a_7 — параметр, имеющий размерность времени, обеспечивающий выход на стационарный режим, характеризующий быстродействие оператора от про-

должительности его безошибочной работы; q_1, q_3, q_4 — параметры, характеризующие скорость изменения безошибочности оператора в зависимости от роста квалификации x_1 , отклонения времени ($x_2 - x_3$) и продолжительности работы x_4 ; q_2 — вероятность совершения ошибки при наибольшей операционной напряженности; q_5 — параметр, имеющий ту же размерность, что и x_4 , и по физическому смыслу соответствующий моменту наибольшей безошибочности оператора.

Рассмотрим подсистему «техника» в целомном процессе совместной обработки и передачи данных. Для вычисления присутствующих в модели (3) временных затрат T_{ij} , технических средств на взаимодействие i -го с j -м оператором используются математические методы исследования подсистемы «техника». Имеются в виду методы теории очередей (системы массового обслуживания), сетей очередей (сети массового обслуживания), имитационного моделирования, аналитические зависимости и др. Для вычисления временных затрат T_{ij} воспользуемся аналитическими зависимостями из работы [3]. Использование аналитических зависимостей наглядно раскрывает физический смысл обработки и передачи данных в компьютерных сетях. Чтобы показать механизм взаимодействия протокольных объектов в разнородных сетях, рассмотрим случай использования компьютерных сетей с тремя сетевыми технологиями: *Ethernet*, *FDDI* и *Token Ring*. Время T_{ij} состоит из времени t_{cpu}^{ij} использования центрального процессора, времени t_d^{ij} работы диска сервера, времени t_{net}^{ij} передачи данных по сетям и времени t_r^{ij} , затраченного на определение маршрута движения дейтаграмм. Сообщение в сети от клиента к серверу обычно проходит стек протоколов и передается через одну или большее количество сетей. Протокольные объекты каждого уровня общаются между собой за счет обмена протокольными единицами обмена (*Protocol Data Unit* — *PDU*), состоящими из заголовка и области данных. В *PDU* обычно отводится максимально возможный размер под область данных, который в байтах носит название максимального передаваемого блока (*Maximum Transmission Unit* — *MTU*). Маршрутизаторы фрагментируют дейтаграммы при переходе к сети с более низким значением *MTU*. Фрагменты собираются заново на уровне *Internet*-протокола *IP* на хвосте места назначения. Каждый уровень протокола к данным добавляет свой собственный заголовок, а иногда и хвост, т. е. заключительную часть. Время процессора равно $t_{cpu}^{ij} = \alpha_{cpu_{kl}} / U_{cpu_{kl}}$, где $\alpha_{cpu_{kl}}$ — коэффициент использования и $U_{cpu_{kl}}$ — производительность процессора по классу запросов, $kl = 1, 2, 3$ (rf — размер файла: $1 - rf \leq 20$ КБ, $2 - 20$ КБ $< rf \leq 1$ МБ,

3 — $rf > 1$ МБ). Время обслуживания для диска

составляет $t_d^{ij} = t_{pd} + t_{zd} + \frac{N_{bd}^i R_{bd}}{V_d}$, где t_{pd} — сред-

нее время поиска на диске; t_{zd} — средняя задерж-
ка; N_{bd}^i — количество считываемых с диска бло-
ков; R_{bd} — размер блока (в байтах); V_d — скорость
считывания с диска. Временные затраты сети
 t_{net}^{ij} состоят из времени t_c^{ij} , затраченного сетью
на запрос клиента к серверу, и времени на от-
вет сервера t_s^{ij} : $t_{net}^{ij} = t_c^{ij} + t_s^{ij}$. Запрос от i -го клиен-
та к серверу размещается в области данных TCP-
сегмента, который поступает в область данных
IP-дейтаграммы. Дейтаграмма инкапсулирует-
ся кадрами Ethernet, FDDI и Token Ring по
мере ее продвижения по сетям. Таким обра-
зом, по мере перехода от одной сети к другой
 N_{client_i} -байтовый клиентский запрос преобразу-
ется в N_{cip} -байтовый кадр p -й сети ($p = 1, 2, 3$):
 $N_{cip} = N_{client_i} + R_{TCP} + R_{IP} + R_{kadr_p}$, где R_{TCP} , R_{IP}
и R_{kadr_p} — размеры заголовков (служебной ин-
формации) протоколов TCP, IP и p -й сети. Время
на передачу запроса от i -го клиента по p -й сети

$t_{cip} = \frac{N_{cip} \cdot 8}{10^6 \cdot V_p}$, где V_p — пропускная способность p -й

сети, Мбит/с. Тогда временные затраты на за-

прос $t_c^{ij} = \sum_{p=1}^P t_{cip}$, $p = 1, 2, \dots, P$, P — общее количе-

ство сетей, через которые проходит запрос. Опре-
делим временные затраты t_s^{ij} на ответ сервера
 i -му клиенту. Чтобы после появления TCP-
соединения между сервером и клиентом исклю-
чить фрагментирование данных, устанавливает-
ся максимальный размер сегмента MSS, мень-
шим или равным MTU для всех сетей, т. е. $MSS \leq \min_{p=1}^P MTU - R_{TCP} - R_{IP}$, где MTU, как отмеча-
лось, максимальный размер области данных в сете-
вых протоколах. Установив для N_{server_i} — байтово-
го ответа сегмент из $N_{segment_i}$ байт, серверу по-
требуется K_{TCP_i} сегментов, чтобы по сетям пере-
дать i -му клиенту N_{server_i} -байтовый ответ. Тогда
время на передачу данных с учетом служебной
информации равно

$$t_{sip} = \frac{[K_{TCP_i}(N_{segment_i} + R_{sl_p}) + (N_{dop_i} + R_{sl_p})] \cdot 8}{10^6 \cdot V_p},$$

где $R_{sl_p} = R_{TCP} + R_{IP} + R_{radr_p}$, $N_{dop} = N_{server_i} -$
 $- K_{TCP_i} N_{segment_i}$. Время ответа $t_s^{ij} = \sum_{p=1}^P t_{sip}$. Общее

время обработки сообщения на M_r маршрутиза-

торах равно $t_r^{ij} = \sum_{m=1}^{M_r} t_{ir_m}$, где $t_{ir_m} = K_{id} Z_{r_m}$, здесь

K_{id} — количество дейтаграмм, Z_{r_m} — задержка
маршрутизатора, мкс/пакет, указывается произ-
водителем. Итак, для технических средств опре-
делили $T_{ij} = t_{cpu}^{ij} + t_d^{ij} + t_{net}^{ij} + t_r^{ij}$.

Окончательно имеем $T = \sum_{i=1}^l F_i + \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^l T_{ij}$ или
 $T = \sum_{j=1}^l V_j + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l T_{ji}$. Таким образом, через мо-

дель совместной обработки и передачи данных
достигнута интеграция методов научных иссле-
дований подсистем «человек» и «техника». Это
свойство показывает, что модели деятельности
и функционирования техники «вложены» в мо-
дель совместной обработки и передачи данных.
Символ (байт) как мера объема и объект совмест-
ной обработки присутствует в формализованном
описании деятельности и функционирования
техники.

Учитывая, что в рамках одной работы довольно
сложно раскрыть все аспекты предложенного под-
хода, отметим главное. Введением на уровне опе-
ратора и технических средств меры объема и объ-
екта совместной обработки и передачи данных опе-
раторами и техническими средствами сделан
важный шаг к моделированию целостного про-
цесса, раскрытию его закономерности и свойств.

Литература

1. **Информационно-управляющие** человеко-машин-
ные системы: Исследование, проектирование, ис-
пытания: Справочник / А. Н. Адаменко, А. Т. Аше-
ров, И. Л. Бердников и др.; Под общ. ред. А. И. Гу-
бинского и В. Г. Евграфова. — М.: Машинострое-
ние, 1993. — 528 с.
2. **Феррари Д.** Оценка производительности вычисли-
тельных систем / Пер. с англ. А. И. Горлина,
Ю. Б. Котова и Л. В. Ухова; Под ред. В. В. Марты-
нюка. — М.: Мир, 1981. — 576 с.
3. **Менаске Д., Алмейда В.** Производительность Web-
служб. Анализ, оценка и планирование: Пер.
с англ.— СПб.: ДиаСофтЮП, 2003. — 480 с.
4. **Ротштейн А. П., Кузнецов П. Д.** Проектирование
бездефектных человеко-машинных технологий. —
Киев: Тэхника, 1992. — 180 с.

УДК 681.324

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ СИТУАЦИОННОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНО-АГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С. А. Яковлев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

А. А. Суконщиков,

канд. техн. наук, доцент

Вологодский государственный технический университет

Рассмотрены вопросы построения ситуационных интеллектуально-агентных систем моделирования сложных объектов на примере корпоративных сетей с поддержкой качества обслуживания, приведена мультиагентная интеллектуальная система, дано теоретико-множественное описание агентов и их взаимодействий.

Ключевые слова — агент, интеллектуальная система, ситуационное интеллектуально-агентное моделирование.

Главным отличием современных интеллектуальных систем является их распределенность, обеспечение обработки и применение распределенных знаний. Главный смысл происходящих в настоящее время смен концепций (парадигмы) создания и использования средств искусственного интеллекта — переход от предположений, справедливых только для изолированных систем искусственного интеллекта, от индивидуальных систем к распределенной обработке информации и разработке мультиагентных интеллектуальных систем (МАИС) [1, 2].

При практической реализации распределенных систем возникли серьезные трудности с проектированием и описанием объединенных в единую сеть разнородных локальных компьютерных узлов. Только с применением теории МАИС можно преодолеть трудности моделирования гетерогенных сетей.

Технология мультиагентных систем — это новая парадигма информационной технологии, ориентированной на совместное использование научных и технических достижений и преимуществ, которые дают идеи и методы искусственного интеллекта, современные локальные и глобальные компьютерные сети, распределенные базы данных и распределенные вычисления, аппаратные и программные средства поддержки теории открытости.

Уровень интеллектуальности определенного агента можно оценить, как способность агента использовать старые знания в новых, может быть,

заранее неизвестных ему ситуациях и проблемных областях, где оцениваемый агент приемлем как активный решатель задач. Как правило, каждый агент работает с определенной метафорой, определяющей функции и особенности лица, принимающего решение (ЛПР). Идея каждой метафоры — это инструментальная система, отражающая схему взаимодействия между исполнителями в данной ситуации [2].

Методология ситуационного управления использована при создании модели интеллектуальной системы поддержки принятия решения (ИСППР), которая функционирует в двух контурах — контуре организации управления (адаптация структуры системы) и контуре функционирования [1, 2]. При создании ИСППР реализованы принципы целевой направленности системы, оцениваемости (распознаваемости) ситуаций, обоснования решений, открытости системы, интегрального представления видов информации, адаптивности. ИСППР включает инструментальный и прикладной программные комплексы.

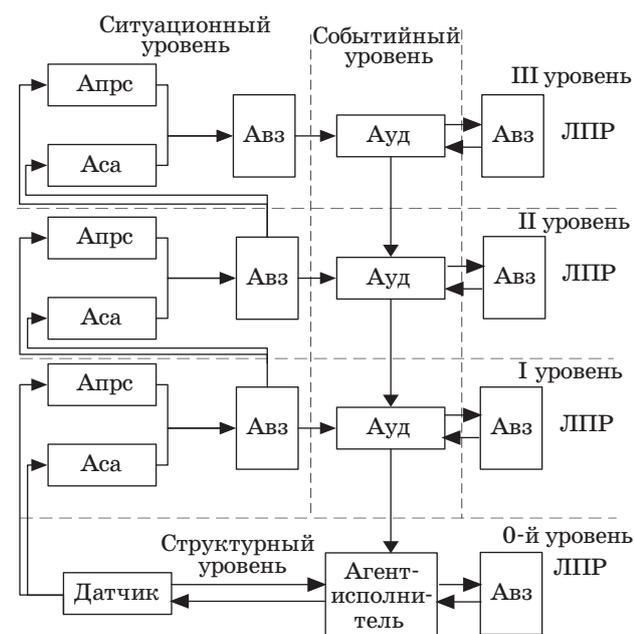
Исходя из многоуровневой структуры ситуационного моделирования (ССМ) авторы считают, что необходима МАИС, которая формирует взаимодействие интеллектуальных агентов (ИА) на всех этапах моделирования. Для ССМ налицо все признаки МАИС: распределенность, независимая параллельная работа экспертов, т. е. ЛПР, масштабируемость, когда при добавлении нового объекта или подсети система не перепрограммируется, а в нее только добавляются новые агенты,

и затем система включается в общее взаимодействие.

На основании приведенных выше соображений о характеристиках известных моделей ИА и изложенной формальной теории ситуационного моделирования авторы предлагают определить ИА как гибридную архитектуру. Интеллектуальный агент в системе будет представляться в виде МАИС, что позволит разрабатывать иерархию функций, процессов, моделей и взаимосвязей в виде отдельных взаимосвязанных агентов [3]. Такой подход позволяет разрабатывать модель каждого агента независимо, определять его роль в МАИС и взаимосвязи с другими агентами. Такой принцип хорошо встраивается в концепцию построения системы ситуационного интеллектуально-агентного моделирования (СИАМ).

Система СИАМ состоит из 4 уровней (рисунок): 0-й уровень — уровень имитационного моделирования (уровень структурной схемы корпоративной сети), I — уровень локальных систем управления (уровень объекта), II — уровень управления подсетью, III — уровень управления корпоративной сетью. I, II и III уровни состоят из ситуационного и событийного уровней. Ситуационный уровень служит для оценки текущей ситуации в системе, событийный — для выработки управляющего действия.

В разработанной МАИС (см. рисунок) выделены следующие роли агентов: Аса — ситуационный анализ (оценка текущей ситуации в системе), Апрс — прогнозирование развития ситуа-



■ Структура взаимодействия агентов в системе ситуационного моделирования

ции, Ауд — выработка управляющих действий, Авз — взаимосвязь между агентами.

Ситуационный уровень будет состоять из агентов, выполняющих две роли: ситуационный анализ и прогнозирование развития ситуации, что позволяет увеличить быстродействие системы за счет параллельной работы агентов, использование специализированных методов в каждом агенте и дает возможность независимого проектирования агентов.

Событийный уровень представлен агентом выработки управляющих действий (Ауд), который в качестве исходных данных использует сигналы от агентов ситуационного анализа и прогнозирования, от агента управляющих действий верхнего уровня, от ЛПП (через коммуникационного агента Авз).

Информационную связь между уровнями осуществляют агенты взаимосвязи (Авз), которые позволяют синхронизировать работу агентов. Горизонтальная синхронизация осуществляется между агентами одного уровня и вертикальная синхронизация — между агентами разных уровней.

Ситуация в системе определяется как совокупность ситуаций на каждом из уровней, что позволяет отразить ситуацию в контексте состояний внешней среды, целей и намерений агентов и его убеждений о других агентах. Каждый агент имеет свою базу знаний, которая определяет механизм логического вывода, и базу данных, которая содержит параметры настройки агентов. С учетом предложенной в [3] концепции построения модели интеллектуального агента, определим модель ИА с учетом множества ролей, которыми он может обладать.

Новая модель обобщенного ИА будет определяться следующим образом:

$$MAI = \langle NA, Actors, SA \rangle,$$

где NA — имя ИА; $Actors$ — роль агента в многоагентной системе; SA — структура атрибутов агента. Причем:

$$Actors = \langle MVI, MG, MSR \rangle,$$

где MVI — модель информационно-управляющего пространства; MG — модель целеполагания; MSR — модель поиска решений.

Модель поиска решения заключается в реализации конкретного плана действий (алгоритма) агента при активации цели. Исходя из функций, которые реализуются в распределенной ИСППР, можно выделить 6 ролей, которые распределим по мере увеличения сложности.

1. Агент взаимосвязи $Actors_1$ может быть двух типов в зависимости от MVI :

1-й тип — передача информационных сообщений $MVI_1 = (S(MAI), IS, SA)$;

2-й тип — передача управляющих сообщений $MVI_2 = (S(MAI), UD, SA)$,

где $S(MAI)$ — множество ИА, передающих информацию на вход данного агента и принимающих от него сообщения (информационные или управляющие); IS — множество информационных потоков ИА; SA — структура атрибутов в сообщениях; UD — множество управляющих сообщений.

$$MG = (SS, FSS, GS, G^{ЛПП}, SMA(t)),$$

где SS — множество стратегий, понимаемых как методы выбора целей; FSS — функция выбора стратегии; GS — множество статических целей; $G^{ЛПП}$ — множество целей, получаемых данным ИА от ЛПП соответствующего уровня; $SMA(t)$ — состояние окружающего мультиагентного мира (МА-мира): $SMA(t) = R(t)$ — текущее состояние МА-мира.

$MSR = (F1)$ — при изменении состояния МА-мира (или события) на входе агента типа *Actors1* передает данное изменение на вход агентов, с которыми он взаимосвязан, без искажений.

2. Агент проведения ситуационного анализа *Actors2*:

$$MVI = (S(MAI), IS, SA);$$

$$MG = (SS, FSS, GS, G^{ЛПП}, SMA(t)),$$

$$SMA(t) = (P(t - 1), R(t)),$$

где $P(t - 1)$ — предыдущие значения состояния МА-мира.

$MSR = (F2)$ — на основании входных сигналов и установленных целей определяется, к какому множеству ситуаций относится текущая ситуация в МА-мире.

3. Агент прогнозирования развития ситуаций *Actors3*:

$$MVI = (S(MAI), IS, SA);$$

$$MG = (SS, FSS, GS, G^{ЛПП}, FG^D, FG^S, FAG, SMA(t)),$$

$$SMA(t) = (P(t - 1), R(t), F(t + 1)),$$

где $F(t + 1)$ — предполагаемое будущее состояние МА-мира.

$MSR = (F3)$ — на основании входных сигналов (изменения ситуации в прошлом) и установленных целей определяется, приведет ли изменение текущей ситуации в обозримом будущем к переходу к нештатной (штатной) ситуации, если да, то выдать соответствующее информационное сообщение.

4. Агент принятия решения *Actors4*:

$$MVI = (S(MAI), IS, UD, SA);$$

$$MG = (SS, FSS, GS, G^{ЛПП}, G^{TOP}, G^{DOWN}, FG^D, FG^S, FG^A, SMA(t)),$$

$$SMA(t) = R(t),$$

где G^{DOWN} — множество целей, которые могут быть переданы интеллектуальным агентам ни-

жележащих уровней; FG^D — функция формирования динамических целей; FG^S — функция выбора статических целей; FG^A — функция выбора активных целей, т. е. целей, принятых к реализации.

$MSR = (F4)$ — на основании комбинации входных сигналов и установленных целей вырабатывается управляющее действие для нижележащих агентов и для агентов исполнения решений.

5. Агент исполнения решения *Actors5*:

$$MVI = (S(MAI), UD, SA);$$

$$MG = (SS, FSS, GS, G^{ЛПП}, G^{TOP}, G^{DOWN}, FG^D, FG^S, FG^A, SMA(t)),$$

$$SMA(t) = R(t).$$

$MSR = (F5)$ — на основании входных управляющих команд и установленных целей выполняется управление устройством.

6. Агент распределения ресурсов *Actors6*:

$$MVI = (S(MAI), IS, UD, SA);$$

$$MG = (SS, FSS, GS, G^{ЛПП}, G^{TOP}, G^{DOWN}, FG^D, FG^S, FG^A, SMA(t)),$$

$$SMA(t) = (P(t - 1), R(t), F(t + 1)).$$

$MSR = (F6)$ — на основании входных управляющих команд, информационных сообщений и установленных целей происходит резервирование, занятие и освобождение ресурса.

Функция выбора стратегии определяет текущую стратегию в зависимости от предыдущей стратегии, состояния МА-мира, множества активных (реализуемых) на данный момент целей. Функция формирования динамических целей определяется функциональным преобразованием над состоянием МА-мира, текущей стратегией. Функция выбора статических целей определяется функциональным преобразованием над состоянием МА-мира, текущей стратегией, множеством сформированных статических целей на текущий момент, множеством активных целей, принятых к исполнению.

На основе предложенной модели обобщенного ИА и специфики систем ситуационного моделирования мультиагентная система может быть описана следующей четверкой:

$$M = \langle A, SSS, MS, U \rangle,$$

где A — множество агентов на всех стратах моделирования; SSS — множество соединений агентов на всех стратах моделирования: $SSS = (Ak \in \{AU_i\})(An \in \{AU_j\}) : \rightarrow \{0, 1\}$, где Ak, An — множество агентов, расположенных соответственно на стратах моделирования U_i и U_j , $k = 1, \dots, m$; $n = 1, \dots, l$; $i = 0, 1, 2, 3$; $j = 0, 1, 2, 3$; MS — множество информационных и управляющих потоков

между взаимосвязанными агентами; U — множество страт моделирования, при этом имеет место система:

— имитационного моделирования, если $(|U| = 0) \vee (|A| = 0)$;

— имитационного моделирования на базе агентов, если $(|U| = 0) \vee (|A| = N)$, N — количество агентов от одного до N ;

— СИАМ на уровне объекта корпоративной сети, если $(|U| = 1) \vee (|A| = N)$ (при $A1 > 1$ — децентрализованная система управления сетью, при $A2 = 1$ — система управления одним объектом);

— СИАМ на уровне отдельной сети, если $(|U| = 2) \vee (|A| = N)$ (при $A2 > 1$ — децентрализованная система управления корпоративной сетью, при $A2 = 1$ — централизованная система управления корпоративной сетью);

— СИАМ на уровне корпоративной сети, если $(|U| = 3) \vee (|A| = N)$ (при $A3 = 1$ — централизованная система управления).

Дадим определение МАИС принятия решения корпоративной сети:

$$MA = (MAks, MAps, MAo, MAstr, MSm),$$

где $MAks$ — МАИС принятия решения уровня корпоративной сети; $MAps$ — МАИС принятия решения уровня подсети корпоративной сети; MAo — МАИС принятия решения уровня объекта корпоративной сети; $MAstr$ — МАИС принятия решения на структурном уровне корпоративной сети; MSm — множество взаимодействий между многоагентными интеллектуальными системами: $MSm = (MSi, MSy)$, где MSi — множество информационных потоков; MSy — множество потоков управляющих команд.

Мультиагентные интеллектуальные системы принятия решения располагаются в порядке иерархического убывания влияния данной системы. Информационные потоки направляются от нижних иерархических уровней к верхним, а управляющие потоки — в обратном направлении. Каждая из приведенных здесь МАИС еще имеет внутреннюю иерархическую структуру, причем для уровней корпоративной сети и подсети иерархическая структура одинакова:

$$MAks = (Asu, Acu, Cmks),$$

где Asu — множество ИА ситуационного уровня корпоративной сети; Acu — множество ИА событийного уровня корпоративной сети; $Cmks$ — множество агентов для согласования взаимодействия между агентами разных уровней корпоративной страты управления сетью.

$$MAps = (Asup, Acup, Cmps),$$

где $Asup$ — множество ИА ситуационного уровня подсети корпоративной сети; $Acup$ — множество

ИА событийного уровня подсети корпоративной сети; $Cmps$ — множество агентов для согласования взаимодействия между агентами разных уровней страты управления подсетью.

Мультиагентная интеллектуальная система объектного уровня имеет трехуровневую структуру:

$$MAo = (Aso, Aco, Asto, Cmo),$$

где Aso — множество ИА ситуационного уровня объекта; Aco — множество ИА событийного уровня объекта; $Asto$ — множество ИА структурного уровня объекта; Cmo — множество агентов для согласования взаимодействия между агентами разных уровней страты объекта сети.

Формальное описание ИА начнем с агента структурного уровня объекта [4]. На основе определения механизмов качества обслуживания информационных потоков сформируем МАИС структурного уровня:

$$MAcmp = \{Astoi\}, i = 1, \dots, n,$$

где n — количество моделируемых устройств с поддержкой качества обслуживания (ПКО).

В общем виде многоагентная система на структурном уровне

$$Asto = (Aoo, Апт, Афт, Акт, Ас, Апп, Ам),$$

куда входят агенты, реализующие следующие функции: обслуживания очередей — Aoo ; профилирования трафика — $Апт$; формирования трафика — $Афт$; классификации трафика — $Акт$; сигнализации между агентами в одном устройстве и между различными устройствами структурного уровня — $Ас$; предварительного резервирования ресурсов — $Апп$; влияния параметров качества обслуживания на маршрутизацию — $Ам$. Агент $Ам$ зависит от

$$Ам = (Мт, Рм(Aoo), Рм(Апт), Рм(Афт), Рм(Акт), Рм(Ас)),$$

где $Мт$ — реализованный в сети алгоритм маршрутизации; $Рм(Aoo), Рм(Апт), Рм(Афт), Рм(Акт)$ — параметры от других агентов устройства, влияющие на вычисление маршрутизации; $Рм(Ас)$ — параметры маршрутизации от других маршрутизаторов.

Данная структура отображает МАИС устройств типа маршрутизатор.

При условии, что $(\forall Амi = 0) \rightarrow Asto = (Aoo, Апт, Афт, Акт, Ас, Апп)$, данная структура соответствует некоторым типам межсетевых экранов, маршрутизаторов и серверов доступа в интегральном режиме обслуживания, где агент резервирования ресурсов функционирует на основе параметров резервирования других агентов устройства:

$$App = (Pr(Aoo), Pr(Aпт), Pr(Aфт), Pr(Aкт), Pr(Aс)).$$

При условии, что $(\forall Ami = 0) \vee (\forall Appi = 0) \rightarrow Asto = (Aoo, Aпт, Aфт, Aкт, Aс)$, данная структура соответствует некоторым типам коммутаторов и маршрутизаторов с горизонтальной синхронизацией. $Aс = (\{Aсиi\}, \{Aсуj\})$, где $\{Aсиi\}, \{Aсуj\}$ — множество соответственно информационных и управляющих сигналов.

При условии, что $(\forall Ami = 0) \vee (\forall Appi = 0) \vee (\forall Aси = 0) \rightarrow Asto = (Aoo, Aпт, Aфт, Aкт)$, данная структура соответствует некоторым типам коммутаторов и маршрутизаторов, работающих в дифференциальном режиме, тогда механизмы связи между агентами внутри устройства реализуются Aoo .

При условии, что $(\forall Ami = 0) \vee (\forall Appi = 0) \vee (\forall Aси = 0) \vee (\forall Aкти = 0) \rightarrow Asto = (Aoo, Aпт, Aфт)$, данная структура соответствует некоторым типам коммутаторов и маршрутизаторов, работающих в дифференциальном режиме с вынесением функции классификации трафика на доверительные узлы сети с ПКО (например, рабочие станции). $Aфт = \{Aфти\}$, где $Aфти$ — множество реализуемых алгоритмов формирования трафика на устройстве (в принципе, для каждого потока можно использовать свой алгоритм — типа ведра токенов), на практике $|\{Aфти\}| = 1$.

При условии, что $(\forall Ami = 0) \vee (\forall Appi = 0) \vee (\forall Aси = 0) \vee (\forall Aкти = 0) \vee (\forall Aфти = 0) \rightarrow Asto = (Aoo, Aпт)$, данная структура соответствует некоторым типам коммутаторов и маршрутизаторов, работающих в дифференциальном режиме, где джиттер не имеет особого значения или не входит в состав контролируемых параметров (передача файлов, баз данных и т. д.). $Aпт$ может быть из двух множеств: $Aпт = (Aпт1, Aпт2)$, $Aпт1$ — агенты отбрасывания пакетов при превышении профиля трафика (режим полисинг); $Aпт2$ — агенты маркировки пакетов при превышении профиля трафика, сохранении и передаче с более низким качеством. Должно выполняться следующее условие для пакетов одного потока: $(\forall Aпти \in Aпт1) \vee (\forall Aпти \in Aпт2) \rightarrow (((Aпти = 0) \vee (Aпти = 1)) \& ((Aпти = 1) \vee (Aпти = 0))) \vee (i = j)$, т. е. для одного потока не должно быть двух агентов профилирования.

При условии, что $(\forall Ami = 0) \vee (\forall Appi = 0) \vee (\forall Aси = 0) \vee (\forall Aкти = 0) \vee (\forall Aфти = 0) \vee (\forall Aпти = 0) \rightarrow Asto = (Aoo)$, данная структура соответствует некоторым типам коммутаторов и маршрутизаторов, работающих в дифференциальном режиме, где нет сравнения с профилем трафика и хватает только одного агента обслуживания очередей (при достаточно низком трафике в сети).

Исходя из структуры построения устройства можно сделать вывод, что из всех перечисленных агентов для принятия решения ИА лучше всего совместить с агентом обслуживания очередей:

$$Aoo = (AM, Ao, Aст, As, A(БД(Ao))),$$

где AM — метаагент, ИА управления и работы с неточными данными ($Actors5$); Ao — агент соответствующего алгоритма обслуживания очереди; $Aст$ — агент стратегии по выбору Ao ; As — агент статистики функционирования устройства (статистика обслуживания разных потоков информации); $A(БД(Ao))$ — агент работы с базой данных алгоритмов обслуживания очередей.

Теперь перейдем к формированию мультиагентной системы событийного уровня объекта СИАМ:

$$Aco = (A(Ес), A(D), A(C), A(R)),$$

где $A(Ес)$ — агент по определению влияния элементарного события на объекте (на неточных исходных данных) ($Actors2$); $A(D)$ — агент по выработке управляющего действия (на неточных исходных данных) ($Actors4$); $A(C)$ — агент, обеспечивающий взаимосвязи между агентами ($Actors1$); $A(R)$ — агент распределения ресурсов ($Actors6$).

$$A(Ес) = (\Pi, \{Chari\}, Pari^1, Pari^2)$$

для оценки события учитывает: соблюдение требований на параметры характеристик Π ; типы контролируемых характеристик $QoS\{Chari\}$; параметры характеристик: $Pari^1$ — значение характеристики QoS до события, $Pari^2$ — значение характеристики QoS после события.

Агент выработки управляющего действия (принятия решения) на основе нечеткой логики будет определяться как

$$A(D) = (P(As(O)), P(As(P)), P(ЛПП), P(A(D)k), S(БПНП), I(ЛПП), Fr),$$

где $P(As(O))$ — параметры для выбора управляющего действия от агента оценки ситуации; $P(As(P))$ — параметры для выбора управляющего действия от агента прогнозирования развития ситуации; $P(ЛПП)$ — управляющая команда от ЛПП; $P(A(D)k)$ — управляющая команда от агента принятия решения с верхнего k -уровня; $I(ЛПП)$ — информационное сообщение ЛПП; $S(БПНП)$ — стратегия выбора нечеткого продукционного правила из базы знаний правил нечетких продукций; Fr — функция отслеживания результата действия примененного нечеткого продукционного правила.

Агент взаимосвязи может быть двух типов: передачи информационных $A1(Aси)$ и управляющих $A2(Aсуj)$ сообщений:

$$A1(Ac_i) = (I_i, I_o); A2(Ac_j) = (D_i, D_o),$$

где I_i, I_o — входные и выходные информационные сообщения; D_i, D_o — входные и выходные управляющие сообщения.

Рассмотрим теоретико-множественную модель многоагентной системы на ситуационном уровне объекта:

$$A_{so} = (As(O), As(P)),$$

где $As(O)$ — агент анализа оценки ситуации на объекте на нечетких данных ($Actors_2$); $As(P)$ — агент прогнозирования развития ситуации на объекте на основе нечетких исходных данных ($Actors_3$).

$$As(O) = (\Pi, SO),$$

где Π — множество правил для оценки параметров контролируемых характеристик; SO — применяемая методика (стратегия) оценивания возникшей ситуации.

$$As(P) = (Fu, Tr(\{Chari(t - n)\}), F(p), A(БД), A(O), A(T)),$$

где Fu — функция прогнозирования изменения на основе временной выборки; $Tr(\{Chari(t - n)\})$ — временная выборка текущих значений характеристик $QoS(\{Chari(t - n)\})$, где n — глубина выборки, т. е. количество предыдущих значений, применяемых в данной выборке, n должна соответствовать целям краткосрочного прогнозирования и поэтому находится в пределах 10–15 временных значений характеристик QoS ; $F(p)$ — функция, отслеживающая пакеты синхронизации на установлении соединений для новых потоков и пользователей; $A(БД)$ — агент для работы с базой данных обучающих выборок; $A(O)$ — агент

проведения обучения; $A(T)$ — агент проведения тестирования.

На основе предложенной интеллектуальной концепции ситуационного моделирования появляются новые возможности при моделировании сетей, а именно: оценка возникающих ситуаций в сети на основе нечеткой логики, прогнозирование развития ситуаций с использованием методов нейронных сетей, принятие решения на базе нейронечетких систем. Результатом функционирования системы СИАМ являются управляющие действия в зависимости от развития ситуаций. Изложенный подход представляет собой развитие идеологии ситуационного управления с выделением четырех уровней ситуационного моделирования на основе многоагентной системы, что позволяет существенно упростить моделирование корпоративных сетей с поддержкой качества обслуживания.

Литература

1. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. — М.: Наука, 1986. — 234 с.
2. Бондаренко В. В., Литовка С. В., Чекинов Г. П. Подход к прогнозированию развития ситуации и определение управленческих воздействий в интеллектуальной системе поддержки принятия решений // Информационные технологии. 2003. № 8. С. 13–24.
3. Швецов А. Н., Яковлев С. А. Распределенные интеллектуальные информационные системы / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — СПб., 2003. — 318 с.
4. Суконщиков А. А., Давыдов Д. В. Методы и модели анализа сетей АСУ с поддержанием качества обслуживания / ВоГТУ. — Вологда, 2007. — 139 с.

УДК 004.896

ТЕМПОРАЛЬНЫЕ НЕМОНОТОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

А. С. Васильевский,канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
ОАО «Концерн «Гранит-Электрон»**К. В. Лапшин,**начальник научно-исследовательской лаборатории
ОАО «Концерн «Гранит-Электрон»

Рассматриваются возможности использования темпоральных немонотонных логических систем на основе линейной временной логики с часами в задачах моделирования систем управления сложными динамическими объектами, работающих в режиме жесткого реального времени.

Ключевые слова — темпоральная логика, жесткое реальное время, система управления.

Введение

Характерным отличием сложных динамических объектов управления является необходимость выработки решений и выполнения процедур управления в условиях жесткого реального времени, когда запаздывание реакции может привести к необратимому развитию событий и неприемлемым последствиям. Дефицит времени в таких системах является одним из основных факторов, обуславливающих неполноту используемых данных и знаний. При работе с информацией с высоким уровнем неопределенности для построения систем управления сложными динамическими объектами в условиях жесткого реального времени неизбежно применение методов, ориентированных на потоки контекстно-зависимой информации. Проводя рассуждения в условиях неполноты информации, можно отказаться от ранее полученных выводов в пользу вновь полученных данных, если старая и новая информация, на основе которых выполняются рассуждения, вступают в противоречие. Для формализации такого рода рассуждений предлагается использовать немонотонные логические системы. Для представления темпоральных отношений особое значение при решении задач моделирования в динамических средах имеет воз-

можность применять не классические, а темпоральные логики, в которых время представлено имплицитно.

Темпоральные логические системы

Неполнота информации о предмете рассуждений в динамических экспертных системах, включенных в контур моделирования динамических объектов, порождает модифицируемые (пересматриваемые) рассуждения. Существуют два класса таких систем: экспертные системы мягкого и жесткого реального времени. В системах жесткого реального времени промедление с реакцией может приводить к необратимому развитию событий и неприемлемым последствиям, в отличие от систем мягкого реального времени, где плавное увеличение времени запаздывания приводит к постепенному ухудшению качества функционирования. Экспертные системы жесткого реального времени — это, чаще всего, системы, включенные в контур управления движущихся объектов.

Примерами формализмов рассуждений для экспертных систем мягкого реального времени являются представленные ниже немонотонные логические системы, разработанные на базе линейной темпоральной логики с часами (*Temporal Logic with Clock* — TLC) [1].

Темпоральная логика умолчаний (*Temporal Default Logic with Clock — TDLC*) была предложена как средство моделирования пересматриваемых рассуждений в интеллектуальных системах реального времени. TDLC строится аналогично обычной логике умолчаний Р. Рейтера (далее DL). Отличие TDLC от DL в основном обусловлено тем обстоятельством, что в ее основе лежит TLC, а не классическая логика первого порядка.

Умолчания в TDLC имеют вид $A : M \cdot B/B$, где A и B — формулы TLC.

Систему логики TDLC составляют темпоральные теории с умолчаниями $\Delta t = \langle D^t, F^t, P, ck \rangle$, где D^t — множество темпоральных умолчаний; F^t — множество формул TLC; P — множество всех предикатных символов, встречающихся в элементах множеств D^t и F^t ; ck — назначение часов, ставящее в соответствие каждому предикатному символу из P некоторую последовательность натуральных чисел («локальные часы»).

Теории с умолчаниями в TDLC аналогичны так называемым нормальным теориям с умолчаниями, множество которых является подмножеством всех теорий с умолчаниями в DL. Как и для нормальных теорий с умолчаниями, для теорий с умолчаниями в TDLC можно показать, что они всегда имеют хотя бы одно расширение.

Темпоральная логика умолчаний $TDLC_0$ отличается от TDLC тем, что в ее основе лежит упрощенный пропозициональный вариант TLC, называемый TLC_0 , а также ограничениями, наложенными на синтаксис умолчаний, в частности, теории с умолчаниями не обязательно должны быть нормальными. Умолчания в $TDLC_0$ имеют вид

$$A_1 \wedge \dots \wedge A_n : MB_1, \dots, MB_m / C,$$

где $A_1, \dots, A_n, B_1, \dots, B_m, C$ — темпоральные или модальные литеры.

Темпоральная логика умолчаний $TDLC_0$ является обобщением $TDLC_0$. Умолчания здесь имеют вид $\varphi : \psi_1, \dots, \psi_m/\lambda$, где $\varphi, \psi_1, \dots, \psi_m, \lambda$ — любые формулы TLC_0 .

Рассмотрим темпоральный вариант логики минимальной веры и отрицания по умолчанию MBNF. Логика MBNF является бимодальной немонотонной системой, позволяющей моделировать поведение во времени разумного агента, способного к интроспективным рассуждениям и делающим выводы на основе как того, что он знает, так и того, чего он НЕ знает. MBNF базируется на TLC_0 , в алфавит которой добавлены два эпистемических модальных оператора: B (минимальная вера) и not (отрицание по умолчанию).

Семантика MBNF строится аналогично семантике логики MBNF. Отличие состоит в том, что интерпретационную структуру формул здесь образует пара не обязательно различных мно-

жеств темпоральных интерпретаций в смысле TLC_0 , а не множеств интерпретаций в смысле классической пропозициональной логики, как в оригинале.

Множества интерпретаций могут трактоваться как универсальные структуры Крипке, т. е. как структуры возможных миров, в которых каждый мир (темпоральная интерпретация) достижим из любого другого мира. В связи с тем, что отношение достижимости в таких структурах универсально, без потери общности можно идентифицировать универсальную структуру Крипке с множеством интерпретаций. Немонотонный характер MBNF и MBNF обеспечивается посредством определения отношения предпочтения на множестве интерпретационных структур.

Несмотря на то что исследования в области формализации немонотонных рассуждений активно ведутся, подходов, учитывающих специфику рассуждений в условиях жесткого реального времени, было предложено сравнительно немного. Среди них выделяется концепция активной логики, которая развивается исследователями, входящими в Activ Logic Group, University of Maryland, и является одной из наиболее хорошо известных разработок по данной теме для систем жесткого реального времени. Суть ее состоит в том, что моделируемый процесс рассуждения рассматривается как некоторая последовательность событий, которые могут быть соотнесены с моментами времени (reasoning situated in time). Время, таким образом, является при проведении рассуждений «во времени» важным ресурсом, от состояния которого зависят результаты этих рассуждений.

Примером конкретной реализации концепции активной логики является формализм, отвечающий принципам логического программирования и рассматриваемый как система, основанная на правилах и, таким образом, ближе связанный со спецификой динамических экспертных систем [2]. Систему данного формализма составляют так называемые шаговые теории, представляющие собой пару $T = (R, >)$, где R — конечное множество правил двух видов: строгих и правдоподобных, а $>$ есть ациклическое отношение предпочтения, заданное на множестве R . Доказательством в теории T называется конечная последовательность B множеств вида $\{\text{now}(i) \cup L_i\}$, где i — номер элемента последовательности; L_i — множество помеченных литералов (множеств мнений) следующих четырех типов: strict q, infer q, dis-trusted q, reinstate q, где q — любой пропозициональный литерал. Эти типы понимаются, соответственно, как «литерал, выводимый строго», «литерал, выводимый правдоподобно», «литерал, к которому утрачено доверие», «литерал, к кото-

рому восстановлено доверие». $B(i)$ обозначает i -й элемент последовательности множеств мнений в доказательстве. Последним элементом последовательности является множество мнений B_{fin} такое, что дальнейшие шаги вывода не приводят к изменению являющегося его подмножеством множества помеченных литералов (меняется только значение i в элементе $pow(i)$). Следствием шаговой теории T является помеченный литерал любого из указанных четырех типов, представляющий собой элемент множества B_{fin} . Переход от текущего множества мнений к новому (шаг вывода) осуществляется посредством всех возможных применений специальных правил вывода четырех типов (по одному для каждого из типов помеченных литералов). Эти правила не следует путать с правилами из множества R ; по отношению к ним правила вывода играют ту же роль, что в классической логике правило Modus Ponens играет по отношению к материальной импликации. Результаты каждого шага вывода полностью определяются текущим множеством мнений. Возможность соотносить результаты рассуждения с моментами времени (темпоральная чувствительность) достигается посредством использования ссылок в антецедентах строгих и правдоподобных правил на литералы вида $pow(i)$. Построенная таким образом немонотонная темпоральная логическая система позволяет формализовать рассуждения, свойства которых удовлетворяют специфике систем жесткого реального времени, и может быть использована в качестве формализованного инструмента синтеза архитектуры системы моделирования сложного динамического объекта.

Архитектура комплекса моделирования корабельной автоматизированной системы управления

Предлагаемые формализованные структуры использованы для решения задачи синтеза архитектуры системы моделирования корабельной автоматизированной системы управления. Архитектура проектируется как множество интеллектуальных агентов на основе концепции активной логики, распределенных по сети, мигрирующих по ней в поисках релевантных данных, знаний и процедур и кооперирующихся в процессе поиска решений. Каждый из интеллектуальных агентов проектируется как носитель фрагмента знаний, доступных другим агентам.

Система имитационного моделирования (ИМ) представляет собой распределенную многоагентную систему имитационного моделирования, включающую в себя универсальную и специализированную системные компоненты [3].

Специализированная системная компонента включает: имитационные модели функционирования; имитационные модели процессов; штатное оборудование и программное обеспечение объектов; технологическое программное обеспечение; базы данных характеристик процессов и систем.

Универсальная компонента обеспечивает распределенный интерактивный режим работы, не зависящий от состава и сложности решаемых задач, за счет: распределенной обработки приложений на принципах архитектуры «клиент—сервер», использования объектно-ориентированного подхода, развитости интерфейсной части с прикладными системами, широких графических возможностей, а также встроенных средств удаленного мониторинга и управления.

Ядром универсальной компоненты является система моделирования и интеллектуального управления, построенная на базе инструментария динамических экспертных систем жесткого реального времени.

Универсальная системная компонента включает:

- инструментальную среду разработки динамических экспертных систем, систему управления распределенными базами данных и базами знаний (БЗ);
 - систему генерации имитационных моделей внешней среды и формирования сценариев действия внешней среды;
 - картографическую систему;
 - компьютерную сеть, функционирующую на основе протокола TCP/IP, как средство информационного обмена и межсетевое взаимодействие с территориально удаленными испытательными стендами и объектами;
 - системы графического отображения исследуемых процессов на базе проекционных систем и мультимедиапроекторов;
 - систему многоагентного интеллектуального управления сложными объектами с использованием сетевых протоколов высокопроизводительных вычислений и многозвенных моделей межсетевого взаимодействия.
- Основные функции системы многоагентного интеллектуального управления:
- загрузка сценариев, подготовленных для моделирования. Обеспечивается возможность одновременной загрузки и параллельного выполнения нескольких сценариев (их количество ограничивается только объемом памяти компьютера и его производительностью);
 - отображение одного или нескольких параллельно выполняющихся процессов моделирования;
 - динамическое отображение поведения объекта на реальной карте;

- интерактивное изменение параметров движения и координат объектов;
- динамическое «связывание» моделей систем, участвующих в работе;
- информационная поддержка всех динамических процессов моделирования;
- регистрация и накопление в протоколе моделирования основных событий. В протокол заносятся описания исходной и конечной ситуаций, все действия по управлению и изменению параметров работы систем.

Система генерирует графическую среду проектирования моделей процессов, объектно-ориентированную подсистему имитации для функционирования моделей и создает инструментарий для установки и измерения временных, точностных и других показателей эффективности процессов. Система автоматически «оживляет» разработанную модель, облегчая визуализацию исполнения любых процессов. При этом обеспечивается автоматическая фиксация метрик анализируемых процессов. Эта возможность позволяет проводить эксперименты с различными организационными и техническими структурами, сравнивая их по временным, точностным и количественным характеристикам. Кроме того, используется широкий спектр средств проведения факторного анализа, с помощью которого достаточно быстро можно определить, как добавление ресурсов в ключевых точках процесса повлияет на его исполнение.

Система использует ряд базовых компонент, на основе которых строится модель процессов. К ним относятся сценарии, блоки, инструменты, ресурсы, рабочие объекты. Сценарии управляют механизмами моделирования дискретных событий и позволяют определить одновременное исполнение нескольких моделей. Блоки выполняют такие операции над объектами, как создание объектов, исполнение функций, установление и разрыв ассоциаций между объектами, удаление объектов. Инструменты позволяют получать и отображать в числовой и графической форме данные о выполнении моделируемых процессов, а также вводить в заданных точках модели необходимые значения параметров. Ресурсы служат для ограничения исполняемых операций на основе объема и состава наличных ресурсов. Рабочие объекты проходят через блоки модели и обрабатываются ими, аккумулируя результаты работы в каждой точке моделируемого процесса. Выполняемые приложения не представляют собой единый блок. Они структурируются с помощью «модулей» и «рабочих пространств» на легко управляемые части и организованы в виде БЗ, совместно используемых в различных приложениях.

В системе введены три вида переменных: собственно переменные, параметры и простые атрибуты. Параметры получают значения в результате работы «машины вывода» или выполнения какой-либо процедуры. Переменные представляют собой измеряемые характеристики объектов ИМ и поэтому имеют специфические черты: время жизни значения и источник данных. Время жизни значения переменной определяет промежуток времени, в течение которого это значение актуально, по истечении этого промежутка переменная считается не имеющей значения. В отличие от переменных, параметры всегда имеют значение, так как они либо заданы в качестве начальных значений, либо повторно вычислены механизмом вывода.

Поскольку системе может потребоваться текущее значение переменной, для каждой из них определен источник данных (сервер данных). Источником данных для переменной могут служить «машина вывода», подсистема ИМ или внешний источник данных (базы данных, штатное оборудование, имитационные модели и т. п.).

Параметры получают новые значения после выполнения специальных операторов в заключенных правилах или процедур.

Вся БЗ условно разделена на три части — имитационная модель, интерфейс (как пользовательский, так и с внешними системами) и вспомогательные классы, объекты и функции.

База знаний для экспертных систем жесткого реального времени строится на основе методов формализации темпоральных рассуждений, позволяющих формализовать проводимые в условиях жесткого дефицита времени немонокотонные рассуждения о свойствах изменяющейся внешней среды. Методы формализации рассуждений в экспертных системах жесткого реального времени обеспечивают эффективное решение задач моделирования поведения объекта. Дефицит времени в таких системах является основным фактором, обуславливающим неполноту и ненадежность используемых знаний и данных. В технологии экспертных систем жесткого реального времени в настоящее время отсутствует необходимая база для формализации корректных темпоральных рассуждений, проводимых при решении задач формирования темпоральных БЗ в условиях жесткого дефицита времени, которое отведено на выработку управляющих решений. Дефицит времени часто оказывается причиной неполноты и ненадежности имеющейся информации, что, в свою очередь, ведет к невозможности при решении задач проводить абсолютно надежные общезначимые рассуждения, а вместо этого заставляет прибегать к рассуждениям, имеющим предположительный характер.

Следует выделить гибридную модель представления знаний, объединяющую характеристики продукционных моделей с нетрадиционными логическими моделями, и сравнительные оценки вычислительной сложности предлагаемых темпоральных рассуждений.

Гибридная модель представления знаний для экспертных систем жесткого реального времени объединяет продукционные модели представления знаний с нетрадиционными логическими моделями, в частности, с немонотонной темпоральной логикой умолчаний. Такое объединение должно позволить оптимизировать соотношение между выразительными возможностями и сложностью вычислений. Гибридные модели для экспертных систем жесткого реального времени должны допускать использование операторов как традиционного отрицания (из классической логики), так и отрицания по умолчанию.

Формализм TDLCprod может служить основой для формирования темпоральных БЗ для экспертных систем жесткого реального времени при поступлении новой информации из внешней среды. В отличие от известных аналогичных алгоритмов он способен учитывать специфику систем реального времени, в частности, асинхронное поступление входной информации от сенсоров.

В экспертных системах жесткого реального времени знания хранятся в двух типах файлов: базы знаний и библиотеки знаний (БиЗ). В файлах БЗ хранятся знания о приложениях: определения всех объектов, объекты, правила, процедуры и т. п. В файлах БиЗ хранятся общие знания, которые могут быть использованы более чем в одном приложении, например определение стандартных объектов. Файлы БЗ имеют расширение kb (knowledge base), а файлы БиЗ — kl (knowledge libraries). Файлы БЗ можно путем замены расширения преобразовать в БиЗ и обратно.

В целях обеспечения повторной используемости приложений реализовано средство, позволяющее объединять ранее созданные kb- и kl-файлы с текущим приложением. При этом система автоматически выявляет и выводит на дисплей конфликты в объединяемых знаниях. Знания структурируются следующими способами: иерархия классов, иерархия модулей, иерархия рабочих пространств. Каждая из указанных иерархий может быть показана на дисплее структуры данных. Данные представляются в виде классов объектов (определений объектов), имеющих определенные атрибуты. Классы наследуют атрибуты от суперклассов и передают свои атрибуты подклассам. Каждый класс (исключая корневой) может иметь конкретные экземпляры класса. Использование механизма множественного наследования позволяет легко произвести новый класс

и решить проблему конфликтов между именами атрибутов. Все, что хранится в БЗ и чем оперирует система, является экземпляром того или иного класса. Все синтаксические конструкции тоже являются классами. Для сохранения общности даже базовые типы данных — символьные, числовые, булевские и истинностные значения нечеткой логики — представлены соответствующими классами. Описание класса (тоже экземпляр специального класса) включает ссылку на суперкласс (is-а-иерархия) и перечень атрибутов, специфичных для класса (part-of-иерархия).

Система не является единым блоком. Она структурируется с помощью модулей и рабочих пространств на легко управляемые фрагменты. Несмотря на то что функции модулей и рабочих пространств похожи, между ними есть существенные различия. Приложение может быть организовано в виде одной БЗ или в виде нескольких БЗ, являющихся модулями. Модули приложения организованы в древовидную иерархию с одним модулем верхнего уровня. Модули следующего уровня состоят из тех модулей, без которых не может работать модуль предыдущего уровня. Рабочие пространства являются «контейнерным» классом, в котором размещаются другие классы и их экземпляры, например объекты, связи, правила, процедуры и т. д. Каждый модуль (БЗ) может содержать любое количество рабочих пространств. Рабочие пространства образуют одну или несколько древовидных иерархий с отношением is-a-part-of (является частью). С каждым модулем ассоциируется одно или несколько рабочих пространств верхнего (нулевого) уровня, каждое из этих рабочих пространств является корнем соответствующей древовидной иерархии. В свою очередь, с каждым объектом (определением объекта или связи), расположенным в нулевом уровне, может быть ассоциировано рабочее пространство первого уровня, связанное с ним отношением «является частью», и т. д.

Различие между модулями и рабочими пространствами состоит в следующем. Модули разделяют приложение на отдельные БЗ, совместно используемые в различных приложениях. Динамические модули (аналог библиотек динамического связывания) могут программно подгружаться и вытесняться из оперативной памяти во время исполнения и одновременно использоваться несколькими приложениями. Рабочие пространства выполняют свою роль при исполнении приложения. Они содержат в себе (и в своих подпространствах) различные сущности и обеспечивают разбиение приложения на небольшие части, которые легче понимать и обрабатывать. Весь процесс разбивается на подпроцессы, и с каждым подпроцессом ассоциируется свое подпростран-

ство. Рабочие пространства могут устанавливаться в активное или неактивное состояние (т. е. сущности, находящиеся в этом пространстве и в его подпространствах, становятся невидимыми для механизма вывода). Механизм активации (деактивации) рабочих пространств используется при наличии альтернативных групп правил, когда активной должна быть только одна из альтернативных групп. Кроме того, рабочие пространства используются для задания пользовательских ограничений, определяющих поведение приложения для различных категорий пользователей.

Заключение

Построенная в статье немонотонная темпоральная логическая система позволяет формализовать рассуждения, свойства которых удовлетворяют специфике систем жесткого реального времени, и обеспечивает более эффективную реализацию по сравнению с большинством существующих логик. Предлагаемые формализован-

ные структуры использованы для решения задачи синтеза архитектуры комплекса моделирования корабельной автоматизированной системы управления.

Литература

1. Liu C., Orgun M. A. Verification of reactive systems using temporal logic with clocks // Theoretical Computer Science. 1999. Vol. 220. P. 58–82.
2. Виньков М. М., Фоминых И. Б. Темпоральные немонотонные логические системы: взаимосвязи и вычислительная сложность // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008. № 4. С. 71–86.
3. Виньков М. М., Лапшин К. В., Фоминых И. Б. Проектирование систем управления сложными динамическими объектами // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Тр. V Междунар. науч.-практ. конф., Коломна, 28–30 мая 2009 г. М.: Физматлит, 2009. Т. 2. С. 123–132.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Информационно-управляющие системы» выходит каждые два месяца. Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 3600 руб., для зарубежных подписчиков — 4200 руб., включая НДС 18 % и почтовые расходы.

На электронную версию нашего журнала вы можете подписаться на сайте *РУНЭБ* (<http://www.elibrary.ru>).

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогам:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс;

«Пресса России» — № 42476,

а также используя услуги посредников:

«Издательский дом «Экономическая газета»:

Москва, тел.: (499) 152-88-51, 661-20-30, e-mail: akdi@akdi.ru, izdatcat@eg-online.ru;

«Северо-Западное Агентство «Прессинформ»:

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05, факс: (812) 337-16-27,

e-mail: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru, сайт: <http://www.pinform.spb.ru>;

Подписное агентство «МК-Периодика» (РФ + 90 стран):

тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47, факс: (495) 681-37-98,

e-mail: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>;

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье):

тел.: (495) 787-38-73 (многоканальный), факс: (495) 152-54-81,

e-mail: Alfimov@viniti.ru, сайт: <http://www.informnauka.com>;

«Артос-Гал»:

Москва, тел.: (495) 603-27-28, 603-27-33, 603-27-34, факс: (495) 603-27-28,

сайт: <http://www.artos-gal.mpi.ru/index.html>;

«Интерпочта»:

Москва, тел.: (495) 500-00-60, 580-95-80,

e-mail: interpochta@interpochta.ru, сайт: <http://www.interpochta.ru>;

Краснодар, тел.: (861) 210-90-00, 210-90-01, 210-90-55, 210-90-56, e-mail: krasnodar@interpochta.ru;

Новороссийск, тел.: (8617) 67-04-74;

и др.

УДК 621.396.06

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭХО-СИГНАЛОВ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, НАБЛЮДАЕМЫХ БОРТОВЫМИ ЛОКАТОРАМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. Е. Сесин,

заместитель генерального директора
ФГУП ОКБ «Электроавтоматика»

Д. А. Шепета,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Предлагается математическая модель эхо-сигналов морской поверхности, наблюдаемых в стробе дальности бортовых локаторов летательных аппаратов. Модель построена на основе экспериментальных данных, что позволяет моделировать работу бортовых комплексов летательных аппаратов в условиях, приближенных к натурным испытаниям.

Ключевые слова — математическая модель, корреляционная функция, локационный сигнал, морская поверхность.

Введение

Математические модели эхо-сигналов морской поверхности необходимы как при синтезе, так и при анализе работы бортовых локаторов летательных аппаратов (ЛА), осуществляющих поиск, обнаружение и сопровождение надводных объектов. В работе рассматриваются пространственно-временные корреляционные функции эхо-сигнала морской поверхности, наблюдаемого в стробе дальности бортового локатора ЛА. Предлагаемые аналитические выражения, используемые для аппроксимации корреляционных функций, основаны на экспериментальных данных и многомерной логарифмически-нормальной модели флуктуаций огибающей эхо-сигнала.

Математическая модель эхо-сигналов морской поверхности

Локационный сигнал, отраженный от протяженного объекта, в частности от морской поверхности, является случайным процессом. При импульсном режиме локации с периодом $T_{\text{РЛС}}$ этот сигнал, наблюдаемый в стробе дальности приемного устройства длительностью τ_g , представляет собой отрезки случайного узкополосного процес-

са длительностью τ_g , следующие с периодом повторения $T_{\text{РЛС}}$.

При построении математической модели узкополосного процесса можно построить модели либо двух квадратур ($U(t)$, $V(t)$), либо огибающей $A(t)$ и фазы $\Phi(t)$ эхо-сигнала. Поскольку в научной литературе, посвященной экспериментальным исследованиям, приводятся данные только об огибающей эхо-сигналов морской поверхности, то рассмотрим процесс ($A(t)$, $\Phi(t)$), заменив непрерывную реализацию процесса ее дискретным аналогом ($A(t)$, $\Phi(t)$) = $\{A(t = (i - 1)\Delta T)$, $\Phi(t = (i - 1)\Delta T)\}$, $i = 1, 2, \dots$, где ΔT — интервал дискретизации.

Для определения математической модели необходимо задать многомерную совместную плотность (функцию) распределения случайных величин (\mathbf{A}_N , $\mathbf{\Phi}_N$) при произвольном наборе индексов, где \mathbf{A}_N , $\mathbf{\Phi}_N$ — N -мерные векторы. В научных источниках отсутствуют какие-либо сведения о функциональном виде плотности распределения $w(\mathbf{A}_N, \mathbf{\Phi}_N)$, но имеются данные об одномерных законах распределения огибающей эхо-сигнала $w(A)$ и о корреляционно-спектральных характеристиках огибающей [1–3]. Что же касается статистических характеристик вектора фаз, то в экспериментальных работах они практически не представлены. Поэтому при выборе вида

$w(A_N, \Phi_N)$ остается опираться лишь на сведения о виде $w(A)$ и на корреляционно-спектральные характеристики огибающей эхо-сигнала.

В качестве $w(A)$ использовались различные плотности распределения, наиболее распространены аппроксимации $w(A)$ в виде распределения Релея, Релея—Райса, хи-квадрат, Накагами, логарифмически-нормального распределения и некоторых других. Наибольшее распространение получило логарифмически-нормальное распределение, которое не только хорошо согласуется с многочисленными экспериментальными данными [1–3], но и позволяет синтезировать эффективные алгоритмы моделирования флуктуаций огибающей сигнала [4, 5]. Поэтому в качестве плотности распределения огибающей эхо-сигнала морской поверхности принимаем логарифмически-нормальный закон распределения.

Плотность распределения огибающей локационного сигнала, отраженного от поверхности моря

Рассмотрим двойную индексацию отсчетов огибающей: отсчет A_{ij} — j -й отсчет огибающей в i -м стробе дальности, $i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots, M$, т. е. отсчет A_{ij} обусловлен отражением i -го локационного импульса длительностью τ_z от j -й дорожки дальности; $M = E[\tau_g/\Delta T]$ — количество отсчетов огибающей в стробе приемника, взятых через интервал дискретизации ΔT ; $E[\cdot]$ — функция Антье.

Такая двойная индексация удобна как при рассмотрении физики процесса, так и при синтезе алгоритмов моделирования, т. е. при построении имитационной модели. При рассмотрении корреляционно-спектральных характеристик огибающей сигнала достаточно использовать двумерную маргинальную плотность распределения, которую запишем в виде [2, 5]

$$w(A_{ij}, A_{nm}) = \frac{1}{2\pi\sigma_{ij}\sigma_{nm}A_{ij}A_{nm}\sqrt{1-r_{ijnm}^2}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2(1-r_{ijnm}^2)}\left[\frac{1}{\sigma_{ij}^2}\ln^2\frac{A_{ij}}{\bar{A}_{ij}} + \frac{1}{\sigma_{nm}^2}\ln^2\frac{A_{nm}}{\bar{A}_{nm}} - 2r_{ijnm}\frac{1}{\sigma_{ij}}\ln\frac{A_{ij}}{\bar{A}_{ij}}\frac{1}{\sigma_{nm}}\ln\frac{A_{nm}}{\bar{A}_{nm}}\right]\right\},$$

где \bar{A}_{ij} и σ_{ij} — параметры распределения, связанные с математическим ожиданием \tilde{A}_{ij} и дисперсией $\tilde{\sigma}_{ij}^2 = \tilde{D}_{ij}$ распределения соотношениями [2, 6]

$$\begin{cases} \bar{A}_{ij} = \tilde{A}_{ij} / \sqrt{1 + (\tilde{\sigma}_{ij} / \tilde{A}_{ij})^2}; \\ \sigma_{ij}^2 = \ln(1 + (\tilde{\sigma}_{ij} / \tilde{A}_{ij})^2) = \ln(1 + K_{ij}^2), \end{cases}$$

где $K_{ij} = \tilde{\sigma}_{ij} / \tilde{A}_{ij}$ — коэффициент вариации логарифмически-нормального распределения, а \tilde{A}_{ij} —

определяется по формулам радиолокации. Параметр

$$r_{ijnm} = \frac{\ln(1 + K_{ij}K_{nm}R_{ijnm})}{\sqrt{\ln(1 + K_{ij}^2)\ln(1 + K_{nm}^2)}}, \quad (1)$$

а R_{ijnm} — коэффициент корреляции между j -м отсчетом огибающей i -го строба и m -м отсчетом огибающей n -го строба, $i, n = 1, 2, \dots; j, m = 1, 2, \dots, M$. Физический смысл параметра r_{ijnm} — коэффициент корреляции между логарифмом j -го отсчета огибающей эхо-сигнала при i -м зондировании и логарифмом m -го отсчета огибающей при n -м зондировании. Соответственно, при $i = n$ и $j = m$ коэффициенты корреляции $R_{ijnm} = R_{ijij} = R_{nmnm} = 1$ и $r_{ijnm} = r_{ijij} = r_{nmnm} = 1$.

В научных источниках по экспериментальным исследованиям эхо-сигналов морской поверхности, как правило, содержатся сведения не о пространственно-временных характеристиках сигнала, а лишь о сечениях пространственно-временной корреляционной функции. Приводятся сведения о пространственной корреляционной функции $R^{(n)}(\Delta l)$ и о временной корреляционной функции $R^{(b)}(\tau)$, где Δl — расстояние по горизонтали между двумя участками (дорожками дальности) морской поверхности, а τ — временной интервал между эхо-сигналами одного и того же участка морской поверхности [2, 3].

В дальней зоне наблюдения корреляция между j -м и m -м отсчетами эхо-сигнала в пределах строба τ_g , $j, m = 1, 2, \dots, M$, определяется в основном только пространственным разнесением участков морской поверхности, обуславливающих эти отсчеты эхо-сигнала. Поэтому можно считать, что $R_{ijim} = R^{(n)}(\Delta l)$ является пространственной корреляционной функцией, т. е.

$$R_{ijim} = R^{(n)}(\Delta l = |j - m|\Delta Tc / (2\cos\bar{\theta}_i)) = R^{(n)}(\tau' = |j - m|\Delta T) = R^{(n)}(\tau'), \quad (2)$$

$R^{(n)}(\tau')$ — пространственная нормированная корреляционная функция или функция коэффициентов корреляции внутрипериодных флуктуаций (флуктуаций сигнала в пределах строба τ_g), $\tau' = |j - m|\Delta T$ — расстояние между отсчетами в стробе приемного устройства; c — скорость света. В выражении (2) принято, что в дальней зоне наблюдения морской поверхности угол визирования $\theta_{ij} \approx \bar{\theta}_i$ для $i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots, M$.

При неподвижной антенне или при слежении за наблюдаемым участком морской поверхности корреляционная функция $R_{ijnj} = R_j^{(b)}(\tau) = R^{(b)}(\tau)$ является временной корреляционной функцией

$$R_{ijnj} = R^{(b)}(\tau = |i - n|T_{РЛС}) = R^{(b)}(\tau),$$

т. е. корреляционной функцией межпериодных флуктуаций. В дальней зоне наблюдения в пределах строба τ_g расстояния между отсче-

тами эхо-сигнала $\tau' = |j - m| \Delta T \leq \tau_g \ll T_{\text{РЛС}}$, поэтому временная корреляционная функция в пределах строга практически равна единице: $R_{ijjm} = R_i^{(B)}(\tau' = |j - m| \Delta T) \leq R_i^{(B)}(\tau_g) \approx R^{(B)}(\tau_g) \approx 1$ для $i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots, M$.

Таким образом, при указанных выше условиях выполняются соотношения

$$\begin{cases} R_{ijnj} = R_{imnm} = R_{in}^{(B)} = R^{(B)}(|i - n| T_{\text{РЛС}}) = R^{(B)}(\tau); \\ R_{ijjm} = R_{njnm} = R_{jm}^{(n)} = R^{(n)}(|j - m| \Delta T) = R^{(n)}(\tau'). \end{cases} \quad (3)$$

При выполнении соотношений (3) будут с большей точностью выполняться и равенства для отсчетов логарифма огибающих, т. е. для параметров r_{ijnm} :

$$\begin{cases} r_{ijnj} = r_{imnm} = r_{in}^{(B)} = r^{(B)}(|i - n| T_{\text{РЛС}}) = r^{(B)}(\tau); \\ r_{ijjm} = r_{njnm} = r_{jm}^{(n)} = r^{(n)}(|j - m| \Delta T) = r^{(n)}(\tau'). \end{cases} \quad (4)$$

Выполнение равенств (4) значительно упрощает синтез алгоритмов моделирования флюктуаций эхо-сигналов морской поверхности. Будем считать, что равенства (4) точные без наложения каких-либо условий, тогда равенства (3) также будут выполнены с большой точностью в дальней зоне, для которой, как указано выше, $\theta_{ij} \approx \bar{\theta}_i$ и $R^{(B)}(\tau_g) \approx 1, i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots, M$.

Восстановить пространственно-временную корреляционную функцию эхо-сигналов морской поверхности R_{ijnm} по ее сечениям невозможно. Однако ее можно определить таким образом, что ее сечения будут совпадать с сечениями действительной пространственно-временной корреляционной функции, и кроме того, она будет связана с пространственно-временной корреляционной функцией логарифма огибающей соотношением (1). Определим R_{ijnm} в виде [4, 5]

$$\begin{aligned} R_{ijnm} &= \frac{1}{K_{ij} K_{nm}} \left(\exp \left(r_{ijnm} \times \right. \right. \\ &\times \left. \sqrt{\ln(1 + K_{ij}^2) \ln(1 + K_{nm}^2)} \right) - 1 \Big) = \frac{1}{K_{ij} K_{nm}} \times \\ &\times \left(\exp \left(r_{jm}^{(n)} r_{in}^{(B)} \sqrt{\ln(1 + K_{ij}^2) \ln(1 + K_{nm}^2)} \right) - 1 \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Такая аппроксимация позволяет точно (без методической ошибки) воспроизводить пространственно-временные сечения пространственно-временной корреляционной функции, а также использовать для синтеза имитационных моделей эхо-сигналов морской поверхности метод многомерных нелинейных формирующих фильтров, что резко повышает скорость процесса моделирования [4]. При этом статистические характеристики имитационной модели совпадают с известными экспериментальными характеристиками эхо-сигналов морской поверхности.

Пространственная корреляционная функция локационного сигнала, отраженного от поверхности моря

Рассмотрим сначала пространственную корреляционную функцию $R_{jm}^{(n)} = R^{(n)}(|j - m| \Delta T) = R^{(n)}(\tau')$, где $\tau' = |j - m| \Delta T$. В дальней зоне $\theta_{ij} = \bar{\theta}_i$ и $K_{ij} = K_i$, т. е. при любом i коэффициент вариации от номера дорожки дальности не зависит, поэтому

$$\begin{aligned} R_{ijjm} &= \frac{1}{K_{ij} K_{im}} \left(\exp \left(r_{ijjm} \sqrt{\ln(1 + K_{ij}^2) \ln(1 + K_{im}^2)} \right) - 1 \right) = \\ &= \frac{1}{K_i^2} \left(\exp \left(r_{jm}^{(n)} \sqrt{\ln(1 + K_i^2) \ln(1 + K_i^2)} \right) - 1 \right) = \\ &= \frac{1}{K_i^2} \left((1 + K_i^2)^{r_{jm}^{(n)}} - 1 \right). \end{aligned}$$

В научных источниках для сантиметрового диапазона волн приведена зависимость коэффициента корреляции эхо-сигнала в строге дальности $R^{(n)}(\tau' = \tau_3) = R^{(n)}(\tau_3)$ между отсчетами огибающей, отстоящими на длительность зондирующего импульса τ_3 [2, 5]:

$$R^{(n)}(\tau_3) = 1 - \left(0,3 - 7 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{\theta}_i + 0,18 \sin \psi_i - \frac{0,02}{W_i} \right) \frac{\tau_3}{1,5},$$

где $\bar{\theta}_i$ и ракурс волн ψ_i — в градусах; волнение моря W_i — в баллах; τ_3 — в микросекундах. Формулой можно пользоваться при следующих ограничениях: $0,5^\circ \leq \bar{\theta}_i \leq 10^\circ, 0^\circ \leq \psi_i \leq 180^\circ, 1 \text{ балл} \leq W_i \leq 6 \text{ баллов}, 1 \text{ мкс} \leq \tau_3 \leq 3 \text{ мкс}$. Поскольку можно считать, что за время работы системы ψ_i и W_i существенно не меняются, то при малых $\bar{\theta}_i$ коэффициент корреляции $R^{(n)}(\tau_3)$ не зависит от номера строга, поэтому индекс i здесь опущен и $R_i^{(n)}(\tau_3) = R^{(n)}(\tau_3)$.

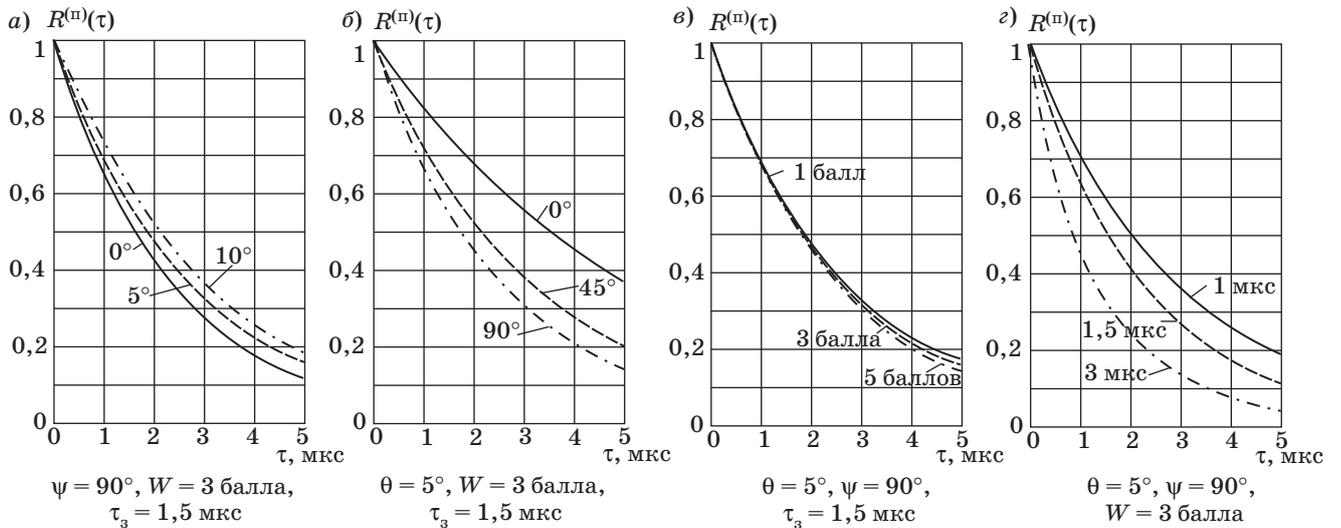
Аппроксимируем пространственную корреляционную функцию $R_{jm}^{(n)} = R^{(n)}(|j - m| \Delta T)$ кривой, определенной выражением (5):

$$R_{jm}^{(n)} = \frac{1}{K_{ij} K_{im}} \left[\exp \left(\sqrt{\ln(1 + K_{ij}^2) \ln(1 + K_{im}^2)} r_{jm}^{(n)} \right) - 1 \right],$$

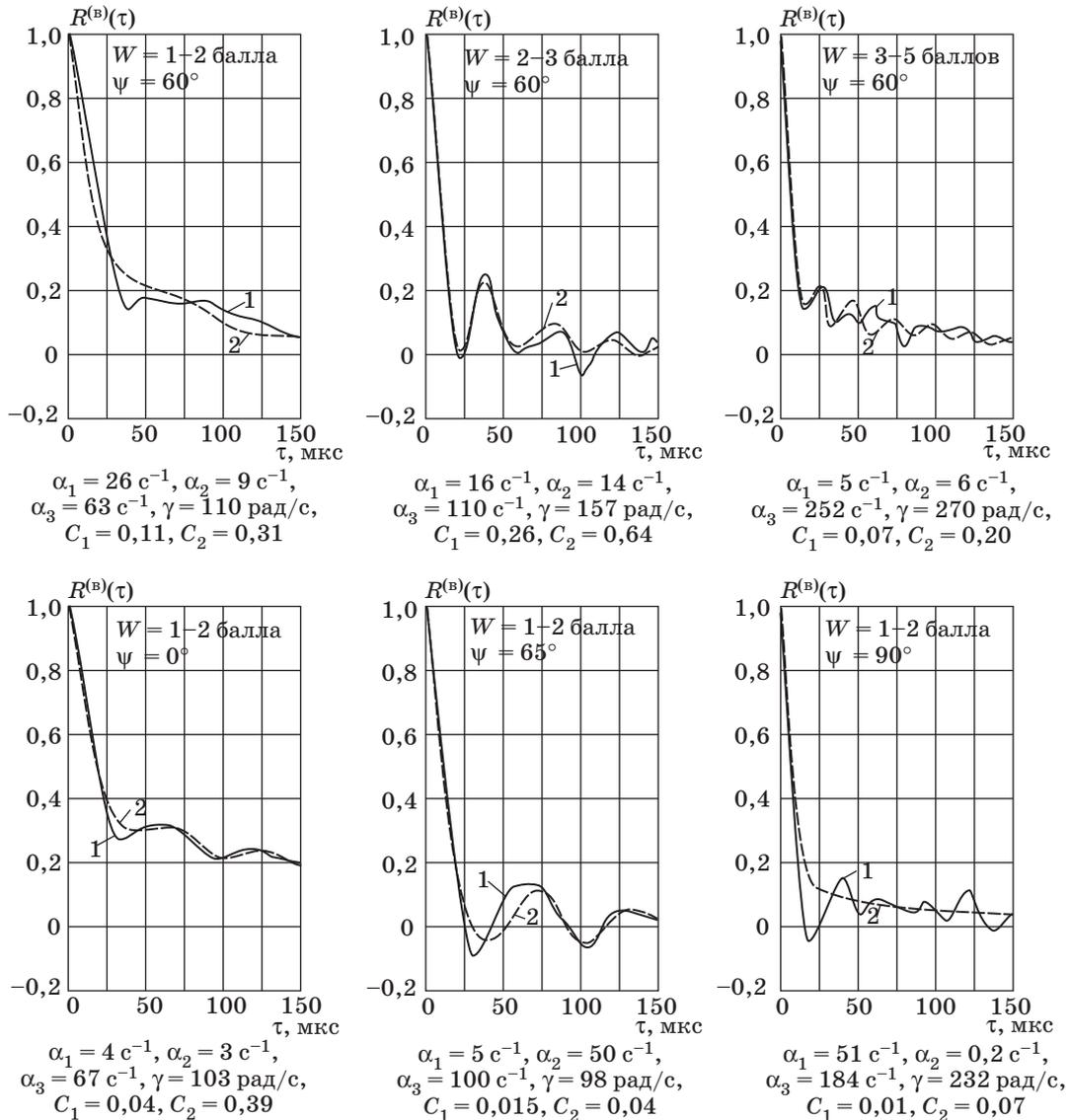
где $r_{jm}^{(n)} = r^{(n)}(|j - m| \Delta T)$ — функция, соответствующая корреляционной функции нормального марковского процесса. В дальней зоне $K_{ij} = K_{im} = K_i$, можно считать даже $K_{ij} = K_{im} = K_i = K$, что для неподвижной антенны выполняется точно, поэтому

$$\begin{aligned} R_{jm}^{(n)} &= R^{(n)}(|j - m| \Delta T) = \\ &= \frac{1}{K_i^2} \left[\exp \left(r_{jm}^{(n)} \ln(1 + K_i^2) \right) - 1 \right] = \frac{1}{K_i^2} \left[(1 + K_i^2)^{r_{jm}^{(n)}} - 1 \right]. \end{aligned}$$

Для марковского процесса первого порядка $r_{jm}^{(n)} = r(\tau')$ имеет вид



■ Рис. 1. Пространственные корреляционные функции $R^{(n)}(\tau)$ в зависимости от θ (а); ψ (б); W (в); τ (г)



■ Рис. 2. Временные корреляционные функции: 1 — экспериментальные; 2 — модели

$$r_{jm}^{(n)} = r^{(n)}(|j-m|\Delta T) = r^{(n)}(\tau') = \exp(-\alpha|j-m|\Delta T) = \exp(-\alpha\tau'),$$

где α — некоторый коэффициент, который определяется из вышеприведенных выражений приравниванием $\tau' = \tau_3$:

$$\alpha = -\frac{1}{\tau_3} \ln \frac{\ln(1 + K_i^2 R^{(n)}(\tau_3))}{\ln(1 + K_i^2)}.$$

Расчеты $\tau_{0,5}^{(n)}$ и $R^{(n)}(\tau_3)$ показывают, что в дальней зоне α можно считать константой, слабо зависящей от условий наблюдения морской поверхности. На рис. 1, $a-z$ представлены пространственные корреляционные функции эхо-сигналов морской поверхности, рассчитанные по приведенным выше выражениям.

Временная корреляционная функция локационного сигнала, отраженного от поверхности моря

Перейдем теперь к рассмотрению временных корреляционных функций $R_{in}^{(b)} = R^{(b)}(|i-n|T_{РЛС}) = R^{(b)}(\tau = |i-n|T_{РЛС}) = R^{(b)}(\tau)$ — корреляционных функций межпериодных флюктуаций огибающей эхо-сигнала морской поверхности. Аппроксимируем $R_{in}^{(b)}$ кривой, соответствующей выражению (5):

$$R_{in}^{(b)} = R^{(b)}(|i-n|T_{РЛС}) = R^{(b)}(\tau) = \frac{1}{K_i K_n} \left[\exp\left(\sqrt{\ln(1 + K_i^2) \ln(1 + K_n^2)} r^{(b)}(\tau)\right) - 1 \right],$$

где в качестве $r^{(b)}(\tau)$, отражающей характерные особенности кривых, целесообразно использовать кривую вида [5]

$$r^{(b)}(\tau) = C_1 e^{-\alpha_1|\tau|} \cos(\gamma\tau) + C_2 e^{-\alpha_2|\tau|} + C_3 e^{-\alpha_3|\tau|}, \quad (6)$$

где $C_1, C_2, C_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \gamma$ — неотрицательные константы, причем $C_1 + C_2 + C_3 = 1$.

Экспериментальные кривые $R^{(b)}(\tau)$ и их аппроксимации приведены на рис. 2.

Заключение

Математические модели эхо-сигналов морской поверхности, основанные на экспериментальных данных, позволяют исследовать работу бортовых локаторов ЛА в условиях, максимально приближенных к натурному эксперименту. При построении подобных моделей в качестве данных эксперимента в распоряжении исследователя имеются данные об одномерном законе распределения вероятностей и о корреляционно-спектральных характеристиках флюктуаций огибающей.

При аппроксимации корреляционных функций эхо-сигналов морской поверхности необходимо учитывать закон распределения огибающей. Например, для логарифмически-нормальной модели экспоненциальными и экспоненциально-косинусными кривыми следует аппроксимировать флюктуации логарифма огибающей, а не сами корреляционные функции. Подобная аппроксимация, в частности, позволяет синтезировать имитационные модели флюктуаций огибающей, свободные от методических ошибок.

Из предложенных в работе моделей следует, что эхо-сигналы морской поверхности, соответствующие ее участкам, разнесенным в пространстве на расстояние, гораздо большее длительности зондирующего сигнала, коррелированы, что хорошо согласуется с известными экспериментальными фактами.

Литература

1. Кулемин Г. П. Радиолокационные помехи от моря и суши РЛС сантиметрового и миллиметрового диапазонов // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. (докл.) / АН Украины; НПО Квант. Киев, 1994. Вып. 1. С. 23–29.
2. Тверской Г. Н., Терентьев Г. К., Харченко И. П. Имитаторы эхо-сигналов судовых радиолокационных станций. — Л.: Судостроение, 1973. — 228 с.
3. Trunc G. V., Gejrge S. F. Detection of Targets in Non-Gaussian Sea Clutter // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1970. Vol. AES-6. N 5. P. 620–628.
4. Шепета А. П. Синтез нелинейных формирующих фильтров для моделирования входных сигналов локационных систем // Тр. Междунар. науч.-техн.

конф. (докл.) / АН Украины; НПО Квант. Киев, 1994. Вып. 1. С. 81–85.

5. Бессонов А. А., Сесин А. Е., Шепета А. П. Математические и имитационные модели эхо-сигналов морской поверхности // Национальная ассоциация авиаприборостроителей. Аэрокосмическое приборостроение России. Сер. 2. Авионика. 2005. Вып. 4. С. 52–69.
6. Давидчук А. Г., Сесин А. Е., Шепета Д. А. Марковская модель флюктуаций амплитуд и длительностей эхо-сигналов крупных надводных объектов // Национальная ассоциация авиаприборостроителей. Аэрокосмическое приборостроение России. Сер. 2. Авионика. 2005. Вып. 5. С. 20–28.

УДК 621.3

ПРОГРАММНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕЗРЕЗЬБОВЫХ ОТВЕРСТИЙ

Аль-Джунейди Баджис зйяд,

аспирант

Ю. Т. Лячек,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Проводится анализ процесса формирования отверстий на чертежах в соответствии со стандартами. Выделяются типы и виды их представления. Рассматривается программная параметрическая модель формирования изображений безрезьбовых отверстий на чертеже в соответствии с предложенным алгоритмом ее работы. Реализация модели выполнена на языке AutoLisp и подключается к системе AutoCAD.

Ключевые слова — параметрическая модель, отверстия, стандарты изображения, типы и виды отверстий, резьба, алгоритм.

Вопросам создания параметрических моделей графических объектов при проектировании САПР всегда уделялось достаточно большое внимание. Это обусловлено тем, что их применение позволяет существенно сократить время выполнения конструкторских документов за счет высокой автоматизации формирования элементов создаваемых конструкций. Интерес к подобным моделям особенно возрос в связи с появлением интерактивных САПР. При этом создание параметрических моделей графических изображений шло по двум основным направлениям — интерактивном и программном. В случае использования интерактивного подхода параметрическая модель создается специализированными средствами автоматизированной системы непосредственно в процессе формирования конструктором изображения (параллельная параметризация). Обычно такие средства предусматриваются в системах трехмерного проектирования и служат для построения моделей тел произвольной конфигурации (трехмерных или двухмерных).

Второй подход, программный, является развитием библиотек графических образов часто используемых стандартных конструкторских и схематических элементов. Программная параметрическая модель представляет собой программу, написанную на языке высокого уровня. С ее помощью на основе минимального количества независимых параметров, задаваемых пользователем, и постоянных коэффициентов, определяе-

мых государственными стандартами, может быть сформировано достаточно сложное графическое изображение. Параметры всех графических примитивов, составляющих формируемое изображение, функционально зависят от ограниченного числа задаваемых параметров и коэффициентов и определяются программой (программной параметрической моделью). При этом построенное 2D-изображение само по себе не является параметрической моделью, а представляет результат работы программной параметрической модели. Это изображение в файле описания чертежа записывается, как правило, в виде графического макроса, который при необходимости может быть удален из описания чертежа и создан заново путем повторного вызова конструктором программной модели и задания для нее нового набора параметров. Подобный подход применяется для формирования программных параметрических моделей таких деталей, как болты, гайки, шайбы, прокладки, пружины и т. п., используемых в сборочных конструкциях. Кроме того, программные параметрические модели разрабатываются для создания элементов оформления чертежей деталей (различных размерных и технологических обозначений), а также условных графических образов, являющихся основой построения схем всевозможного типа (электронных, электрических, гидравлических, печатных плат и др.).

Создание программных параметрических моделей относительно не очень сложный процесс

с точки зрения написания соответствующего программного продукта, но требует тщательной и глубокой алгоритмической подготовки и обоснования всех постоянных коэффициентов, вводимых программистом. Это обусловлено тем, что модель должна учитывать все требования существующих стандартов и все возможные особенности и варианты формируемых с ее помощью графических элементов конструкций или схем.

К сожалению, несмотря на то, что программный подход к созданию параметрических моделей известен уже свыше 20 лет, в реальных системах конструкторского и схемотехнического проектирования он до сих пор не реализован на должном уровне автоматизации. Даже в самых применяемых конструкторских системах (Компас, AutoCAD, Pro/Engineer, Unigraphics, Solid Works) относительно полно реализовано только формирование наиболее широко используемых размерных обозначений и средств, обеспечивающих штриховку областей. Хуже обстоит дело с формированием допусков формы и расположением поверхности. Для них реализованы модели отдельных составляющих этих обозначений (рамок, стрелок и баз), с помощью которых можно последовательно сформировать полное обозначение. В современных САПР отсутствуют параметрические модели автоматического формирования отверстий различного типа и вида, обозначений швов сварных соединений, типов резьбы, неразъемных соединений, шероховатости поверхности, видов обработки деталей и т. д. Естественно, что системы предоставляют возможность сформировать все эти обозначения средствами графического редактора на основе использования отдельных графических примитивов. Однако в этом случае время, затрачиваемое на формирование каждого обозначения, возрастает в десятки раз, увеличивая трудовые и финансовые затраты на подготовку комплектов конструкторской документации и процесс проектирования в целом.

Один из самых распространенных элементов различных чертежей — отверстие. Каждое отверстие может быть изображено как в единственном, так и в нескольких вариантах. В существующих САПР, используемых для конструирования, для того чтобы сформировать изображения всех отверстий базовыми средствами, необходимо затратить много времени. Это рутинная и трудоемкая работа, которая требует от конструктора значительных усилий.

В соответствии с действующими стандартами отверстия могут быть представлены в полном [1] или упрощенном [2] виде. Упрощенное нанесение отверстий и их размерных обозначений на чертежах всех отраслей промышленности и строительства допускается в случаях, когда:

- диаметр отверстия с учетом масштаба чертежа составляет 2 мм и менее;
- отсутствует изображение отверстия в разрезе (сечении) вдоль оси;
- нанесение размеров отверстий по общим правилам усложняет чтение чертежа.

Анализ различных типов отверстий позволил разделить их на две группы — без резьбы и с резьбой (на всю длину отверстия или только на часть ее). При этом в каждую группу входит несколько типов отверстий — сквозные и глухие, которые подразделяются на простые, с зенковкой и ступенчатые. Типы и виды всевозможных отверстий без резьбы показаны в таблице.

В свою очередь, на чертеже каждый тип отверстия может быть представлен в разных видах — сверху, снизу (в плане) и сбоку. При этом каждый вид может быть изображен в полном или упрощенном варианте (см. таблицу). При прорисовке полного вида необходимо на изображении отверстия проставить все размерные обозначения, определяющие его параметры. При формировании отверстия в упрощенном виде от его центра или осевой линии должна быть проведена выноски, на полке которой указывается обобщенное размерное обозначение, соответствующее типу данного отверстия.

При создании параметрических моделей все отверстия без резьбы были разделены на две группы — сквозные и глухие. Для каждой из этих групп сформирована отдельная параметрическая модель.

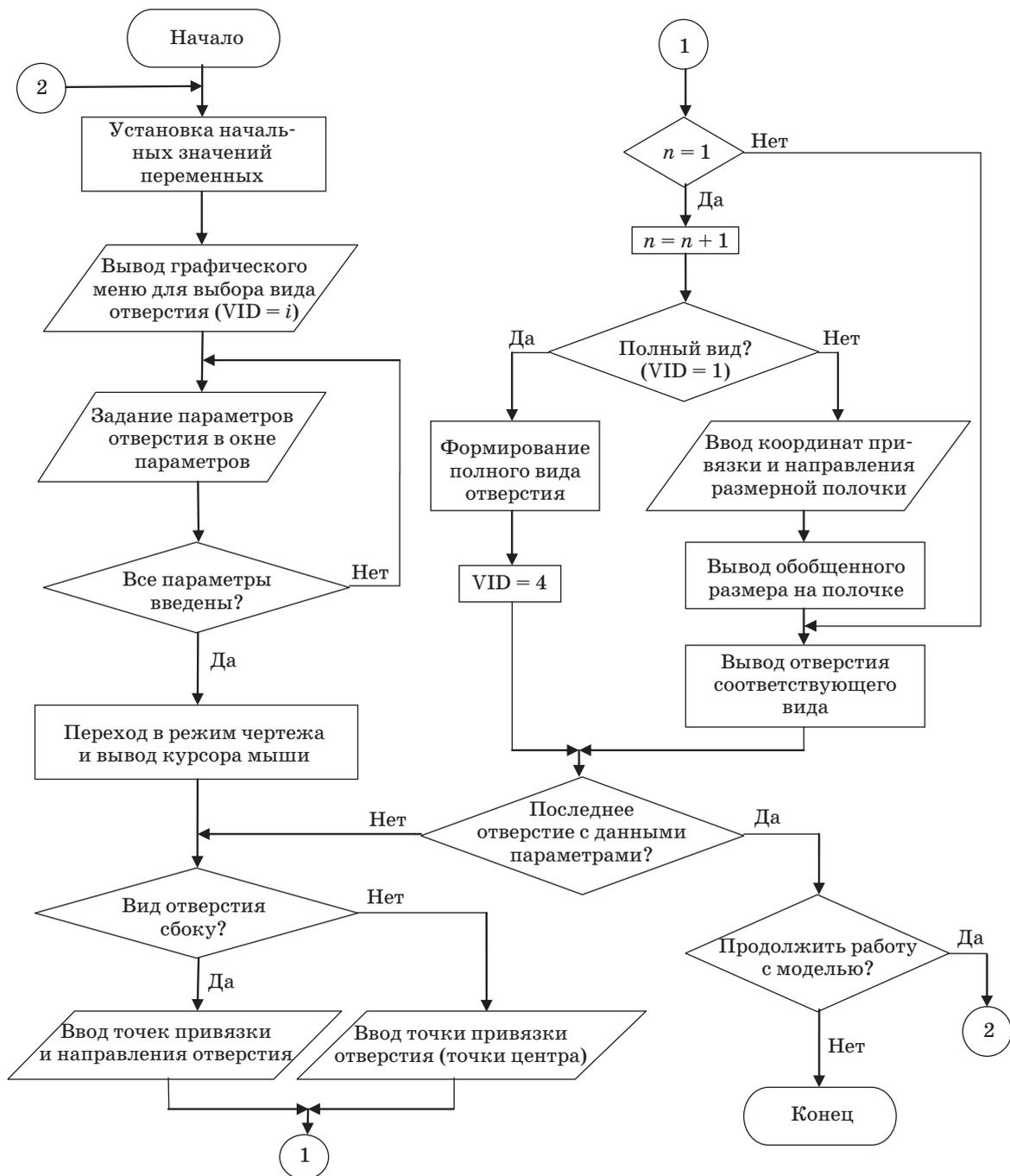
Программная параметрическая модель сквозных отверстий обеспечивает их интерактивное формирование конструктором в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 1. На первом этапе работы модели осуществляется вывод графического меню выбора отверстий соответствующего типа (рис. 2). Выбор требуемого типа отверстия с помощью мыши приводит к выводу следующего (второго) графического меню, позволяющего пользователю определиться с одним из возможных пяти видов изображения в соответствии со столбцами таблицы выбранного типа отверстия.

В результате этих действий на экране дисплея появляется меню задания параметров отверстия (рис. 3). В зависимости от выбранного типа отверстия в этой панели будут доступны только те поля, размерные значения которых соответствуют выбранному типу отверстия. При этом для удобства пользователя недоступные поля выводятся в окне задания с «пониженной» яркостью.

После задания всех параметров, определяющих выбранный тип отверстия, осуществляется переход в режим чертежа. При этом в зависимости от того, какой из видов отверстия предпола-

■ Виды и типы отверстий без резьбы и их представление на чертеже

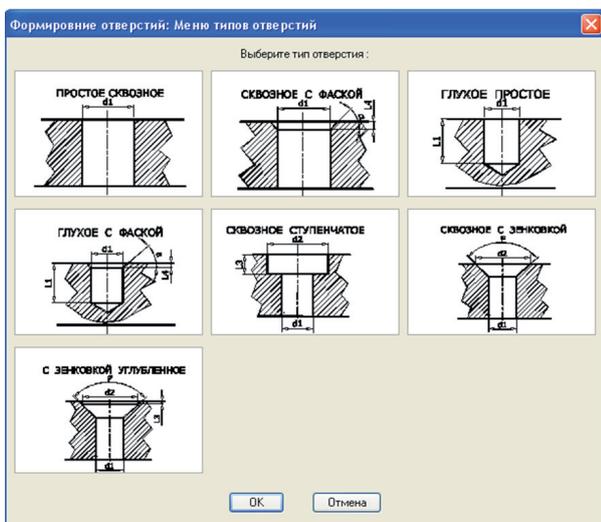
Тип	Полное изображение отверстия		Упрощенное представление отверстия		Варианты максимально упрощенного представления (сбоку и/или сверху)
	Вид сбоку и форма размерной записи	Вид сверху или снизу	Вид сбоку	Вид сверху или снизу	
Сквозное простое	 d_1	 $\varnothing 35$	 $\varnothing 8H7$	 $\varnothing 35$	 $\varnothing 3$ $\varnothing 5$
Сквозное сзенковкой	 $d_1 - L_4 \times a$	 $\varnothing 10$ $\varnothing 12 \times 45^\circ$	 $\varnothing 8H11-1 \times 45^\circ$	 $\varnothing 3-1 \times 45^\circ$	 $\varnothing 10H7-1 \times 45^\circ$
Глубокое простое	 $d_1 \times L_1$	 $\varnothing 12 \times 20$	 $\varnothing 6 \times 20$	 $\varnothing 5 \times 7$	 $\varnothing 6 \times 20$
Глубокое сзенковкой	 $d_1 \times L_1 - L_4 \times a$	 $\varnothing 5 \times 10$ $1 \times 45^\circ$	 $\varnothing 6 \times 20-1 \times 45^\circ$	 $\varnothing 5 \times 7-1 \times 45^\circ$	 $\varnothing 6 \times 20-1 \times 45^\circ$
Сквозное ступенчатое	 $d_1 / d_2 \times L_3$	 $\varnothing 10$ $\varnothing 12 \times 4$	 $\varnothing 5,5H13/\varnothing 11H5 \times 4$	 $\varnothing 4,5H13/\varnothing 8 \times 3,2$	 $\varnothing 4,5H13/\varnothing 8 \times 3,2$
Сквозное сзенковкой	 $d_1 / d_2 \times \varphi$	 $\varnothing 10$ $\varnothing 12 \times 90^\circ$	 $\varnothing 3,4H13/\varnothing 4,8 \times 90^\circ$	 $\varnothing 6,6/\varnothing 8,4 \times 90^\circ \pm 1$	 $\varnothing 3,4H13/\varnothing 4,8 \times 90^\circ$
Сквозное сзенковкой, углубленное	 $d_1 / d_2 \times L_3 \times \varphi$	 $\varnothing 10$ $\varnothing 12 \times 2 \times 90^\circ$	 $\varnothing 8,4/\varnothing 15 \times 0,8 \times 90^\circ$	 $\varnothing 8,4/\varnothing 15 \times 1,8 \times 90^\circ$	 $\varnothing 8,4/\varnothing 15 \times 1,8 \times 90^\circ$



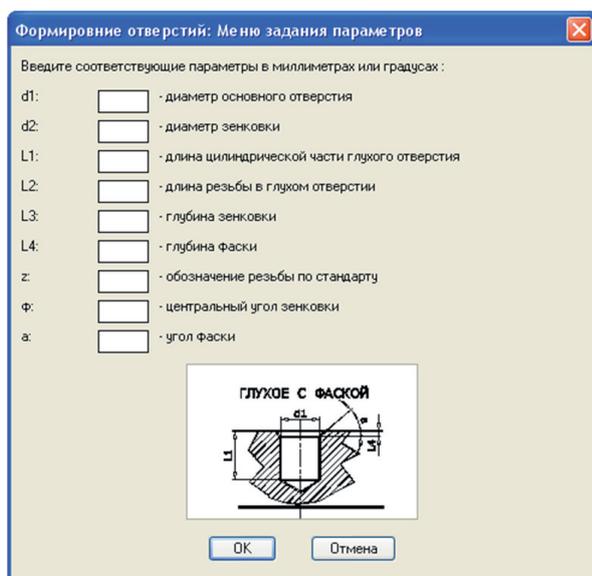
■ Рис. 1. Алгоритм формирования сквозных отверстий

гается выводить на чертеже (сбоку или сверху), на следующем этапе программная параметрическая модель запрашивает координаты точек привязки отверстия на чертеже и направление его прорисовки или только одну точку, отвечающую положению центра отверстия на плоскости. Эти точки в соответствии с возможностью системы AutoCAD могут быть введены конструктором либо в командной строке с помощью клавиатуры, либо путем фиксации положения курсора мыши.

Далее, в соответствии с введенными пользователем параметрами и выбранным видом отверстия (полного или упрощенного), программная модель обеспечивает автоматическую прорисовку соответствующего представления. То есть автоматически рисуется либо отверстие в плане с вырвом и всеми размерными обозначениями в местах, определяемых константами, которые задаются в программе по умолчанию, либо формируется полочка и на ней выводится обобщенное размер-



■ Рис. 2. Меню типов отверстий



■ Рис. 3. Окно задания параметров выбранного типа отверстия

ное обозначение с прорисовкой упрощенного вида отверстия. В последнем случае вначале запрашиваются параметры полочки (координаты точки начала и направление полочки — влево или вправо от точки начала), а затем автоматически формируется упрощенное изображение. При необходимости начертить не одно, а несколько одинаковых отверстий, после создания первого из них у конструктора в цикле запрашивается место положения очередного отверстия, и на чертеж выводится его упрощенное представление без обобщенного размерного обозначения.

Если конструктору необходимо прорисовать на чертеже отверстие другого типа или с другими

параметрами, программная модель обеспечивает переход по алгоритму на его начало (см. рис. 1). Иначе осуществляется выход из программы.

Параметрическая модель для формирования глухих отверстий аналогична модели для сквозных отверстий за исключением того, что в меню параметров введен дополнительный параметр глубины. Принципиально эти две модели могут быть объединены в одну, но чтобы не перегружать графическое меню типов отверстий, это не сделано.

Особенностью предлагаемой модели является также возможность более оперативно редактировать созданные изображения отверстий. Для этого не требуется предварительно удалять макрос. При его выборе с помощью курсора мыши программная параметрическая модель автоматически определяет его параметры и выводит окно, подобное окну, представленному на рис. 3. В случае изменения конструктором каких-либо значений в этом окне старое изображение отверстия (старый макрос) удаляется автоматически, а на его месте формируется модифицированное изображение, соответствующее новым введенным параметрам (новый макрос).

Программные параметрические модели написаны на языке AutoLisp [3] и встроены в систему AutoCAD путем подключения к ней пользовательской панели меню, в которой можно выбрать формирование либо сквозных, либо глухих отверстий. Их использование существенно облегчает работу конструкторов и позволяет ускорить создание изображений отверстий на чертежах в несколько раз по сравнению с ручной прорисовкой. Выигрыш во времени особенно сказывается при создании полных изображений отверстий, так как этот процесс максимально автоматизирован. Так, область зоны вырыва для показа отверстия в плане определяется и штрихуется автоматически на основе учета его параметров (диаметра и глубины) и особенностей детали в указанном месте.

Литература

1. ГОСТ 2.307-68. ЕСКД (СТ СЭВ 1976-79, СТ СЭВ 2180-80). Нанесение размеров и предельных отклонений. http://www.tsfr.ru/gost/gost_2.307-68/ (дата обращения: 27.02.2010).
2. ГОСТ 2.318-81. ЕСКД. Правила упрощенного нанесения размеров отверстий. <http://www.simbexpert.ru/?snips/snip/4590/> (дата обращения: 15.02.2010).
3. Полищук Н. Н. Visual Lisp и секреты адаптации AutoCAD. — СПб.: БХВ-Петербург, 2001. — 576 с.

УДК 004.434

АВТОМАТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЯЗЫКОВ (Часть 2)¹

Ф. А. Новиков,

канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией астрономического программирования
Институт прикладной астрономии РАН

У. Н. Тихонова,

аспирант

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Описывается новый метод определения синтаксиса и семантики проблемно-ориентированных языков с помощью диаграмм классов и диаграмм автоматов. Во второй части статьи приводится используемая автоматная модель и рассматривается задание конкретного синтаксиса с помощью системы взаимодействующих автоматов на примерах языка описания шахматных позиций и мини-языка множеств.

Ключевые слова — проблемно-ориентированный язык, абстрактный синтаксис, метамодель, автоматное программирование.

Автоматный метод и модель системы автоматов

В первой части статьи рассмотрена центральная составляющая определения проблемно-ориентированного языка — метамодель (в том числе абстрактный синтаксис), задающая структуру языка. Определение структуры проблемно-ориентированного языка необходимо, но не достаточно. Для использования языка, кроме абстрактной структуры, нужны ее конкретная реализация — конкретный синтаксис языка — и способ применения для конкретных целей — семантика языка.

Конкретный синтаксис предоставляет механизм создания (ввода) и изменения (редактирования) программы как абстрактной структуры с помощью ее конкретного представления². Другими словами, конкретный синтаксис определяет однозначное соответствие из представления в экземпляр метамодели. Редактируя представление (текст программы), мы изменяем состав и связи экземпляров классов метамодели. Таким образом, с одной стороны, конкретный синтаксис — это нотация, используемая для изображения

(текстового, графического или иного) конструкций языка и их комбинаций. С другой стороны, конкретный синтаксис — это способ редактировать программу и транслировать изображение ее конструкций в набор экземпляров классов метамодели³. В автоматном методе определения языков конкретный синтаксис задается как *алгоритм анализа и синтеза* (преобразователь), анализирующий конкретное представление программы с использованием соответствующей нотации и строящий абстрактную программу.

Однако построение экземпляра метамодели редко является самоцелью — как правило, с построенной абстрактной программой нужно еще что-то сделать: сразу выполнить или преобразовать в какой-то другой вид для последующего выполнения. Именно этот результат, т. е. процесс выполнения в конкретной модели вычислимости или исполнимый код в конкретной системе программирования считаются смыслом программы, а соответствие, сопоставляющее программе ее смысл, называется семантикой программы [2]. Существуют различные способы определения семантики языка, среди которых в программировании чаще всего используется операционная семантика. Операционный подход к определению семантики языка предполагает описание *алго-*

³Для краткости набор экземпляров классов метамодели с установленными связями мы называем экземпляром метамодели.

¹Продолжение. Начало в № 6, 2009 г.

²А. П. Ершов предложил более точный, но менее распространенный термин «воплощение» [1]. В настоящее время в зарубежной литературе используется термин «reification».

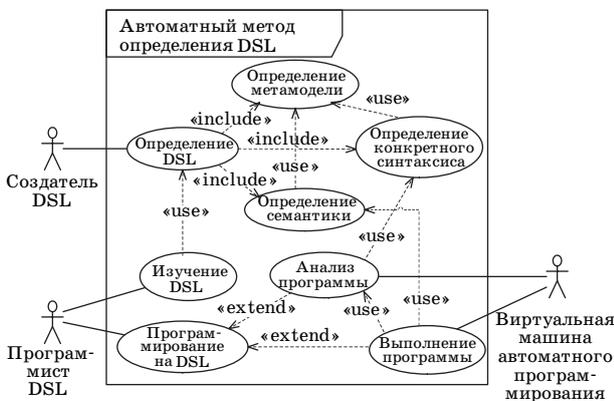
ритма интерпретации программы в терминах некоторой абстрактной машины [3]. В автоматном методе в качестве такой абстрактной машины предлагается использовать систему автоматов.

Таким образом, в автоматном методе конкретный синтаксис описывается в виде алгоритма анализа и синтеза экземпляра метамодели языка, а операционная семантика описывается в виде алгоритма интерпретации этого экземпляра метамодели языка. Причем для описания этих алгоритмов используется одна и та же модель системы взаимодействующих автоматов (которую мы определим ниже в этом разделе). Такая унификация, по нашему мнению, является достоинством автоматного метода.

С точки зрения парадигмы автоматного программирования [4], описание алгоритма в виде системы автоматов и есть реализация этого алгоритма. Мы следуем парадигме автоматного программирования и используем виртуальную машину автоматного программирования, которая интерпретирует автоматы определения проблемно-ориентированного языка и тем самым автоматически реализует анализ и выполнение программ на этом языке.

Основные варианты использования, связанные как с определением, так и с применением проблемно-ориентированных языков, представлены на рис. 9⁴. Здесь система автоматов определения конкретного синтаксиса интерпретируется виртуальной машиной автоматного программирования, и тем самым выполняется анализ программы. Аналогично система автоматов определения семантики интерпретируется той же машиной автоматного программирования, и тем самым выполняется интерпретация программы.

В автоматном методе мы предлагаем использовать следующую модель системы взаимодействующих



■ Рис. 9. Модель использования автоматного метода

⁴ Нумерация рисунков продолжает нумерацию первой части статьи.

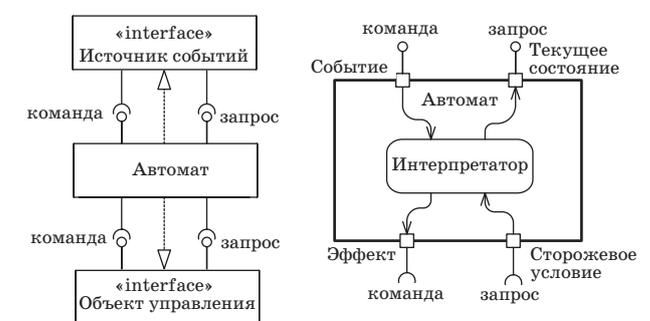
ющих автоматов (рис. 10, 11). Входным алфавитом автомата являются события, посылаемые источником событий. В зависимости от полученных событий и проверки сторожевых условий на переходах автомат меняет свое текущее состояние и выполняет действия на переходах и в состояниях (эффекты), адресованные объекту управления.

Мы придерживаемся принципа Бертрана Мейера [5] разделения операций интерфейса на запросы, доставляющие значения и не меняющие состояния объекта, и команды, меняющие состояние объекта. Кроме того, мы считаем обязательным указание для каждого объекта не только предоставляемых, но и требуемых интерфейсов. Таким образом, мы определяем все четыре возможных интерфейса взаимодействия между автоматом, его источником событий и объектом управления:

- события на переходах являются предоставляемыми командами автомата;
- сторожевые условия на переходах используют требуемые запросы к объекту управления;
- эффекты — это требуемые команды объекта управления;
- источник событий может использовать предоставляемые запросы о текущем состоянии автомата (см. рис. 10)⁵.

Источником событий и объектом управления могут быть как внешние (по отношению к системе автоматов) объекты, так и этот же или другой автомат системы. Заметим, что унифицированная трактовка управляющих автоматов, объектов управления и источников событий является одной из наиболее существенных отличительных особенностей нашего метода по сравнению с существующими моделями автоматного программирования [4, 6].

Используемая нами структура (модель) автомата схожа с метамоделью UML [7] (см. рис. 11).



■ Рис. 10. Взаимодействие и внутреннее устройство автомата

⁵ В наших примерах мы не используем эту возможность, но оставляем ее в модели системы взаимодействующих автоматов для общности.



■ Рис. 11. Модель автомата

Основной особенностью предлагаемой модели системы автоматов являются понятия *класса* и *экземпляра* автомата. Каждая диаграмма автомата UML задает класс автоматов. Конкретный автомат (экземпляр класса) создается явным образом и интерпретируется в процессе выполнения⁶.

Взаимодействие между автоматами системы осуществляется с помощью экземпляров автоматов, вложенных в составные состояния [9]. При первом переходе в составное состояние создается новый экземпляр вложенного автомата. При последующих переходах используется уже созданный экземпляр. При этом допускается рекурсивное вложение автоматов, т. е. в составное состояние может быть вложен экземпляр автомата того же класса автоматов. Исходящие переходы составного состояния наследуются всеми состояниями вложенного автомата, но могут быть в нем переопределены.

Допускается задание в автоматах локальных переменных, которые могут использоваться в сторожевых условиях и в действиях на переходах автомата. Типом локальных переменных могут быть типы, определенные в метамодели языка, или встроенные типы UML.

Мы предполагаем, что система автоматов содержит единственный головной автомат системы, с которого начинается выполнение этой системы⁷.

Определение конкретного синтаксиса системой распознающих автоматов

В автоматном методе определения проблемно-ориентированных языков не используется традиционное грамматическое описание. Мы описываем анализатор (распознаватель) языка в виде си-

⁶ Технические детали программной реализации автоматного метода (виртуальной машины автоматного программирования) рассмотрены в других наших статьях, опубликованных [8] и готовящихся к печати.

⁷ Считается, что головной автомат вложен в анонимное состояние, принадлежащее машине автоматного программирования.

стемы автоматов, общим входным алфавитом которых является множество представлений абстрактных знаков (терминалов языка, в терминологии формальных грамматик). С практической точки зрения мы считаем представлением абстрактного знака событие, посылаемое источником событий, используемым для создания и изменения программы. Например, в качестве элементов нотации языка могут выступать символы в тексте, геометрические фигуры на диаграмме, поля и кнопки диалоговых окон, ячейки электронной таблицы, звуки произнесенной команды и т. д. Соответственно источником событий может быть лексический анализатор текста, или графический редактор диаграмм, или редактор формул, или диалоговое окно — любой источник событий. Такой подход реализует описанную выше идею использования для представления программы различных нотаций, а также их комбинаций (см. ч. 1, разд. «Назначение и область применения метода»).

Наиболее характерным для автоматного метода является задание конкретного синтаксиса исходя из метамодели языка. Система конечных автоматов для распознавания языка строится по метамодели языка с помощью следующих эмпирических правил.

- Каждому классу с именем *A* в метамодели языка соответствует класс автоматов с именем *A SM*. Экземпляр автомата *A SM* в процессе выполнения строит экземпляр класса *A*, т. е. является его конструктором.
- Начальной структурной единице (аксиоме) языка соответствует головной автомат системы.
- Каждой составляющей *B* класса *A* в автомате *A SM* соответствует составное состояние, в которое вложен автомат *B SM*. Для наглядности имя этого составного состояния совпадает с именем роли класса *B* в композиции «*B* есть часть *A*» или с именем атрибута *B* в классе *A*⁸.
- Альтернативной декомпозиции классов соответствует альтернативная декомпозиция автоматов, а именно: в каждое составное состояние вкладывается отдельный экземпляр автомата указанного класса.
- Дизъюнктивной композиции классов, перечислимым типам и обобщению классов соответствуют сегментированные переходы на диаграмме автомата.
- Кратности полюса и массивам соответствует петля на диаграмме автомата.

По умолчанию, объектом управления каждого автомата является конструируемый им экземпляр класса метамодели языка. Этот объект обо-

⁸ Поэтому мы разрешаем прямо использовать имя атрибута *B* в автомате *A SM*.

значается ключевым словом `this`, которое можно опускать в контексте данного автомата.

При таком задании конкретного синтаксиса метамодель целесообразно представить в виде набора классов с использованием атрибутов, а не в виде безымянных композиций, что облегчает конструирование автоматов.

Приведем пример задания текстового синтаксиса для мини-языка множеств. На рис. 12 представлена метамодель мини-языка множеств, пересмотренная с учетом изложенных рекомендаций.

Применяя изложенные выше правила к метамодели на рис. 12, получаем полную систему автоматов (рис. 13–15).

На рис. 13 использованы следующие элементы нотации. Обозначение предложения[k] подразумевает, что каждый элемент массива предложения разбирается отдельным экземпляром автомата класса Предложение SM. Напомним, что переход из составного состояния наследуется всеми состояниями вложенного автомата и может быть переопределен в нем. Знаком * обозначается любое событие. Таким образом, обрабатываются все неожиданные события, в том числе ошибки. Все события в этих автоматах — это терминалы разби-

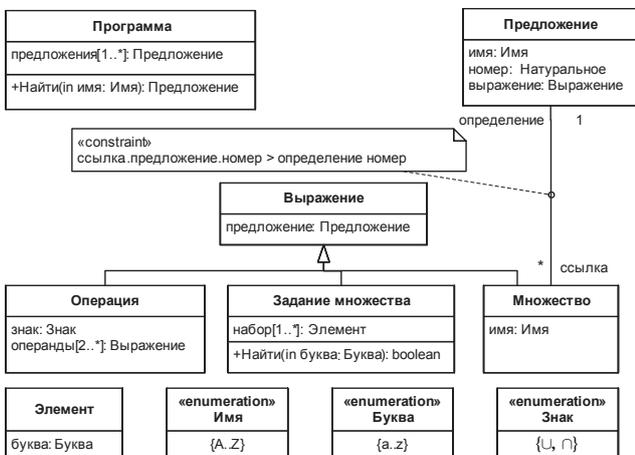
раемого языка. Поэтому вместо сложного выражения вида `«lex.getc(out token) [token == 'c']»` мы пишем просто `«c»` на дуге перехода.

На рис. 14 применяется еще ряд допустимых обозначений. Для ветвления по событиям используется переходное состояние (junction state [9]) и ключевое слово `else`, которое означает любое событие, кроме альтернативных. Ключевое слово `transmit` означает, что обрабатываемое на данном переходе событие снова становится текущим и должно быть обработано еще раз. Тем самым моделируется делегирование событий. Мы допускаем расширение обозначений UML, позволяя записывать объединение событий, например $\cup \vee \sqcup$; а также сохранение текущего события в локальной переменной, например `operation = event`.

Для ветвления по сторожевому условию используются состояния выбора (decision state [9]). При этом предикат `[else]` имеет обычный смысл дополняющего условия.

Кроме того, в автомате Выражение SM экземпляр класса Выражение конструируется либо как Операция, либо как Задание множества, либо как Множество, т. е. происходит конкретизация типа экземпляра класса Выражение. Для этого используется обозначение вида (Операция) `this`, где Операция — подкласс класса Выражение.

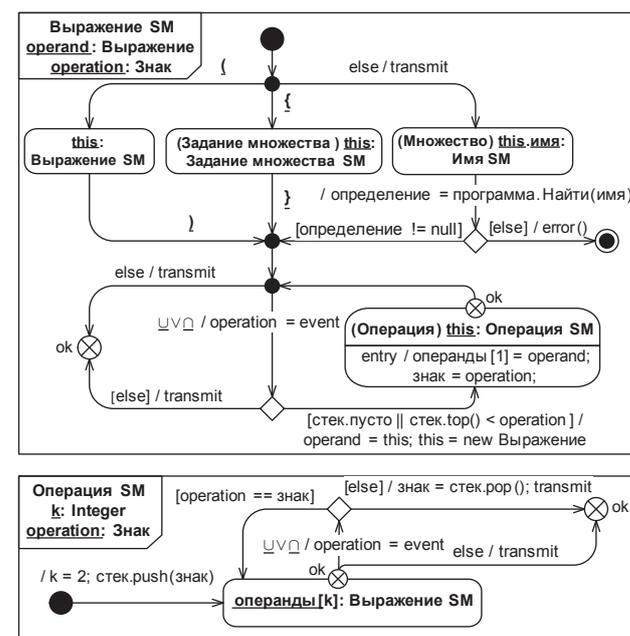
Необходимо объяснить, как в этих автоматах учитывается приоритет операций, который относится именно к конкретному синтаксису. Заметим, что перечислимые типы считаются линейно упорядоченными. Тем самым определение пере-



■ Рис. 12. Пересмотренная метамодель мини-языка множеств



■ Рис. 13. Головной и основной автоматы, распознающие мини-язык множеств



■ Рис. 14. Автоматы, реализующие разбор выражения с учетом приоритетов операций

числимого типа Знак на рис. 12 позволяет удобно передать информацию о приоритетах операций. Для хранения последовательности знаков операций используется внешний объект стек. Если операция первая или ее приоритет выше предыдущей, то создается новое выражение и построенное выражение запоминается в массиве операндов. Если же операция совпадает с предыдущей, то продолжается разбор в том же экземпляре выражения без выхода из автомата Операция SM. В противном случае, т. е. если приоритет текущей операции ниже предыдущей, происходит возврат из рекурсии на уровень выше (в автомат Выражение SM), где создается новое выражение и построенная операция запоминается в массиве операндов.

Заметим, что на рис. 15 в последнем автомате нет заключительного состояния, потому что завершение работы происходит по унаследованному от внешнего автомата переходу по событию }.

Объектами, внешними по отношению к описанной системе автоматов, являются Лексический анализатор (является источником событий) и Стек (является объектом управления и используется как рабочая память), представленные на рис. 16.

Рассмотрим теперь язык описания шахматных позиций. Пример диаграммы, описывающей шахматную позицию, приведен на рис. 17. Нетрудно представить себе, что имеется интерактивное приложение, в котором есть панель фигур и пешек, изображение доски, и пользователь перетаскивает фигуры и пешки с панели на доску, формируя тем самым позицию. Терминалами

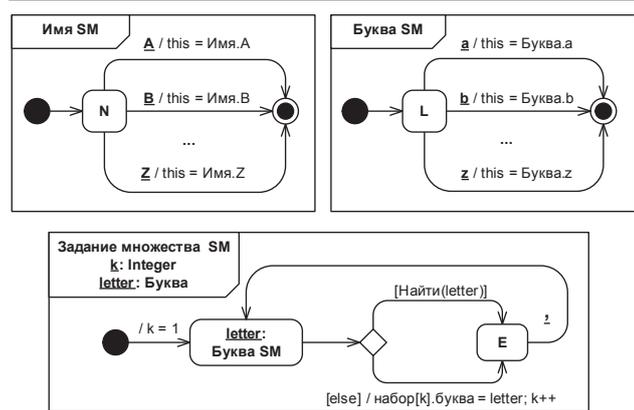
этого языка являются события перетаскивания конкретной фигуры на конкретное поле доски.

Таким образом, источником событий является графический интерфейс пользователя, спецификация которого показана на рис. 18. Здесь мы разделяем панель фигур и пешек на две панели — для черных и для белых, и каждая из них является экземпляром абстрактного класса *Chess diagram constructor*. События выбора конкретной фигуры (например, щелчком кнопки мыши) мы обозначаем изображением этой фигуры. Событие опускания фигуры на конкретное поле (например, щелчком кнопки мыши) обозначается значком □. При этом действует правило «взялся — ходи», т. е. эти действия всегда выполняются парой. Событие завершения ввода позиции обозначено значком ☒.

В метамодели языка описания шахматных позиций (см. ч. 1, рис. 4 и 6) мы устраняем безмянные композиции и ненужные ассоциации, получая метамодель, представленную на рис. 19.



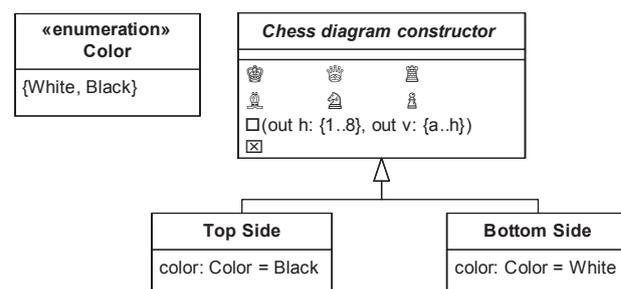
■ Рис. 17. Пример диаграммы шахматной позиции



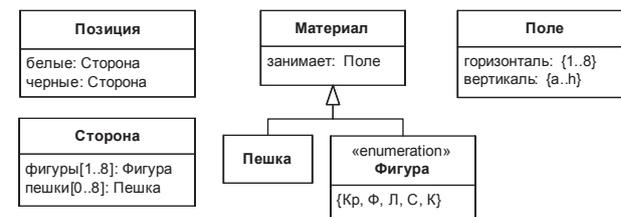
■ Рис. 15. Автоматы, реализующие разбор элементарных конструкций

<p>«enumeration» Событие</p> <pre> ; ., = ∪ ∩ { } () a .. z A .. Z </pre>	<p>Лексический анализатор</p> <pre> getc(out token: Событие) eigor() </pre>	<p>Стек</p> <pre> push(знак: Знак) pop(): Знак top(): Знак </pre>
--	---	---

■ Рис. 16. Лексический анализатор и стек



■ Рис. 18. Источник событий для анализатора языка описания шахматных позиций

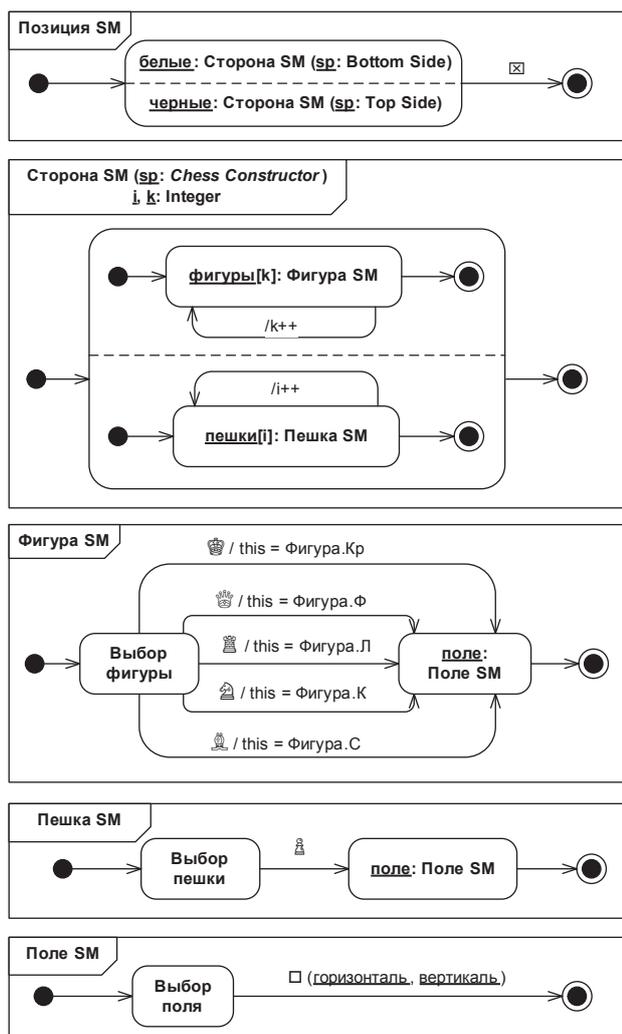


■ Рис. 19. Пересмотренная метамодель языка описания шахматных позиций

Далее, руководствуясь правилами преобразования классов метамодели в автоматы, изложенными в начале раздела, получаем систему автоматов (рис. 20). Важно, что фигуры и пешки можно расставлять в произвольном порядке, что передается с помощью ортогонального составного состояния [9] (автоматы Позиция SM и Сторона SM).

В предыдущих двух примерах систему автоматов построили исходя из только метамодели языка, без привлечения иных формализмов. Однако мы вовсе не противопоставляем автоматный метод и использование традиционных формализмов при задании конкретного синтаксиса. Если синтаксис языка уже задан, например с помощью порождающей грамматики или синтаксических диаграмм Вирта [10], то автоматный метод позволяет эффективно использовать эту информацию.

Рассмотрим набор синтаксических диаграмм Вирта (рис. 21), описывающих тот же мини-язык

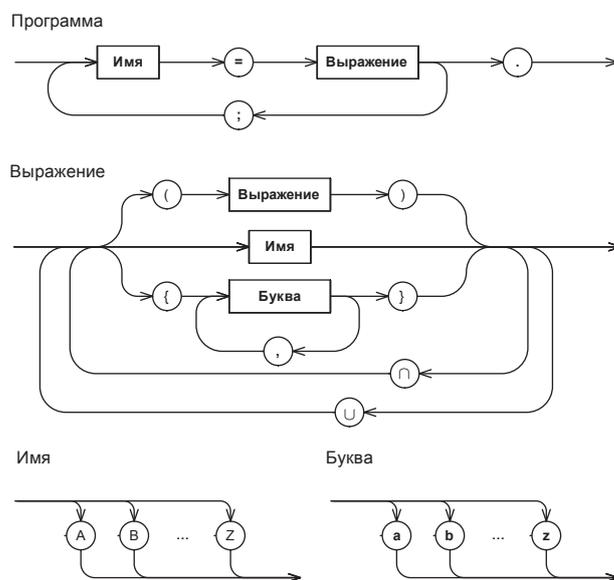


■ Рис. 20. Система автоматов, позволяющих задать диаграмму шахматной позиции

множеств, что и грамматика в разделе «Определение отношений метамодели языка» (см. ч. 1). Эти диаграммы получены почти автоматически из грамматики: сначала для каждого правила грамматики были нарисованы очевидные диаграммы, а потом однократно используемые нетерминалы подставлены в соответствующие диаграммы.

Система автоматов, распознающих конкретный синтаксис, получается автоматически из системы синтаксических диаграмм путем выполнения следующих преобразований:

- каждая синтаксическая диаграмма преобразуется в диаграмму автомата;
- вводятся начальное состояние, к которому присоединяется входная стрелка, и заключительное состояние, к которому присоединяется выходная стрелка;
- нетерминалы преобразуются в составные состояния, в которые вложены автоматы соответствующих конструкций;
- в каждой точке разветвления или слияния дуг синтаксической диаграммы вводится служебное состояние⁹;
- терминалы переносятся на дуги перехода в качестве событий;
- немотивированные переходы, альтернативные мотивированным, помечаются ключевым словом else¹⁰.



■ Рис. 21. Синтаксические диаграммы мини-языка множеств

⁹ Некоторые служебные состояния могут оказаться излишними, их следует удалить после того, как будут построены действия на переходах.

¹⁰ Предполагается, что для каждого состояния имеется не более одного немотивированного исходящего перехода, т. е. что автомат детерминированный.

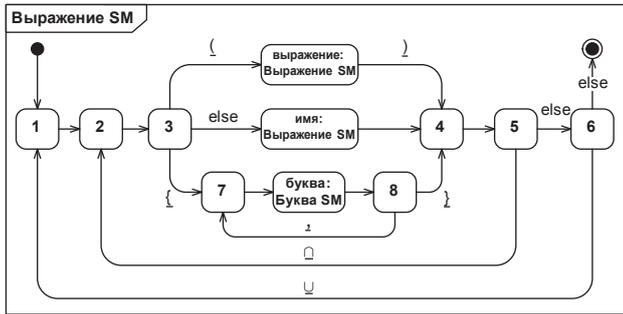


Рис. 22. Автомат-распознаватель конструкции Выражение

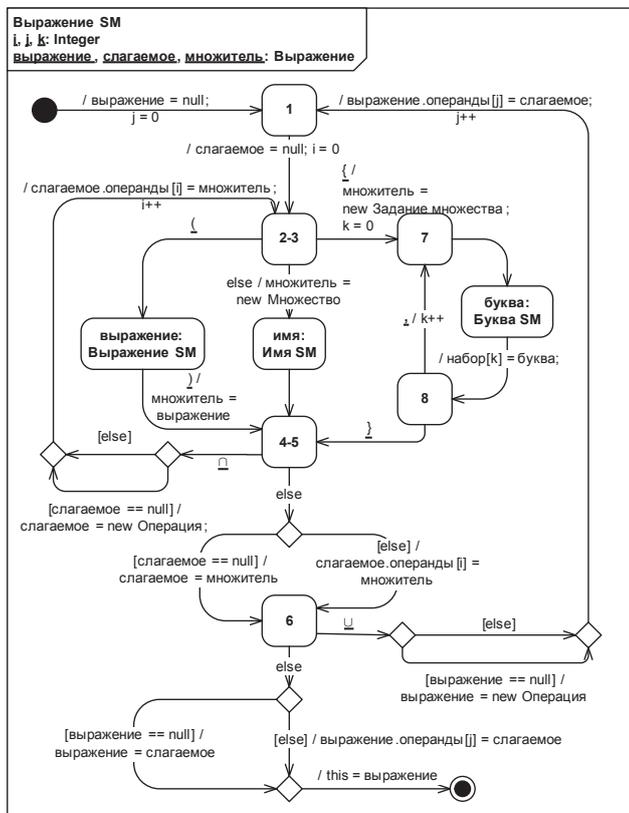


Рис. 23. Автомат-построитель конструкции Выражение

Пример результата такого преобразования для самого сложного нетерминала *Выражение* приведен на рис. 22. Этот автомат является распознавателем конструкции *Выражение*, т. е. он переходит в заключительное состояние тогда и только тогда, когда на вход ему подается корректное выражение мини-языка множеств.

Автомат-конструктор класса *Выражение* показан на рис. 23. Он получен из автомата-распоз-

навателя добавлением действий на переходах, причем некоторые действия являются условными, поэтому применены сегментированные переходы. Кроме того, объединены эквивалентные состояния 2 и 3, 4 и 5.

Мы видим, что наличие традиционного формального описания синтаксиса резко упрощает построение системы автоматов распознавания.

Вместе с тем система автоматов разбора ничуть не становится проще по причине того, что структура системы автоматов никак не связана в данном случае со структурой конструируемого объекта, и ее приходится учитывать вручную при программировании действий на переходах¹¹. Это еще одно свидетельство в пользу целесообразности рассматривать абстрактный синтаксис как главное и первичное описание языка.

Окончание следует

Литература

1. Ершов А. П. Предисловие редактора перевода // Пересмотренное сообщение об Алголе-68. — М.: Мир, 1979. — С. 5–8.
2. Непейвода Н. Н. Семантика алгоритмических языков // Итоги науки и техники. Сер. Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика / ВИНТИ. 1983. Т. 20. С. 95–166.
3. Лавров С. С. Программирование. Математические основы, средства, теория. — СПб.: БХВ-Петербург, 2001. — 317 с.
4. Поликарпова Н. И., Шалыто А. А. Автоматное программирование. — СПб.: Питер, 2008. — 176 с.
5. Мейер Б. Объектно-ориентированное конструирование программных систем. — М.: ИНТУИТ.ру; Русская Редакция, 2005. — 1232 с.
6. Шалыто А. А. SWITCH-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. — СПб.: Наука, 1998. — 628 с.
7. OMG Unified Modeling Language (OMG UML), Superstructure, Version 2.2. <http://www.uml.org/> (дата обращения: 12.02.2010).
8. Новиков Ф. А., Тихонова У. Н. Определение проблемно-ориентированных языков интерпретируемыми автоматами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. № 5(65). С. 93–98.
9. Буч Г., Якобсон А., Рамбо Д. UML. 2-е изд. Сер. Классика CS. — СПб.: Питер, 2005. — 736 с.
10. Вирт Н., Йенсен К. Паскаль: руководство для пользователя. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 254 с.

¹¹ Впрочем, точно такой же недостаток присущ и традиционным компиляторам компиляторов.

УДК 004.021

МЕТОДЫ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ В ПОТОКОВОЕ ВИДЕО. ОБЗОР

А. К. Григорьян¹,

аспирант

Н. Г. Аветисова¹,

соискатель

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Дан обзор методов внедрения цифровых водяных знаков в потоковое видео, используемых российскими и зарубежными специалистами. Подробно описаны такие алгоритмы внедрения, как аддитивные алгоритмы, алгоритмы слияния, приведен пример использования консилограмм. Сделаны выводы об эффективности описанных алгоритмов.

Ключевые слова — аддитивные алгоритмы, цифровой водяной знак, потоковое видео, робастность, консилограммы, вейвлет-преобразование.

Введение

Информация является одной из ценнейших областей современной жизни. Получение доступа к ней с появлением глобальных компьютерных сетей стало невероятно простым. В то же время легкость и скорость такого доступа значительно повысили и угрозу нарушения безопасности данных при отсутствии мер их защиты, а именно угрозу неавторизованного доступа к информации.

Задача надежной защиты авторских прав, прав интеллектуальной собственности или конфиденциальных данных (которые в большинстве случаев имеют цифровой формат) от несанкционированного доступа является одной из старейших и почти не решенных сегодня проблем. В связи с интенсивным развитием и распространением технологий, которые позволяют с помощью компьютера интегрировать, обрабатывать и синхронно воспроизводить различные типы сигналов (так называемые мультимедийные технологии), вопрос защиты информации, представленной в цифровом виде, является чрезвычайно актуальным. Поэтому во всем мире назрел вопрос разработки методов по защите информации

организационного, методологического и технического характера, среди них — методы криптографии и стеганографии.

Стеганографирование осуществляется различными способами. Общей же чертой таких способов является то, что скрываемое сообщение встраивается в некий не привлекающий внимание объект, который затем открыто транспортируется (пересылается) адресату.

В данной статье рассмотрены различные методы сокрытия информации в графических носителях (аддитивные алгоритмы, алгоритмы слияния, консилограммы), проведен сравнительный анализ возможности использования известных методов и алгоритмов для внедрения цифрового водяного знака (ЦВЗ) в такой специфический контейнер, как потоковое видео, формируемое автономными видеоприборами; определены критерии оценки методов. В конце сделаны выводы о возможности применять некоторые алгоритмы, основанные на вейвлет-преобразованиях, для встраивания ЦВЗ в видеопоток, а также определен круг задач по модернизации отобранных алгоритмов.

Стеганография и ЦВЗ

Стеганография — это метод организации связи, который, собственно, скрывает само наличие связи. В отличие от криптографии, где злоумышленник точно может определить, является ли передаваемое сообщение зашифрованным текстом,

¹ Научный руководитель — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения *М. Б. Сергеев*.

методы стеганографии позволяют встраивать закодированные сообщения в безобидные послания так, чтобы невозможно было заподозрить существование встроенного послания [1].

Слово «стеганография» в переводе с греческого буквально означает «тайнопись» («στεγανος» (steganos) — секрет, тайна; «γραφω» (graphy) — запись). К ней относятся огромное множество специальных средств связи, таких как невидимые чернила, микрофотоснимки, условное расположение знаков, «закрытые» каналы и средства связи на плавающих частотах и т. д.

В настоящее время в связи с бурным развитием вычислительной техники и новых каналов передачи информации появились новые стеганографические методы, в основе которых лежат особенности представления информации в компьютерных файлах, вычислительных сетях. Это дает возможность говорить о становлении нового направления — компьютерной стеганографии.

История развития науки стеганографии описана в работе [1].

В настоящее время можно выделить три тесно связанных между собой и имеющих одни корни направления приложения стеганографии: сокрытие данных (сообщений), цифровые водяные знаки и заголовки [1].

Жизненный цикл и основные свойства цифровых водяных знаков также подробно рассмотрены [1].

Если рассуждать о применении ЦВЗ на практике, то можно выделить следующие аспекты:

- защита авторских прав;
- получение цифрового отпечатка (различные люди получают копии, помеченные разными водяными знаками);
- отслеживание трансляций (телевизионные новости часто содержат водяные знаки, оставленные международными информационными агентствами);
- сокрытие факта обмена информации (стеганография).

Методы сокрытия информации в графических носителях

Все методы, предназначенные для сокрытия данных в графических изображениях, можно разделить по принципам, лежащим в их основе, на форматные и неформатные.

Форматные методы сокрытия (форматные стеганографические системы) — это такие методы (системы), в которых принципы, положенные в основу сокрытия, основываются на особенностях формата хранения графических данных. Разработка таких методов сводится к анализу формата в целях поиска полей формата, измене-

ние которых в конкретных условиях не скажется на работе с графическим изображением.

Однако все форматные методы обладают общим недостатком — для них возможно построение полностью автоматического алгоритма, направленного на обнаружение факта сокрытия (с учетом принципа общеизвестности стеганографической системы). Поэтому их стойкость к атакам пассивных злоумышленников крайне низка.

Неформатные методы, напротив, используют не формат хранения графического изображения, а непосредственно сами данные, которыми изображение представлено в этом формате. Применение неформатных методов неизбежно приводит к появлению искажений, вносимых стеганографической системой, однако при этом они являются более стойкими к атакам как пассивных, так и активных злоумышленников.

Поскольку в статье принят в качестве контейнера видеопоток, то рассматривать форматные методы внедрения ЦВЗ нецелесообразно. Ниже описаны некоторые неформатные методы и алгоритмы внедрения ЦВЗ.

Одним из распространенных методов встраивания ЦВЗ является метод модификации наименьших значимых бит (LSB) областей изображения, к которым глаз человека менее чувствителен. Реализация данного метода имеет низкую вычислительную сложность (высокая скорость таких методов обуславливается отсутствием дополнительных преобразований). Поскольку робастность такого ЦВЗ сравнительно низка, обычные LSB-методы невозможно применять для вышеописанных целей. Однако важно отметить, что использование самого принципа LSB, как инструмента внедрения, очень ценно.

По способу встраивания информации стегоалгоритмы можно разделить на линейные (аддитивные), нелинейные и другие. Алгоритмы аддитивного внедрения информации заключаются в линейной модификации исходного изображения, а ее извлечение в декодере производится корреляционными методами. При этом ЦВЗ обычно складывается с изображением-контейнером либо «вплавляется» (fusion) в него. В нелинейных методах встраивания информации используется скалярное либо векторное квантование. Определенный интерес среди других представляют методы, использующие идеи фрактального кодирования изображений.

Аддитивные алгоритмы

В аддитивных методах внедрения ЦВЗ представляет собой последовательность чисел w_i длиной N , которая внедряется в выбранное подмножество отсчетов исходного изображения f . Основное и наиболее часто используемое выражение для встраивания информации в этом случае

$$f'(m, n) = f(m, n)(1 + \alpha w_i), \quad (1)$$

где f' — модифицированный пиксель изображения; α — весовой коэффициент.

Другой способ встраивания водяного знака был предложен И. Коксом [2]:

$$f'(m, n) = f(m, n) + \alpha w_i \quad (2)$$

или, при использовании логарифмов коэффициентов:

$$f'(m, n) = f(m, n)e^{\alpha w_i}. \quad (3)$$

При встраивании в соответствии с (1) ЦВЗ в декодере находится следующим образом:

$$w_i^* = \frac{f^*(m, n) - f(m, n)}{\alpha f(m, n)}. \quad (4)$$

Здесь под f^* понимаются отсчеты полученного изображения, содержащего или не содержащего ЦВЗ w . После извлечения w_i^* сравнивается с подлинным ЦВЗ. Причем, в качестве меры идентичности водяных знаков используется значение коэффициента корреляции последовательностей

$$\delta = \frac{w^* w}{\|w^*\| \|w\|}. \quad (5)$$

Эта величина варьируется в интервале $[-1; 1]$. Значения, близкие к единице, свидетельствуют о том, что извлеченная последовательность с большой вероятностью может соответствовать встроеному ЦВЗ. Следовательно, в этом случае делается заключение, что анализируемое изображение содержит водяной знак.

В декодере может быть установлен некоторый порог $\tau = \frac{\alpha}{SN} \sum |f'|$ (здесь S — стандартное среднее квадратическое отклонение), который определяет вероятности ошибок первого и второго рода при обнаружении ЦВЗ. При этом коэффициент α может не быть постоянным, а адаптивно изменяться в соответствии с локальными свойствами исходного изображения. Это позволяет сделать водяной знак более робастным (стойким к удалению).

Для увеличения робастности внедрения во многих алгоритмах применяются широкополосные сигналы. При этом информационные биты могут быть многократно повторены, закодированы с применением корректирующего кода либо к ним может быть применено какое-либо другое преобразование.

Наиболее ярким представителем алгоритмов внедрения ЦВЗ на основе использования широкополосных сигналов является алгоритм Кокса и другие, в частности усовершенствованные, алгоритмы [3–9].

Алгоритмы слияния

Если вместо последовательности псевдослучайных чисел в изображение встраивается другое изображение (например, логотип фирмы), то соответствующие алгоритмы внедрения называются алгоритмами слияния. Размер внедряемого сообщения намного меньше размера исходного изображения. Перед встраиванием оно может быть зашифровано или преобразовано каким-нибудь иным способом.

У таких алгоритмов есть два преимущества. Во-первых, можно допустить некоторое искажение скрытого сообщения, так как человек все равно сможет распознать его. Во-вторых, наличие внедренного логотипа является более убедительным доказательством прав собственности, чем наличие некоторого псевдослучайного числа.

Распространенные алгоритмы внедрения изображений в изображения описаны в работах [4, 9].

Консилограммы

В последнее время появился еще один стеганографический способ защиты документов. Разработанный профессором Розеном совместно с профессором Коннектикутского университета Бахрамом Явиди (Bahram Javidi) новый метод стеганографии получил название «concealogram» или «консилограмма» (от conceal — «скрывать» и «голограмма»), поскольку секретная часть документа встраивается в обычное изображение методами, родственными голографическим [10].

Постановка задачи и определение модели решения

Необходимо разработать технологию защиты потоковой видеоинформации от возможных преднамеренных атак в процессе передачи по каналам общего пользования, а также оригинальный метод, осуществляющий защиту такого рода для потока видеоинформации, формируемого в режиме реального времени на устройствах автономного класса.

Вначале следует описать принципы функционирования изучаемой системы.

Аппаратной составляющей такой системы является автономная видеосистема с сигнальным процессором типа ADSP-BF537 с частотой 600 МГц и памятью объемом 32 МБ SDRAM. В обычном режиме работы процессор и ОЗУ имеют загрузженность ЦП и ОЗУ порядка 50–60 %.

Данная система работает в режиме реального времени по следующему принципиальному алгоритму. Производится захват видеок кадров, их обработка на сигнальном процессоре типа ADSP-BF537 (Blackfin), сжатие, накопление последовательности (пакета) кадров для передачи на ло-

кальном запоминающем устройстве и последующая передача информации по открытым каналам связи на удаленный сервер. Поскольку передача осуществляется по незащищенным открытым каналам связи, существует вероятность ее перехвата и намеренного искажения или подмены какой-либо последовательности кадров. Поэтому необходимо подтвердить подлинность видеопотока путем внедрения ЦВЗ на стадии формирования потока. Причем ЦВЗ следует внедрять до процесса сжатия видео, и, следовательно, знак должен быть устойчив к сжатию.

Цифровой водяной знак может представлять собой цветное или черно-белое растровое изображение небольшого размера (например, логотип). Предельный размер внедряемого ЦВЗ рассчитывается исходя из характеристик контейнера и метода внедрения. Поскольку внедрение происходит на уровне бит, в роли ЦВЗ может выступить любая цифровая последовательность, однако наличие извлеченного из кадра осмысленного изображения проще использовать для доказательства подлинности принятого видеопотока.

Если в ходе передачи совершится так называемая «активная» атака на передаваемую информацию, вследствие чего будет произведена подмена кадров целиком или их частичная модификация, то ЦВЗ, внедренный в атакованные кадры, частично или полностью разрушится.

При извлечении водяного знака из принятой видеопоследовательности можно будет однозначно определить, имело ли место вмешательство, и если имело, то каковы его масштабы.

Поскольку передача производится по обычным каналам связи, существует вероятность искажения передаваемой информации (и, как следствие, ЦВЗ) из-за существующих в канале помех. Необходимо установить обоснованный коэффициент достоверности, позволяющий отделить случайные искажения от преднамеренных.

Существует приказ Министерства информационных технологий и связи РФ от 27 сентября 2007 г. № 113 «Об утверждении Требований к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования», в тексте которого среди прочего введены «Технические нормы на показатели функционирования сетей передачи данных». Согласно данному приказу, коэффициент потери пакетов информации не должен превышать 0,1 %, а коэффициент ошибок в пакетах информации — более 0,01 % [11]. Однако реальная ситуация такова, что в сетях общего пользования существуют потери до 5 % передаваемой информации. В связи с этим предлагается установить значение в 95 % для коэффициента достоверности переданного ЦВЗ. Все кадры, содержащие во-

дяной знак, который удовлетворяет этому условию, признаются достоверными.

Учитывая ограниченный временной и вычислительный ресурс на стадии внедрения, планируется защищать цифровым знаком не все кадры подряд, а только некоторую их последовательность (например, 3–5 кадров), причем с определенным интервалом (например, в 15 кадров).

Ввиду того, что предполагаемая атака будет вестись не на отдельный кадр (что является бессмысленным при скорости потока 25 кадров / с), а на значительную их последовательность, декодеру необходимо выбрать группу кадров и проанализировать некоторые кадры из этой группы. Допускается, что в последовательности может присутствовать один или несколько достаточно сильно «зашумленных» кадров, и водяной знак, извлеченный из них, будет сильно разрушен. Однако если после обработки всей группы кадров из определенной доли этих кадров удастся извлечь подлинный ЦВЗ, то делается вывод об отсутствии вмешательства в эту группу кадров.

Подобная методика анализа сигнала является допустимой, поскольку он будет выполняться на компьютере, что подразумевает доступ к несравнимо большему вычислительному ресурсу, чем на стадии внедрения.

Анализ существующих методов внедрения ЦВЗ

В отечественной и зарубежной литературе описано множество различных методов и алгоритмов внедрения цифрового водяного знака в неподвижное видеоизображение. Подобную технологию следует использовать и при работе с видеопотоком.

В таблице приведены самые известные и распространенные методы и алгоритмы [1]. Принципы работы прочих алгоритмов можно считать сходными с тем или иным уже описанным алгоритмом.

Авторы [1] использовали в качестве ЦВЗ псевдослучайную последовательность чисел различной длины (в основном, около 1000 Б). Сохранена авторская нумерация алгоритмов [1].

Далее необходимо провести селекцию упомянутых выше методов и выделить те из них, которые наиболее подходят для решения описанной ранее задачи.

В качестве первичного критерия отбора выбрана методика поиска возможного внедренного ЦВЗ при декодировании. В большинстве упомянутых выше алгоритмов декодер «знает» искомым водяной знак. Из соображений эффективности разрабатываемой системы, а также принятая во внимание относительно безграничный вы-

■ Сравнительная таблица методов и алгоритмов работы с ЦВЗ

№	Принцип работы	Преимущества	Недостатки
Аддитивные алгоритмы			
A17	Модификация 1000 самых больших коэффициентов дискретно-косинусного преобразования (ДКП)	Сильная робастность ЦВЗ при сжатии и других видах обработки сигнала	Трудоемкость вычисления двумерного ДКП
A18	Модификация всех коэффициентов детальных поддиапазонов первого подуровня разложения при выполнении четырехуровневого вейвлет-преобразования	Возможность обнаружения ЦВЗ без исходного изображения. Сильная визуальная незаметность ЦВЗ	Для извлечения ЦВЗ необходимо иметь исходное изображение
A19	Модификация всех коэффициентов LL-поддиапазона вейвлет-преобразования изображения	Возможность модификации алгоритма для использования ключа	То же
A20	Модификация наибольших коэффициентов детальных поддиапазонов трехуровневой декомпозиции изображения	Хорошая визуальная маскировка внедренных данных. Для обнаружения ЦВЗ не требуется наличие исходного изображения	—
A21	Модификация перцептуально значимых коэффициентов трехуровневой декомпозиции изображения с использованием биортогональных вейвлет-фильтров	Робастность ЦВЗ ко многим видам атак. Для обнаружения ЦВЗ не требуется наличие исходного изображения	—
A22	Модификация наибольших коэффициентов каждого поддиапазона трехуровневой декомпозиции изображения (за исключением поддиапазонов наивысшего уровня разрешения)	Для обнаружения ЦВЗ не требуется наличие исходного изображения	—
A23	Модификация 1000 наибольших коэффициентов пакетного вейвлет-преобразования (ЦВЗ также подвергается преобразованию)	То же	—
A24	Модификация наибольших коэффициентов трехуровневого вейвлет-преобразования (коэффициенты отбираются в соответствии с заданным порогом)	Высокая робастность ЦВЗ к некоторым видам атак	Для извлечения ЦВЗ необходимо иметь исходное изображение
A25	Модификация коэффициентов четырехуровневого вейвлет-преобразования, отобранных с учетом заданного порога	Высокая робастность внедряемого ЦВЗ	То же
A26	Модификация наибольших коэффициентов из высокочастотного и среднечастотного диапазонов преобразования Хаара	Высокая робастность к атакам с изменением масштаба. Возможность сокращения количества вычислительных операций при обнаружении ЦВЗ	— « —
A27	Модификация значимых коэффициентов всех поддиапазонов пятиуровневого вейвлет-преобразования	Возможность модификации алгоритма для использования стегоключа	— « —
A28	Алгоритм A28 представляет собой модифицированный вариант алгоритма A27, со слепым извлечением ЦВЗ	Для обнаружения ЦВЗ не требуется наличие исходного изображения	Сильно пониженная помехоустойчивость по сравнению с алгоритмом A27
A29	Модификация всех коэффициентов одноуровневой декомпозиции исходного изображения	Большой размер скрываемого ЦВЗ (до четверти размера исходного изображения)	Для извлечения ЦВЗ необходимо иметь исходное изображение

Окончание таблицы

№	Принцип работы	Преимущества	Недостатки
A30	Модификация всех коэффициентов детальных поддиапазонов вейвлет-преобразования исходного изображения (преобразование Хаара)	Для обнаружения ЦВЗ не требуется наличие исходного изображения	—
Алгоритмы на основе слияния ЦВЗ и контейнера			
A31	Модификация высокочастотных коэффициентов голубой компоненты изображения после пятиуровневого целочисленного вейвлет-преобразования	Для обнаружения ЦВЗ не требуется наличие исходного изображения	—
A32	Модификация ВЧ-НЧ и НЧ-ВЧ областей двухуровневого вейвлет-преобразования исходного изображения	Большой размер скрываемого ЦВЗ	Для извлечения ЦВЗ необходимо иметь исходное изображение; низкая стойкость алгоритма по отношению к операциям обработки сигнала
A33	Модификация n -мерного вектора коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования исходного изображения	Большой размер скрываемого ЦВЗ. Возможно контролировать робастность, уровень искажений и качество внедряемого изображения	Для извлечения ЦВЗ необходимо иметь исходное изображение
Алгоритмы с использованием фрактальных преобразований			
A34	Формируется из исходного изображения (до 15 различных ЦВЗ)	Для обнаружения ЦВЗ не требуется наличие исходного изображения	—
A35	Использование строки бит	Наличие секретного ключа; устойчивость к сжатию JPEG	—
A36	Использование строки бит	Наличие секретного ключа	Возможно заметное ухудшение качества изображения при встраивании ЦВЗ

числительный и временной ресурс, имеющийся на стороне приема и расшифровки потока, на данной стадии были отобраны только алгоритмы со «слепым» извлечением: алгоритмы A17, A20, A21, A23, A30.

Далее, принимая во внимание особенности используемой аппаратной платформы, при отборе методов необходимо учитывать ограниченную вычислительную мощность используемой аппаратной системы.

Таким образом, необходимо ранжировать имеющиеся алгоритмы по вычислительной сложности используемых в них методов обработки сигнала. В алгоритме A17, основанном на дискретно-косинусном (дискретно-синусном) преобразовании сигнала используются относительно емкостные для процессора формулы вычисления косинусов (синусов) соответствующих величин (даже с использованием численных методов вычисления синуса). Другой тип алгоритмов (A20, A21, A23, A30), основанных на вейвлет-преобразова-

нии сигнала (ДВП, например, преобразование Хаара), можно представить в виде самых простых (и, соответственно, самых быстрых) для вычисления процессором математических операций. Это дает значительную экономию времени по сравнению с ДКП.

Таким образом, на следующем этапе отсева был исключен алгоритм A17, в основе которого лежит ДКП.

Рассматривая оставшиеся алгоритмы, выделим 2 семейства алгоритмов ДВП: быстрое вейвлет-преобразование (БВП) (A20, A21, A30) и преобразование с использованием вейвлет-пакетов (A23).

Согласно работе [12], при использовании модифицированного алгоритма Малла (БВП) для преобразования сигнала длиной $N = 2^n$ до k -го уровня потребуется $2^{n-1}(2^k - 1 - 1)$ операций сложения (нормирующие множители не учитываются, умножение на единицу также игнорируется [12]). После этого высокочастотную последова-

тельность k -го уровня необходимо обработать в соответствии с выбранным алгоритмом. Число таких операций будет равно сумме элементов геометрической прогрессии со знаменателем 2, начинающейся с 2^{n-k} и заканчивающейся числом 2^{n-1} , т. е. $2^n \left(1 - \frac{1}{2^k}\right)$ операций. Поскольку при больших k множитель $\left(1 - \frac{1}{2^k}\right) \rightarrow 1$, то обработка будет занимать 2^n операций. Затем необходимо произвести синтез сигнала по инверсным формулам, поэтому число операций синтеза также будет $2^n - 1(2^k - 1)$. Итого, сложность операции внедрения ЦВЗ с использованием алгоритма БВП сигнала будет $2^n + 2^{k-1}$ операций. Хранить в памяти нужно 2^{n-k} низкочастотных и $2^n \left(1 - \frac{1}{2^k}\right)$ высокочастотных коэффициентов всех уровней, т. е. 2^n чисел.

При использовании же пакетных вейвлетов преобразование также выполняется для всех низко- и высокочастотных диапазонов каждого уровня с использованием, например, алгоритма одиночного дерева. Для сигнала длиной $N = 2^n$ при применении двухканального блока фильтров число базисов S_k , перебираемых алгоритмом одиночного дерева, вычисляется рекурсивно [13]:

$$S_k = S_{k-1}^2 + 1, \text{ где } k \in [2, 3, \dots, n], \text{ а } S_1 = 2.$$

Для сигнала длиной $N = 2^n$ и дерева максимальной высотой k вычислительная сложность алгоритма одиночного дерева будет $O(Nk)$. Число операций для декомпозиции сигнала до k -го уровня составляет $3(2^n - 2^{k-1})$. Обработка всех высокочастотных коэффициентов (собственно внедрение ЦВЗ) не будет превышать $3 \cdot 2^{n-1}$ операций. Итого $3(5 \cdot 2^{n-1} - 2^k)$ операций. Объем памяти для хранения коэффициентов всех уровней равен $3 \cdot 2^{n-1} + 2^{n-k}$.

Исходя из вышеописанного делаем следующие выводы.

Использование пакетного вейвлет-преобразования позволит получить разложение, адаптированное к сигналу, хотя адаптивность достигается за счет увеличения вычислительной стоимости. Поскольку в результате внедрения ЦВЗ будут изменены небольшие коэффициенты преобразования, то добиться большей незаметности внедрения позволит именно пакетное вейвлет-преобразование.

Использование сигнально-независимого вейвлет-преобразования несет меньшую вычислительную нагрузку, но, возможно, внедрение ЦВЗ будет более заметным.

Таким образом, в результате анализа известных алгоритмов был отобран алгоритм, имею-

щий самую низкую вычислительную мощность (и соответственно, наименьшее время выполнения), т. е. алгоритм БВП Хаара (А30).

Однако для решения конкретной поставленной задачи (внедрение ЦВЗ в видеопоток, формируемый при помощи сигнального процессора), отобранный алгоритм необходимо модернизировать и оптимизировать по следующим параметрам:

- 1) необходимо решение для внедрения цветного изображения;
- 2) необходимо решение в целых числах, поскольку перевод процессора в режим работы с плавающей точкой увеличит временные затраты и затраты по памяти;
- 3) внедряемый ЦВЗ должен быть устойчив к сжатию и помехам;
- 4) необходимо определить наиболее эффективные параметры ДВП (уровень декомпозиции и т. д.) для решения поставленной задачи.

Заключение

Как показывает практика, за последние несколько лет актуальность проблемы информационной безопасности неуклонно возрастала, постоянно стимулируя при этом поиск новых методов защиты информации.

Сделать заметный вклад в общее дело наряду с другими призваны и стеганографические методы защиты информации, в частности, методы компьютерной стеганографии. Эта технология имеет юридическую силу и применяется для подтверждения подлинности цифровой информации, позволяя определить факт несанкционированного в нее вмешательства и ее искажения.

Поскольку целью данной работы был анализ алгоритмов внедрения ЦВЗ в изображения и оценка возможности использовать эти алгоритмы для защиты потокового видео в рамках аппаратной платформы с использованием процессора ADSP-BF537 (или подобного ему), были определены критерии оценки:

- независимость от внедренного ЦВЗ («слепые» методы);
- низкая вычислительная сложность алгоритма;
- сравнительно малый объем ОЗУ.

Были исследованы известные алгоритмы внедрения ЦВЗ, такие как А17 (Сох), А18 (Barni), А21 (J. Kim), А25 (С. Podilchuk) и др.

В ходе многоуровневой селекции был отобран алгоритм (А30), использующий БВП Хаара. Следующим этапом исследований планируется оптимизация выбранного алгоритма по указанным параметрам для защиты реального видеопотока.

Литература

1. Грибунин В. Г., Оков И. Н., Туринцев И. В. Цифровая стеганография. — М.: Солон-Пресс, 2002. — 272 с.
2. Cox I. J., Kilian J., Leighton T., Shamoon T. G. Secure spread spectrum watermarking for images, audio and video // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Image Processing. 1996. Vol. 3. P. 243–246.
3. Barni M. et al. DWT-based technique for spatio-frequency masking of digital signatures // Proc. of the 11th SPIE Annual Symp. Electronic Imaging '99: Security and Watermarking of Multimedia Contents. San Jose, CA, 1999. Vol. 3657. P. 31–39.
4. Dugad R., Ratakonda K., Ahuja N. A new wavelet-based scheme for watermarking images // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Image Processing. 1998. Vol. 1. P. 419–423.
5. Kim Y.-S., Kwon O.-H., Park R.-H. Wavelet based watermarking method for digital images using the human visual system // Electronic Letters. 1999. N 35(6). P. 466–467.
6. Nicchiotti G., Ottaviano E. Non-invertible statistical wavelet watermarking // Proc. of the 9th European Signal Processing Conf. European Association for Signal Processing. Island of Rhodes, Greece. Sept. 1998. P. 2289–2292.
7. Podilchuk C. I., Zeng W. Digital image watermarking using visual models // IEEE J. on Selected Areas in Communications. 1998. Vol. 16. P. 525–539.
8. Wang Hounq-Jyh, Lu C., Kuo C.-C. Jay. Image protection via watermarking on perceptually significant wavelet coefficients // Proc. of the IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing. Redondo Beach, CA, 1998. Vol. 1. P. 279–284.
9. Xia X.-G., Boncelet C. G., Arce G. R. Wavelet transform based watermark for digital images // Optics Express. 1998. N 3. P. 497–502.
10. Смирнов М. В. Голографический подход во встраивании скрытых ЦВЗ в фотографические изображения // Оптические технологии. 2005. Т. 72. № 6. С. 464–468.
11. Об утверждении Требований к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования: Приказ Министерства информационных технологий и связи РФ от 27 сентября 2007 г. № 113 // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. 2007. 26 нояб. № 48. С. 165–169.
12. Копенков В. Н. Эффективные алгоритмы локального дискретного вейвлет-преобразования с базисом Хаара // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32. № 1. С. 78–84.
13. Воробьев В. И., Грибунин В. Г. Теория и практика вейвлет-преобразования / ВУС. — СПб., 1999. — 204 с.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (80x@mail.ru).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.

УДК 621.391.01

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РАЗРЕШЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

В. В. Акимцев,

канд. техн. наук, доцент

А. Н. Мещерин,

адъюнкт

Санкт-Петербургское высшее военное училище радиоэлектроники (военный институт)

Предложены показатели качества, учитывающие статистический характер задачи разрешения сигналов и позволяющие сравнивать различные алгоритмы разрешения между собой. Приводятся примеры их использования.

Ключевые слова — разрешение-обнаружение сигналов, полное разрешение сигналов, показатель качества.

Введение

При сравнении различных алгоритмов разрешения сигналов возникает необходимость в некоторых количественных показателях, позволяющих судить о качестве решения задачи алгоритмами разрешения и обоснованно заключать, какому из них следует отдать предпочтение в тех или иных условиях применения.

С позиций полного разрешения целей [1] информацию, в достаточной степени характеризующую групповую цель, составляют:

1) число N образующих ее объектов;

2) ее конфигурация (взаимное расположение N отдельных объектов, образующих групповую цель), которую можно охарактеризовать углами направления (азимут β_{0j} и углом места ε_{0j}) на все отдельные объекты и временными задержками δt_{0j} ($j = 1, \dots, N$) сигналов, отраженных от всех отдельных объектов, относительно некоторого начала отсчетов (при необходимости кроме указанных радиолокационных координат могут использоваться и их производные).

Указанная информация и должна лежать в основе показателей, характеризующих качество решения задачи алгоритмами разрешения.

Результатом применения какого-либо алгоритма разрешения целей могут быть лишь оценки N^* , β_{0j}^* , ε_{0j}^* и δt_{0j}^* ($j = 1, \dots, N^*$). Вследствие статистического характера процедур обнаружения и оценивания при определении указанных величин кроме правильных оценок: $N^* = N$, $\beta_{0j}^* = \beta_{0j}$, $\varepsilon_{0j}^* = \varepsilon_{0j}$, $\delta t_{0j}^* = \delta t_{0j}$, могут формироваться и оши-

бочные: $N^* \neq N$, $\beta_{0j}^* \neq \beta_{0j}$, $\varepsilon_{0j}^* \neq \varepsilon_{0j}$, $\delta t_{0j}^* \neq \delta t_{0j}$. Очевидно, качество разрешения будет тем лучше, чем меньше отличаются N^* от N , β_{0j}^* от β_{0j} , ε_{0j}^* от ε_{0j} и δt_{0j}^* от δt_{0j} .

Отметим, что любой показатель качества будет в какой-то степени субъективен. По этой причине можно ввести несколько показателей, в разной степени характеризующих качество решения задачи разрешения. Общее требование, которому должен отвечать любой из таких показателей, — учет статистического характера задачи разрешения сигналов, так как в основе понятия разрешение сигналов лежат статистические понятия обнаружение сигналов и оценивание их параметров [2].

Показателю качества разрешения целей Q , как это принято при решении статистических задач [3, 4], целесообразно придать смысл потерь (ущерба), возникающих при формировании ошибочных оценок N^* , β_{0j}^* , ε_{0j}^* , δt_{0j}^* . Тогда значение $Q = 0$ указывает на безошибочное решение задачи разрешения (потери из-за ошибочных оценок N^* , β_{0j}^* , ε_{0j}^* , δt_{0j}^* отсутствуют), а из нескольких сравниваемых алгоритмов разрешения лучшим следует признавать тот, для которого значение Q при прочих равных условиях имеет наименьшую величину. В качестве дополнительного можно ввести требование, заключающееся в том, чтобы структура показателя Q учитывала величину различия между N^* и N , β_{0j}^* и β_{0j} , ε_{0j}^* и ε_{0j} , δt_{0j}^* и δt_{0j} таким образом, что большим различиям соответствовало бы и большее значение Q (большие потери).

Простейшей из процедур разрешения является разрешение-обнаружение сигналов, заключающе-

еся в определении числа объектов, образующих групповую цель [1]. Такие процедуры не предполагают оценку величин β_{0j} , ε_{0j} и δt_{0j} . По этой причине и показатель качества разрешения-обнаружения должен определяться только различиями в статистическом смысле между величинами N и N^* . В общем случае при полном разрешении сигналов [1], предполагающем обнаружение, оценку числа и измерение координат и параметров движения каждого из объектов, образующих групповую цель, показатель качества разрешения должен определяться статистическими различиями между всеми величинами, подлежащими оценке (между N^* и N , β_{0j}^* и β_{0j} , ε_{0j}^* и ε_{0j} , δt_{0j}^* и δt_{0j}).

Показатели качества разрешения-обнаружения

Потери, связанные с ошибками при определении числа N объектов в составе групповой цели, можно определить как расстояние $d(N, N^*)$ между точками N и N^* в одномерном метрическом пространстве \mathbf{R}^1 [5]. Вследствие статистического характера задачи оценивания параметров расстояние $d(N, N^*)$ будет случайным образом изменяться при каждом применении алгоритмов разрешения-обнаружения в одних и тех же условиях. По этой причине имеет смысл рассматривать лишь средние потери (среднее расстояние между точками N и N^* пространства \mathbf{R}^1), возникающие при многократном применении алгоритмов разрешения-обнаружения:

$$M[d(N, N^*)] = m_d = |M(N^* - N)| = |m_N^* - N|,$$

где $m_N^* = M(N^*)$ — среднее значение оценки N^* . Величина m_d обладает всеми свойствами функции потерь [6]: $m_d = 0$ только при $m_N^* = N$ и возрастает при увеличении различия между N и m_N^* .

За показатель качества разрешения-обнаружения можно принять безразмерную величину [7]

$$Q_N = \frac{m_d}{N} = \left| \frac{m_N^*}{N} - 1 \right|, \quad (1)$$

представляющую собой относительную ошибку при оценивании значения N .

В определении (1) неизвестной величиной является среднее значение m_N^* оценки числа объектов N , образующих групповую цель. Найти m_N^* можно из следующих соображений.

При многократном применении в одних и тех же условиях какого-либо из алгоритмов разрешения-обнаружения групповой цели, состоящей из N объектов, возможно получение различных результатов: $N_1^* = 1, N_2^* = 2, \dots, N_N^* = N, \dots, N_n^* = n$ (n может быть как больше, так и меньше N), образующих полную группу событий. Пусть извест-

ны вероятности этих исходов $p_1, p_2, \dots, p_N, \dots, p_n$ ($\sum p_i = 1$). Тогда распределение дискретной случайной величины N^* характеризуется рядом распределения $\{i, p_i\}$: $(1, p_1), (2, p_2), \dots, (N, p_N), \dots, (n, p_n)$. Ее среднее значение [8]

$$m_N^* = \sum_{i=1}^n p_i N_i^* = \sum_{i=1}^n i p_i.$$

Подстановка выражения для m_N^* в (1) дает

$$Q_N = \left| \frac{m_N^*}{N} - 1 \right| = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n i p_i - 1 \right|. \quad (2)$$

Один из результатов ($N^* = N$) является правильным. Выделив соответствующую ему составляющую в правой части (2), получим

$$Q_N = \left| \frac{1}{N} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq N}}^n i p_i + p_N - 1 \right|. \quad (3)$$

Определить значения вероятностей p_i , входящих в выражение (3), в общем случае не представляется возможным. По этой причине величины p_i в (3) следует заменить их оценками p_i^* , найденными по результатам экспериментов или статистического моделирования. Таким образом, окончательное выражение для показателя качества разрешения-обнаружения примет вид

$$Q_N = \left| \frac{1}{N} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq N}}^n i p_i^* + p_N^* - 1 \right|. \quad (4)$$

Как видно из (4), величина Q_N зависит от значения вероятности p_N^* правильного определения числа объектов, образующих групповую цель, и тем меньше, чем ближе к единице вероятность p_N^* . При $p_N^* = 1$, когда задача определения числа объектов, образующих групповую цель, решается безошибочно, все $p_i^* = 0$ ($i = 1, \dots, n; i \neq N$). В этом случае (4) дает $Q_N = 0$ (потери при разрешении-обнаружении сигналов отсутствуют).

Можно придать показателю качества разрешения-обнаружения сигналов несколько другой статистический смысл, представив истинный количественный состав групповой цели и результат его оценки некоторыми векторами в многомерном евклидовом пространстве.

Пусть при многократном применении в одних и тех же условиях алгоритма разрешения-обнаружения групповой цели, состоящей из N объектов, полученные результаты образуют полную группу событий и представляют собой случайную величину N^* , распределение которой характеризуется рядом распределения $\{i, p_i^*\}$, $i = 1, \dots, n$.

Рассмотрим евклидово пространство $\mathbf{R}^{\max(N,n)}$ с ортогональным нормированным базисом [5]:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_1 &= (1, 0, 0, \dots, 0), \\ \mathbf{e}_2 &= (0, 1, 0, \dots, 0), \\ \mathbf{e}_3 &= (0, 0, 1, \dots, 0), \\ &\dots\dots\dots \\ \mathbf{e}_{\max(N, n)} &= (0, 0, 0, \dots, 1). \end{aligned} \quad (5)$$

Свяжем с величиной m_N^* вектор $\mathbf{m}_f(p_1^*, 2p_2^*, \dots, np_n^*)$. В базисе (5) вектор \mathbf{m}_f запишется в виде

$$\mathbf{m}_f = \sum_{i=1}^{\max(N, n)} ip_i^* \mathbf{e}_i.$$

Истинный количественный состав групповой цели — величина детерминированная и в каждом эксперименте имеет одно и то же значение N с вероятностью $p_N^* = 1$. Свяжем с величиной N вектор $\mathbf{f}(0, 0, \dots, N, \dots, 0)$, все составляющие которого, кроме N -й, равны нулю. В базисе (5)

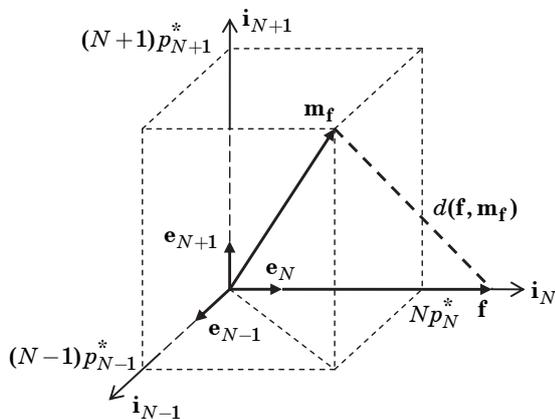
$$\mathbf{f} = N\mathbf{e}_N.$$

Нормы векторов \mathbf{f} и \mathbf{m}_f соответственно равны [5]

$$\begin{aligned} \|\mathbf{f}\| &= N; \\ \|\mathbf{m}_f\| &= \sqrt{\sum_{i=1}^{\max(N, n)} (ip_i^*)^2}. \end{aligned}$$

Иллюстрация представления векторов \mathbf{f} и \mathbf{m}_f для трех осей пространства $\mathbf{R}^{\max(N, n)}$ ($n > N$), образованных базисными векторами \mathbf{e}_{N-1} , \mathbf{e}_N и \mathbf{e}_{N+1} , приведена на рис. 1.

Потери из-за ошибок при определении числа N объектов в составе групповой цели отсутствуют, когда при каждом применении алгоритма разрешения-обнаружения величина N^* принимает единственное значение $N^* = N$. В этом случае $p_N^* = 1$, все $p_i^* = 0$ ($i \neq N$) и $\mathbf{m}_f = \mathbf{f} = N\mathbf{e}_N$. В противном случае алгоритм наряду с правильным решением $N^* = N$ формирует и ошибочные $N^* \neq N$. Возника-



■ Рис. 1. Представление векторов \mathbf{f} и \mathbf{m}_f в трехмерном базисе

ющие из-за неправильной оценки числа объектов групповой цели потери можно связать с расстоянием $d(\mathbf{f}, \mathbf{m}_f)$ между векторами \mathbf{f} и \mathbf{m}_f , определяемым нормой вектора $\mathbf{m}_f - \mathbf{f}$ как [5]

$$d(\mathbf{f}, \mathbf{m}_f) = \|\mathbf{m}_f - \mathbf{f}\| = \sqrt{(\mathbf{m}_f - \mathbf{f})(\mathbf{m}_f - \mathbf{f})}. \quad (6)$$

Раскрывая в (6) скалярное произведение $(\mathbf{m}_f - \mathbf{f})(\mathbf{m}_f - \mathbf{f})$, получим

$$d(\mathbf{f}, \mathbf{m}_f) = \sqrt{\|\mathbf{m}_f\|^2 + \|\mathbf{f}\|^2 - 2\mathbf{m}_f\mathbf{f}}, \quad (7)$$

где

$$\mathbf{m}_f\mathbf{f} = \left(\sum_{i=1}^{\max(N, n)} ip_i^* \mathbf{e}_i \right) (N\mathbf{e}_N) = N^2 p_N^*.$$

За показатель качества разрешения-обнаружения можно принять безразмерную величину $Q_{pN} = d(\mathbf{f}, \mathbf{m}_f) / \|\mathbf{f}\|$. Тогда из (7) следует, что

$$\begin{aligned} Q_{pN} &= \frac{1}{\|\mathbf{f}\|} \sqrt{\|\mathbf{f}\|^2 + \|\mathbf{m}_f\|^2 - 2\mathbf{m}_f\mathbf{f}} = \sqrt{1 + \frac{\|\mathbf{m}_f\|^2}{\|\mathbf{f}\|^2} - 2 \frac{\mathbf{m}_f\mathbf{f}}{\|\mathbf{f}\|^2}} = \\ &= \sqrt{1 + \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{\max(N, n)} (ip_i^*)^2 - 2p_N^*}. \end{aligned} \quad (8)$$

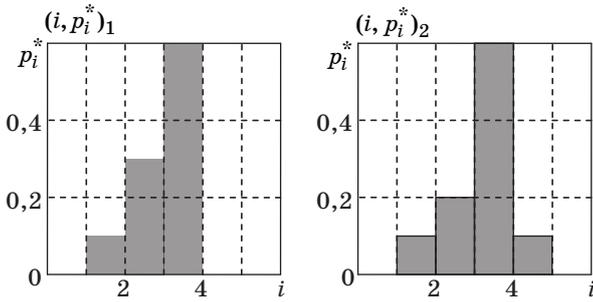
Как видно из (8), величина Q_{pN} зависит от значения вероятности p_N^* правильного определения числа объектов, образующих групповую цель, и тем меньше, чем ближе к единице вероятность p_N^* . При $p_N^* = 1$, когда задача определения числа объектов, образующих групповую цель, решается безошибочно, все $p_i^* = 0$ ($i = 1, \dots, n; i \neq N$). В этом случае (8) дает $Q_{pN} = 0$ (потери при разрешении-обнаружении сигналов отсутствуют).

Каждый из показателей (4) и (8) может характеризовать качество алгоритмов разрешения-обнаружения. Однако в общем случае показатели Q_N и Q_{pN} в различной степени зависят от свойств оценки N^* (ее возможных значений N_i^* и их вероятностей p_i^*), формируемой тем или иным алгоритмом разрешения-обнаружения.

Пример 1. Для сравнения возможностей двух алгоритмов разрешения-обнаружения для некоторых условий применения (количество N объектов групповой цели, отношение сигнал/шум по каждому из ее объектов, особенности ее конфигурации и т. д.) проведена серия экспериментов (моделирование). Число объектов, образующих групповую цель, $N = 3$. Полученные ряды распределений случайной величины N^* для каждого из сравниваемых алгоритмов имеют вид:

- 1) $\{i, p_{ij}^*\}: (1; 0,1), (2; 0,3), (3; 0,6)$;
- 2) $\{i, p_{ij}^*\}: (1; 0,1), (2; 0,2), (3; 0,6), (4; 0,1)$.

Гистограммы рядов распределений $\{i, p_{ij}^*\}_1$ и $\{i, p_{ij}^*\}_2$ показаны на рис. 2. Отметим, что различие



■ Рис. 2. Гистограммы распределений примера 1

распределений случайной величины N^* для каждого из сравниваемых алгоритмов не является сколько-нибудь существенным.

Вычисления по формулам (4) и (8) дают

$$Q_3(1) = 0,167, Q_3(2) = 0,1;$$

$$Q_{p3}(1) = 0,448, Q_{p3}(2) = 0,443.$$

При использовании показателя Q_N предпочтнее следует отдать второму алгоритму, так как $Q_3(2) < Q_3(1)$. С другой стороны, и $Q_{p3}(2) < Q_{p3}(1)$, но различие между величинами $Q_{p3}(1)$ и $Q_{p3}(2)$ незначительно. Поэтому, хотя формально предпочтение следует отдать второму алгоритму, но относительно показателя Q_{pN} возможности сравниваемых алгоритмов в рассматриваемых условиях применения можно считать приблизительно одинаковыми.

Показатели качества полного разрешения сигналов

Показатели качества Q_N (4) и Q_{pN} (8) учитывают только потери, связанные с ошибкой определения числа N объектов, образующих групповую цель. В общем случае при разрешении целей необходимо учитывать и потери, связанные с ошибками оценки конфигурации групповой цели.

Истинную конфигурацию групповой цели, состоящей из N отдельных объектов, можно задать системой трех векторов: $t_R(\delta t_{01}, \delta t_{02}, \dots, \delta t_{0N})$, составляющими δt_{0j} которого являются временные задержки сигналов, отраженных от N объектов групповой цели, относительно некоторого начала отсчетов; $t_\beta(\beta_{01}, \beta_{02}, \dots, \beta_{0N})$, составляющими β_{0j} которого являются азимуты N объектов групповой цели; $t_\epsilon(\epsilon_{01}, \epsilon_{02}, \dots, \epsilon_{0N})$, составляющими ϵ_{0j} которого являются углы места N объектов групповой цели. При каждом применении в одних и тех же условиях алгоритма разрешения результаты оценки конфигурации групповой цели представляются векторами $t_{Ri}^*(\delta t_{01}^*, \delta t_{02}^*, \dots, \delta t_{0k}^*)$, $t_{\beta i}^*(\beta_{01}^*, \beta_{02}^*, \dots, \beta_{0l}^*)$ и $t_{\epsilon i}^*(\epsilon_{01}^*, \epsilon_{02}^*, \dots, \epsilon_{0n}^*)$, где в общем случае индексы k, l и n могут различаться по величине и в разных экспериментах принимать

различные значения. Ошибки оценки конфигурации групповой цели, очевидно, связаны с несовпадением размерности векторов t_R и t_{Ri}^* , t_β и $t_{\beta i}^*$, t_ϵ и $t_{\epsilon i}^*$, а также с различием их составляющих δt_{0j} и δt_{0j}^* , β_{0j} и β_{0j}^* , ϵ_{0j} и ϵ_{0j}^* . По этой причине потери из-за ошибок оценки конфигурации групповой цели имеет смысл связать с некоторыми усредненными величинами, являющимися функциями как случайной размерности, так и случайных составляющих векторов t_{Ri}^* , $t_{\beta i}^*$ и $t_{\epsilon i}^*$.

Составляющие векторов t_R , t_β и t_ϵ в каждом эксперименте, проводимом при одних и тех же условиях, имеют одно и то же значение. Поэтому истинную конфигурацию групповой цели, состоящей из N отдельных объектов, можно охарактеризовать тройкой чисел, каждое из которых равно какой-либо комбинации значений составляющих векторов t_R , t_β и t_ϵ . Истинную конфигурацию однозначно характеризуют, например, линейные комбинации (суммы)

$$S_R = \sum_{j=1}^N \delta t_{0j}, S_\beta = \sum_{j=1}^N \beta_{0j}, S_\epsilon = \sum_{j=1}^N \epsilon_{0j}.$$

Аналогичные суммы составляющих векторов t_{Ri}^* , $t_{\beta i}^*$ и $t_{\epsilon i}^*$

$$S_{Ri}^* = \sum_{j=1}^k \delta t_{0j}^*, S_{\beta i}^* = \sum_{j=1}^l \beta_{0j}^*, S_{\epsilon i}^* = \sum_{j=1}^n \epsilon_{0j}^*$$

в каждом из экспериментов по указанным выше причинам дают возможные значения случайных величин S_R^* , S_β^* и S_ϵ^* . Следовательно, как и в задаче разрешения-обнаружения, показателями качества полного разрешения сигналов по каждой из координат могут быть безразмерные величины

$$Q_R = \frac{M[d(S_R, S_R^*)]}{S_R} = \left| \frac{M(S_R^*)}{S_R} - 1 \right| = \left| \frac{m_{SR}^*}{S_R} - 1 \right|;$$

$$Q_\beta = \frac{M[d(S_\beta, S_\beta^*)]}{S_\beta} = \left| \frac{M(S_\beta^*)}{S_\beta} - 1 \right| = \left| \frac{m_{S\beta}^*}{S_\beta} - 1 \right|;$$

$$Q_\epsilon = \frac{M[d(S_\epsilon, S_\epsilon^*)]}{S_\epsilon} = \left| \frac{M(S_\epsilon^*)}{S_\epsilon} - 1 \right| = \left| \frac{m_{S\epsilon}^*}{S_\epsilon} - 1 \right|, \quad (9)$$

представляющие собой средние нормированные расстояния между точками S_R и S_R^* , S_β и S_β^* , S_ϵ и S_ϵ^* пространства R^1 .

Средние значения m_{SR}^* , $m_{S\beta}^*$ и $m_{S\epsilon}^*$, входящие в определения (9), находятся известными методами [8]. Например, для нахождения m_{SR}^* необходимо по полученным в проведенных экспериментах значениям случайной величины S_R^* построить статистическое распределение (статистический ряд), т. е. разбить весь диапазон изменения случайной величины S_R^* на некоторое число r интервалов и найти вероятности p_i^* попадания S_R^* в i -й интервал. Используя статистическое распределе-

ние, легко вычислить его среднее значение m_{SR}^* , определяемое как [8]

$$m_{SR}^* = \sum_{i=1}^r p_i^* S_{Ri}^*(i),$$

где $S_{Ri}^*(i)$ — «представитель» i -го интервала (его среднее значение). Тогда

$$Q_R = \left| \frac{m_{SR}^*}{S_R} - 1 \right| = \left| \frac{1}{S_R} \sum_{i=1}^r p_i^* S_{Ri}^*(i) - 1 \right|. \quad (10)$$

Аналогичным образом получают показатели качества

$$Q_\beta = \left| \frac{m_{S\beta}^*}{S_\beta} - 1 \right| = \left| \frac{1}{S_\beta} \sum_{i=1}^r p_i^* S_{\beta i}^*(i) - 1 \right|;$$

$$Q_\varepsilon = \left| \frac{m_{S\varepsilon}^*}{S_\varepsilon} - 1 \right| = \left| \frac{1}{S_\varepsilon} \sum_{i=1}^r p_i^* S_{\varepsilon i}^*(i) - 1 \right|. \quad (11)$$

Показатели качества (10), (11) полного разрешения сигналов по соответствующим координатам по внешнему виду и в идейном смысле близки показателю качества разрешения-обнаружения Q_N (4).

Объединение показателей (10), (11) в какие-либо комбинации дает показатели качества полного разрешения сигналов по нескольким координатам. Используя, например, простейшее из объединений — линейную комбинацию, можно ввести показатели качества полного разрешения сигналов по направлению (по азимуту и углу места) $Q_{\beta\varepsilon} = Q_\beta + Q_\varepsilon$. Показатель качества полного разрешения по времени запаздывания и азимуту, очевидно, запишется как $Q_{R\beta} = Q_R + Q_\beta$, а показатель полного разрешения по трем координатам — как $Q_{R\beta\varepsilon} = Q_R + Q_\beta + Q_\varepsilon$.

Построив статистические ряды для случайных величин S_R^* , S_β^* и S_ε^* , можно отобразить ошибки оценки конфигурации групповой цели в евклидовом пространстве \mathbf{R}^r с ортогональным нормированным базисом:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_1 &= (1, 0, 0, \dots, 0), \\ \mathbf{e}_2 &= (0, 1, 0, \dots, 0), \\ \mathbf{e}_3 &= (0, 0, 1, \dots, 0), \\ &\dots \\ \mathbf{e}_r &= (0, 0, 0, \dots, 1). \end{aligned} \quad (12)$$

Свяжем с величиной m_{SR}^* вектор $\mathbf{m}_f [p_1^* S_{R1}^*(1), p_2^* S_{R2}^*(2), \dots, p_r^* S_{Rr}^*(r)]$. В базисе (12) вектор \mathbf{m}_f запишется в виде

$$\mathbf{m}_f = \sum_{i=1}^r p_i^* S_{Ri}^*(i) \mathbf{e}_i.$$

Сумма S_R , характеризующая истинную конфигурацию групповой цели, — величина детерминированная, имеющая в каждом эксперименте одно и то же значение с вероятностью $p_j^* = 1$, где

j — номер интервала статистического ряда, в который попадает величина S_R . Свяжем с величиной S_R вектор $\mathbf{f}(0, 0, \dots, S_R, \dots, 0)$, все составляющие которого, кроме j -й, равны нулю. В базисе (12)

$$\mathbf{f} = S_R \mathbf{e}_j.$$

Нормы векторов \mathbf{f} и \mathbf{m}_f соответственно равны [5]

$$\|\mathbf{f}\| = S_R; \quad \|\mathbf{m}_f\| = \sqrt{\sum_{i=1}^r [S_{Ri}^*(i) p_i^*]^2}.$$

Потери, возникающие из-за неправильной оценки конфигурации групповой цели по времени запаздывания, как и ранее, можно связать с расстоянием между векторами \mathbf{f} и \mathbf{m}_f

$$\begin{aligned} d(\mathbf{f}, \mathbf{m}_f) &= \|\mathbf{m}_f - \mathbf{f}\| = \sqrt{(\mathbf{m}_f - \mathbf{f})(\mathbf{m}_f - \mathbf{f})} = \\ &= \sqrt{\|\mathbf{m}_f\|^2 + \|\mathbf{f}\|^2 - 2\mathbf{m}_f \mathbf{f}}, \end{aligned}$$

где

$$\mathbf{m}_f \mathbf{f} = \left(\sum_{i=1}^r p_i^* S_{Ri}^*(i) \mathbf{e}_i \right) (S_R \mathbf{e}_j) = S_{Rj}^*(j) S_R p_j^*.$$

Поскольку S_R и $S_{Rj}^*(j)$ принадлежат j -му интервалу статистического ряда, то

$$S_{Rj}^*(j) \approx S_R \text{ и } \mathbf{m}_f \mathbf{f} \approx S_R^2 p_j^*.$$

Принимая, как и в задаче разрешения-обнаружения, за показатель качества полного разрешения сигналов по времени запаздывания безразмерную величину $Q_{pR} = d(\mathbf{f}, \mathbf{m}_f) / \|\mathbf{f}\|$, получим

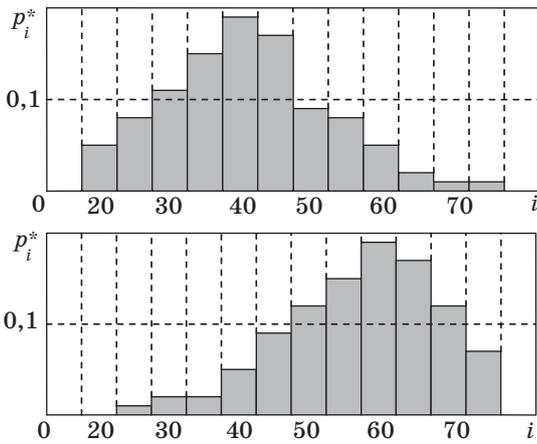
$$\begin{aligned} Q_{pR} &= \frac{1}{\|\mathbf{f}\|} \sqrt{\|\mathbf{f}\|^2 + \|\mathbf{m}_f\|^2 - 2\mathbf{m}_f \mathbf{f}} = \sqrt{1 + \frac{\|\mathbf{m}_f\|^2}{\|\mathbf{f}\|^2} - 2 \frac{\mathbf{m}_f \mathbf{f}}{\|\mathbf{f}\|^2}} = \\ &= \sqrt{1 + \frac{1}{S_R^2} \sum_{i=1}^r [S_{Ri}^*(i) p_i^*]^2 - 2p_j^*}. \end{aligned} \quad (13)$$

Аналогичным образом получают показатели качества

$$\begin{aligned} Q_{p\beta} &= \sqrt{1 + \frac{1}{S_\beta^2} \sum_{i=1}^r [S_{\beta i}^*(i) p_i^*]^2 - 2p_j^*}; \\ Q_{p\varepsilon} &= \sqrt{1 + \frac{1}{S_\varepsilon^2} \sum_{i=1}^r [S_{\varepsilon i}^*(i) p_i^*]^2 - 2p_j^*}. \end{aligned} \quad (14)$$

Показатели качества (13), (14) полного разрешения сигналов по соответствующим координатам по внешнему виду и в идейном смысле близки показателю качества разрешения-обнаружения Q_{pN} (8).

Показатели (13), (14) также можно объединять в какие-либо комбинации, получая показатели качества полного разрешения сигналов по нескольким координатам. Используя, например, простейшее из объединений — линейную комбинацию (суммирование), можно, как и ранее, ввести показатели качества полного разрешения сиг-



■ Рис. 3. Гистограммы распределений примера 2

налов по направлению (по азимуту и углу места) $Q_{p\beta\epsilon} = Q_{p\beta} + Q_{p\epsilon}$, по времени запаздывания и азимуту $Q_{pR\beta} = Q_{pR} + Q_{p\beta}$ и по трем координатам $Q_{pR\beta\epsilon} = Q_{pR} + Q_{p\beta} + Q_{p\epsilon}$.

Пример 2. Для сравнения возможностей двух алгоритмов разрешения целей по дальности для некоторых условий применения проведена серия экспериментов (моделирование). Истинная конфигурация групповой цели характеризуется параметрами: $N = 3$, $\delta R_{01} = 19$ км, $\delta R_{02} = 19,3$ км, $\delta R_{03} = 19,7$ км, так что $S_R = 58$ км (время запаздывания сигналов известным способом пересчитано в дальности до отдельных объектов групповой цели). Данные экспериментов, относящиеся к каждому из алгоритмов разрешения, отображены гистограммами (рис. 3).

Интуитивно ясно, что предпочтение следует отдать второму алгоритму разрешения, так как мода приведенного на рис. 3, внизу распределения случайной величины S_R^* меньше отличается от параметра истинной конфигурации $S_R = 58$ км, чем у распределения, показанного на рис. 3, внизу.

Вычисления по формулам (10) и (13) дают

$$Q_R(1) = 0,292, Q_R(2) = 0,013;$$

$$Q_{pR}(1) = 0,901, Q_{pR}(2) = 0,838.$$

Таким образом, при использовании показателей качества полного разрешения целей по дальности также рекомендует отдать предпочтение второму алгоритму, так как $Q_R(2) < Q_R(1)$ и $Q_{pR}(2) < Q_{pR}(1)$.

Заключение

Предложенные показатели качества разрешения-обнаружения сигналов (4), (8) и полного разрешения сигналов по радиолокационным координатам (10), (11) и (13), (14) позволяют сравнивать алгоритмы разрешения между собой, анализировать

их возможности по оценке количественного состава и конфигурации групповой цели и обоснованно заключать, какому из них следует отдать предпочтение в тех или иных условиях применения.

Кроме того, использование указанных показателей качества дает возможность исследовать реакцию алгоритмов разрешения на воздействие различных факторов: внутреннего шума приемника, помех различного вида, конфигурации разрешаемой групповой цели и т. д. В частности, для любой представляющей практический интерес ситуации экспериментально (моделированием) или теоретически можно найти условия, при которых $Q_N \rightarrow 0$ или $Q_{pN} \rightarrow 0$ (правильное определение количественного состава групповой цели является практически достоверным событием или разрешение-обнаружение без потерь), и выяснить при каких обстоятельствах (параметры шума и помех, конфигурация групповой цели и др.) указанные условия обеспечиваются.

Аналогичным образом можно найти условия, при которых $Q_R \rightarrow 0$ или $Q_{pR} \rightarrow 0$ (полное разрешение по времени запаздывания без потерь), $Q_\beta \rightarrow 0$, $Q_\epsilon \rightarrow 0$ или $Q_{p\beta} \rightarrow 0$, $Q_{p\epsilon} \rightarrow 0$ (полное разрешение без потерь сигналов по угловым направлениям), и выяснить ситуации, в которых указанные условия обеспечиваются.

Отметим, что введение показателей качества (10), (11), (13), (14) позволяет придать статистической задаче разрешения сигналов статистическое же описание.

Литература

1. Ширман Я. Д. Разрешение и сжатие сигналов. — М.: Сов. радио, 1974. — 360 с.
2. Акимцев В. В. Разрешающая способность по дальности при цифровой обработке сигналов // Радиотехника. 2004. № 1. С. 3–11.
3. Де Гроот М. Оптимальные статистические решения: Пер. с англ. — М.: Мир, 1974. — 492 с.
4. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 2. — М.: Сов. радио, 1968. — 504 с.
5. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. — М.: Наука, 1976. — 542 с.
6. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. — М.: Радиотехника, 2003. — 400 с.
7. Акимцев В. В., Мещерин А. Н. Показатель качества разрешения-обнаружения целей // Вопросы радиотехники. Сер. РЛТ. 2008. Вып. 3. С. 115–122.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1964. — 576 с.

УДК 621.375

ШУМОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА АНТЕННОГО ОКНА

Л. Кордеро¹,
аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Решается задача оценки шумовой температуры антенного окна. Антенное окно рассматривается в виде круглого волновода с теплозащитой, находящегося в условиях высоких температур. Получено выражение для расчета шумовой температуры.

Ключевые слова — шумовая температура, антенное окно, круглый волновод, теплозащита, плазма.

Зависимости, характеризующие шумовую температуру антенного окна (АО), закрытого теплозащитным материалом (ТЗМ) и плазмой, совершенно необходимы при решении задачи повышения эффективности функционирования бортовых радиотехнических систем возвращаемых космических аппаратов (уменьшения времени перерыва радиосвязи на траектории спуска или устранения перерыва).

Проведем анализ флюктуационного электромагнитного поля, излучаемого средой, расположенной в свободном пространстве. Выразим напряженности E_1 и H_1 флюктуационного поля, порожденного случайно распределенными плотностями электрических и магнитных токов j_{e1} и j_{m1} , через плотности этих токов и через детерминированное (дифракционное) поле. Будем считать, что для рассматриваемой среды существует решение уравнений Максвелла, т. е. определяются напряженности дифракционного электромагнитного поля E_{0e} и H_{0e} (функции Грина), которые создаются детерминированным током I с плотностью [1]

$$j_{e1} = I\delta(r - r_a), \quad (1)$$

где δ — дельта-функция; r — радиус корреляции; r_a — текущий радиус.

Для решения поставленной задачи используем теорему взаимности, которая в данном случае связывает напряженности и плотности токов флюктуационного и дифракционного полей [2]:

$$\int_v (E_1 j_{0e} - H_1 j_{0m}) d^3r = \int_v (E_{0e} j_{e1} - H_{0e} j_{m1}) d^3r. \quad (2)$$

¹ Научный руководитель — доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения В. Ф. Михайлов.

Используя (1) для дифракционного поля, найдем напряженности электрического флюктуационного поля $E(r)$. Считая $j_{0m} = 0$, левую часть уравнения (2) преобразуем к виду

$$E(r_1) = \int_v E_1 I \delta(r - r_1) d^3r.$$

Поскольку поле создается током с плотностью j_{0e} , правая часть уравнения (2) примет вид

$$E(r_1) = \int_v (E_{0e}(r_1) j_{e1}(r_1) - H_{0e}(r_1) j_{m1}(r_1)) d^3r.$$

Аналогично компонента напряженности магнитного флюктуационного поля по теореме взаимности с использованием детерминированного поля E_{0m} и H_{0m} , созданного магнитным током с плотностью j_{0m} :

$$H(r_2) = \int_v (E_{0m}(r_2) j_{e2}(r_2) - H_{0m}(r_2) j_{m2}(r_2)) d^3r.$$

Мощность шумов будет представлять произведение комплексно-сопряженной электрической и магнитной компонент флюктуационного поля, усредненных по равновесному ансамблю [2]:

$$P = \langle E(r) H^*(r) \rangle$$

или

$$\begin{aligned} & \int_v \int_v E_{0e}(r_1) E_{0m}(r_2) \langle j_{e1}(r_1) j_{e2}(r_2) \rangle + H_{0e}(r_1) H_{0m}(r_2) \times \\ & \times \langle j_{m1}(r_1) j_{m2}(r_2) \rangle - E_{0e}(r_1) H_{0m}(r_2) \langle j_{e1}(r_1) j_{m2}(r_2) \rangle - \\ & - H_{0e}(r_1) E_{0m}(r_2) \langle j_{m1}(r_1) j_{e2}(r_2) \rangle d^2r_1 d^3r_2. \quad (3) \end{aligned}$$

В соответствии с флюктуационно-диссипативной теоремой рассмотрим функцию корреляции с размерами, меньше размеров микронеоднород-

ности. Тогда функция корреляции будет зависеть только от разности векторов

$$r = \bar{r}_1 - \bar{r}_2.$$

Также будем считать, что величина радиуса корреляции значительно меньше длины волны излучающего объекта и стремится к нулю. Тогда компоненты плотности токов по одному и тому же направлению обладают δ -корреляцией, и в результате получим следующие соотношения [3]:

$$\langle j_{e_1}(r_1)j_{e_2}^*(r_2) \rangle = i \frac{2\omega}{\pi} kT(r_1)[\varepsilon(r_1) - \varepsilon^*(r_2)]\delta(r_1 - r_2); \quad (4)$$

$$\langle j_{m_1}(r_1)j_{m_2}^*(r_2) \rangle = i \frac{2\omega}{\pi} kT(r_1)[\mu(r_1) - \mu^*(r_2)]\delta(r_1 - r_2), \quad (5)$$

где k — постоянная Больцмана; T — термодинамическая температура.

При этом ортогональные компоненты плотности токов вообще не коррелированы и значения этих функций корреляции равны нулю:

$$\langle j_{e_1}(r_1)j_{m_2}^*(r_2) \rangle = 0; \quad (6)$$

$$\langle j_{m_1}(r_1)j_{e_2}^*(r_2) \rangle. \quad (7)$$

Отметим, что [4]

$$E_1^*(r_1)E_2^*(r_2) = |E(r)|^2; \quad (8)$$

$$H_1^*(r_1)H_2^*(r_2) = |H(r)|^2; \quad (9)$$

$$\varepsilon(r_1) - \varepsilon^*(r_2) = \varepsilon(r_1) - i \frac{4\pi\sigma(r_1)}{\omega} - \left(\varepsilon(r_2) + i \frac{4\pi\sigma(r_2)}{\omega} \right) \approx \frac{8\pi\sigma(r_1)}{\omega}.$$

Здесь σ — электропроводность среды.

Окончательно выражение флуктуационной мощности из (3) с учетом (4)–(9) можно записать в виде

$$P = \Delta \frac{\omega}{4\pi} \int_v kT(r_1) \left[\frac{\omega}{2} \int_v \frac{4\pi\sigma(r_2)}{\omega} |E(r_1)|^2 \delta(r_1 - r_2) dv \right] + \left[\frac{\omega}{2} \int_v \frac{4\pi\tau(r_2)}{\omega} |H(r_1)|^2 \delta(r_1 - r_2) dv \right] dv = \Delta \frac{\omega}{4\pi} \int_v kT(r_1) P_n dv.$$

Здесь $\frac{4\pi\sigma(r)}{\omega} |E(r)|^2$ — энергия электрического поля; $\frac{4\pi\tau(r)}{\omega} |H(r)|^2$ — энергия магнитного поля.

После преобразования получим

$$P = \frac{\Delta\omega}{4\pi} \int_v kT(r) [dQ^e(r, \omega) + dQ^m(r, \omega)] dv, \quad (10)$$

где $dQ^e(r, \omega)$, $dQ^m(r, \omega)$ — плотности энергии электрического и магнитного детерминированного полей соответственно.

Переходя к шумовым температурам, выражение для среды с параметрами, изменяющимися по одной координате z , преобразуем к виду [5]

$$T(\omega) = \left(1 - |R|^2 \int_{z_1}^{z_2} T(z) \frac{d}{dz} [P_\omega(z)] dz \right), \quad (11)$$

где z_1, z_2 — пределы интегрирования, т. е. границы среды; R — коэффициент отражения от границы среды; $\frac{dP_\omega(z)}{dz}$ — энергетический коэффициент поглощения электромагнитной волны; $P_\omega(z)$ — мощность единичного поля, проходящая в направлении z .

В случае равномерно нагретой среды выражения (10) и (11) соответственно примут вид:

$$P(\omega) = \frac{kT\Delta\omega}{2\pi} A(\omega); \quad T(\omega) = TA(\omega).$$

Здесь $A(\omega)$ — энергетический коэффициент поглощения, который может быть определен для конкретной среды из закона сохранения энергии: $A(\omega) = 1 - |T|^2(\omega) - |R|^2(\omega)$, где $|T|^2(\omega)$ — энергетический коэффициент прохождения.

Таким образом, для определения шумовой температуры среды необходимо рассчитать дифракционное вспомогательное поле E_{0e} и H_{0e} , найти тепловые потери дифракционного поля в элементе объема $A(\omega)$ и вычислить интеграл от температуры как функции объема среды.

Проведем анализ для среды, расположенной в направляющей системе (в волноводе) или излучающей в волновод. Для чего представим электрическую и магнитную напряженности флуктуационного поля, возбуждаемого произвольной средой, в виде суммы напряженностей n мод падающей и отраженных волн, распространяющихся в положительном и отрицательном направлениях оси z :

$$E_b(x, y, z) = \sum_{n=1}^m [b_n E_n(x, y) \exp(i\gamma_{bn}z) + b_n E_n(x, y) \exp(-i\gamma_{bn}z)];$$

$$H_b(x, y, z) = \sum_{n=1}^m [b_n H_n(x, y) \exp(i\gamma_{bn}z) + b_n H_n(x, y) \exp(-i\gamma_{bn}z)],$$

где n — номер моды; b_n — амплитуда n -й моды; γ_{bn} — постоянная распространения в волноводе n -й моды.

Средняя мощность шумов в волноводе запишется в виде [2]

$$P = \frac{\Delta\omega}{2} \text{Re} \iint \langle E_b(x, y) H_b^*(x, y) \rangle ds = \frac{\Delta\omega}{2} \sum_{n=1}^m b_n \frac{\Delta\omega}{2} P_x(\omega).$$

Рассуждая как и для свободного пространства, определим дифракционное поле в волноводе, возбуждаемое электрическим и магнитным токами с плотностью j_{be} и j_{bm} . Выражения для напряженности на n -моду запишутся в виде

$$E_{0n} = \frac{\gamma_{be}|Z_n|}{\sqrt{2} \exp(i\gamma_{bn}z_0)\delta(z-z_1)};$$

$$H_{0n} = \frac{\gamma_{bm}|Z_n|}{\sqrt{2} \exp(i\gamma_{bn}z_0)\delta(z-z_1)},$$

где Z_n — волновое сопротивление волновода для n -моды; z_0 — размер по оси z .

Используя лемму Лоренца и проведя преобразования как для свободного пространства, учитывая при этом, что радиус корреляции — функция координат x, y, z , выражение для шумовой температуры на n -моды волновода получим в виде

$$T_n(\omega) = \int_v T(z) [dQ_n^e(r, \omega) + dQ_n^m(r, \omega)].$$

Здесь $dQ_n^e(r, \omega)$ и $dQ_n^m(r, \omega)$ — плотности энергии электрического и магнитного полей на n -моды соответственно.

Суммарная шумовая температура волновода равна сумме шумовых температур на отдельных его модах:

$$T_{\Sigma_b} = \sum_{n=1}^m T_n.$$

На основании (11) для плоско-слоистой среды, шумовое излучение которой возбуждает в волноводе волну n -моды и электрические параметры которой изменяются по одной координате (а именно z), выражение для шумовой температуры волны этого типа имеет вид

$$T_n = (1 - |R_n|^2) \int_0^l T(z) \frac{d}{dz} [P_n(z) dz],$$

где $|R_n| = \frac{Y - \frac{l}{Z_n}}{Y + \frac{l}{Z_n}}$ — модуль коэффициента отражения на границе раздела шумящей среды, здесь Y — волновая проводимость среды на данном типе волны; l — толщина среды; $Z_n = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon - \frac{\lambda}{\lambda_{кр}}}}$.

Полученные аналитические соотношения показывают, что шумовая температура среды в волноводе является суммой шумовых температур отдельных мод.

Получим выражение шумовой температуры круглого волновода с волной H_{nm} , в излучающей апертуре которого на ТЗМ расположен слой расплавленного диэлектрика. Будем считать, что по координатам в плоскости апертуры этот слой имеет постоянную термодинамическую температуру и комплексную диэлектрическую проницаемость, неравномерность по этим характеристикам присутствует только в осевом направлении волновода. В соответствии с (11) в этом случае шумовую температуру слоя расплава для одной моды можно записать в виде

$$T_{p.ш} = \int_0^{l_p} T(z) \frac{d}{dz} \left[\exp(-2\gamma_p z) \int_0^{2\pi} \int_0^{r_1} (H_{\perp})^2 r d\phi dr \right] dz, \quad (12)$$

где l_p — толщина слоя расплава; γ_p — коэффициент поглощения расплава; r_1 — радиус волновода; H_{\perp} — нормальная составляющая поля.

Используя выражение для полной мощности в круглом волноводе для волны H_{nm} , выражение (12) преобразуем к виду

$$T_{p.ш} = \frac{\pi k \beta z_1}{2(v_{nm})^2} \left(1 - \frac{n^2}{(v_{nm})^2} \right) J_n^2(v_{nm}) \int_0^{l_p} T(z) \frac{d}{dz} [\exp(-2\gamma_p z)] dz, \quad (13)$$

где β — фазовый коэффициент распространения; $J_n(v_{nm})$ — функция Бесселя n -рода; v_{nm} — корень производной функции Бесселя n -рода.

Для случая, когда $T(z) = \text{const}$ и $\gamma_p = \text{const}$, формула (13) примет вид

$$T_{p.ш} = B_{nm} T_p (1 - \exp(-2\gamma_p l_p)), \quad (14)$$

где $B_{nm} = \frac{\pi}{2(v_{nm})^2} \left(1 - \frac{n^2}{(v_{nm})^2} \right) J_n^2(v_{nm})$ — амплитудный коэффициент, учитывающий тип волны в волноводе.

Из (13) и (14) шумовая температура слоя расплава, расположенного в круглом волноводе с типом волны H_{nm} , с введением коэффициентов отражения в волноводе от границ расплава R_{p1} и R_{p2} запишется в виде

$$T_{p.ш} = \frac{B_{nm} T_p (1 - |R_{p1}|^2) (1 - \exp(-2\gamma_p l_p)) (1 - |R_{p2}|^2 \exp(-2\gamma_p l_p))}{1 - |R_{p1}|^2 |R_{p2}|^2 \exp(-2\gamma_p l_p)}.$$

Полученное выражение позволяет определить шумовую температуру АО в условиях интенсивного нагрева, а значит — отношение сигнал/шум, что дает сведения для оценки времени потери радиосвязи на траектории спуска космического аппарата.

Литература

1. Митра Р., Ли С. Аналитические методы теории волноводов. — М.: Мир, 1974. — 478 с.
2. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. — М.: Наука, 1966. — 240 с.
3. Тучков Л. Т. Естественные шумовые излучения в радиоканалах. — М.: Сов. радио, 1968. — 152 с.
4. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. — М.: Наука, 1979. — 383 с.
5. Башаринова А. Е. СВЧ-излучение низкотемпературной плазмы. — М.: Сов. радио, 1974. — 256 с.

УДК 681.326.74

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Г. С. Бритов,

канд. техн. наук, доцент

Л. А. Мироновский,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассмотрено автоматизированное проектирование устройств функционального диагностирования линейных систем автоматического управления. Описан алгоритм синтеза устройств диагностирования, использующий только процедуры и операции линейной алгебры. Приведено программное обеспечение для расчета параметров устройств функционального диагностирования. Показаны результаты его тестирования.

Ключевые слова — автоматизированное проектирование, функциональное диагностирование, линейные системы автоматического управления, алгоритм синтеза, устройство функционального диагностирования, тестирование программ.

Введение

Задача функционального диагностирования динамических систем важна для многих приложений. В статье рассматривается организация автоматизированного проектирования устройства функционального диагностирования (УФД), представляющего собой линейную динамическую систему минимальной размерности. В качестве объекта диагностирования выступает линейная система автоматического управления (САУ).

Простейшее функциональное диагностирование может осуществляться методом контроля по модели [1, 2], в котором диагностические признаки получаются как отклонения выходных сигналов объекта диагностирования (ОД) от соответствующих сигналов модели объекта. Другой метод связан с модальным диагностированием, когда моделируется не весь объект, а только одна его мода [2]. Возможен также параметрический контроль, предполагающий идентификацию одного или нескольких параметров объекта по входным и выходным сигналам [3].

В работах [2, 4] была поставлена и решена задача минимизации размерности УФД, т. е. общего порядка описывающей его системы дифференциальных уравнений. Процедура синтеза УФД минимальной размерности, используемая в указанных работах, основывается на концепции алгебраических инвариантов [2] и требует достаточно сложных матричных вычислений.

В настоящей статье предлагается автоматизировать эту процедуру, построив систему для быстрого и надежного вычисления параметров УФД. Эта задача решается известными мето-

дами [1, 2] для различных видов математического описания ОД. Преимуществом излагаемого подхода является упрощение процедуры расчета УФД за счет автоматизации рутинных матричных операций.

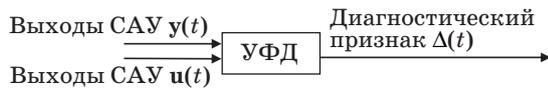
Устройство функционального диагностирования

Обозначим векторы входных и выходных сигналов проверяемой САУ через $u(t)$ и $y(t)$. Все они считаются доступными для измерения. Целью автоматизированного проектирования является получение математического описания УФД. Будем рассматривать УФД как линейную динамическую систему, на вход которой подаются входные и выходные сигналы проверяемой САУ, а на выходе формируется диагностический признак $\Delta(t)$ (рис. 1).

Диагностирование будет осуществляться проверкой равенства

$$\Delta(t) = 0. \quad (1)$$

В процессе функционирования САУ диагностический признак непрерывно проверяется на равенство



■ Рис. 1. Устройство функционального диагностирования

(1). При отсутствии дефектов оно выполняется с заданной точностью. Его нарушение говорит о возникновении дефектов.

Рассмотрим две постановки задачи синтеза УФД: когда математическое описание САУ задано и когда неизвестно.

В первом случае исходным материалом для синтеза УФД служит математическая модель ОД. Рассмотрим три варианта ее задания: матричное, операторное и структурное.

1. *Матричное описание.* Модель САУ задана уравнениями состояния

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \quad (2)$$

где $\mathbf{x}(t) \in R^n$ — вектор состояния; $\mathbf{u}(t) \in R^r$, $\mathbf{y}(t) \in R^s$ — векторы входов и выходов; \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} — постоянные матрицы.

Дефекты САУ приводят к нарушению правильного движения в пространстве состояний, определенного уравнениями (2). Необходимо по матрицам \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} рассчитать УФД так, чтобы при отсутствии дефектов в рабочем режиме выполнялось равенство (1). При этом УФД, вырабатывающее сигнал диагностического признака, должно быть максимально простым и не сводиться, в частности, к обычному дублированию. Это означает, что порядок УФД должен быть минимально возможным.

2. *Операторное описание.* Модель САУ задана матричной передаточной функцией (ПФ) $\mathbf{W}(p)$. Используя введенные обозначения, можно записать уравнение САУ в виде

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}(p)\mathbf{u}, \quad (3)$$

где $\mathbf{W}(p) = [\mathbf{W}_{ij}(p)]$, $\mathbf{W}_{ij}(p) = \frac{B_{ij}(p)}{A_{ij}(p)}$ — скалярные

дробно-рациональные ПФ.

Матричная ПФ связана с матрицами описания в пространстве состояний уравнением

$$\mathbf{W}(p) = \mathbf{C}(p\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B},$$

причем переход от $\mathbf{W}(p)$ к описанию в пространстве состояний неоднозначен.

3. *Структурное описание.* Математическая модель САУ может быть задана блок-схемой, которая состоит из линейных блоков с известными ПФ и сумматоров, связывающих указанные

блоки. В этом случае уравнения модели можно записать следующим образом:

$$\mathbf{z} = \mathbf{Q}(p)\mathbf{v}, \mathbf{v} = \mathbf{F}\mathbf{z} + \mathbf{G}\mathbf{u}, \mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{z}, \quad (4)$$

где \mathbf{v} , \mathbf{z} — входы и выходы линейных блоков; \mathbf{u} , \mathbf{y} — входы и выходы САУ; $\mathbf{Q}(p)$ — диагональная матрица ПФ блоков; \mathbf{F} , \mathbf{G} , \mathbf{H} — матрицы связей.

От структурного описания можно перейти к матричной ПФ с помощью формулы

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}(\mathbf{E} - \mathbf{Q}(p)\mathbf{F})^{-1}\mathbf{Q}(p)\mathbf{G}\mathbf{u} = \mathbf{W}(p)\mathbf{u}.$$

Все три рассмотренных варианта задания САУ эквивалентны в том смысле, что, зная один из них, можно перейти к другим. Поэтому для решения задачи автоматизированного синтеза УФД достаточно разработать алгоритмическое и программное обеспечение для одного из вариантов, например для описания в пространстве состояний, дополнив его процедурами перехода к этому виду описания.

Во втором случае постановки задачи синтеза УФД математическое описание априорно неизвестно, однако имеется возможность проводить эксперименты с реальной системой путем подачи на нее некоторых входных сигналов и регистрации выходных сигналов. Здесь можно использовать два подхода к синтезу УФД. Первый, наиболее очевидный подход состоит в получении математического описания САУ с помощью одного из методов идентификации. В литературе описано большое число подобных методов [5], позволяющих найти ПФ либо описание в пространстве состояний. Главный недостаток такого подхода — трудность решения задачи идентификации для систем высокого порядка. Известно, что практические возможности идентификации ограничиваются скалярными объектами третьего порядка.

Определенные шансы преодолеть этот недостаток дает второй подход, в котором не требуется полной идентификации ОД, а сразу определяются параметры УФД, порядок которого существенно меньше порядка объекта. Таким образом, при втором подходе задача идентификации ОД порядка n заменяется более простой задачей идентификации УФД порядка k , причем в типичной ситуации $k = n/s$, где s — число выходов САУ.

Действительно, из рис. 1 следует, что реальные значения всех входов и выходов УФД известны (могут быть измерены), т. е. имеется вся необходимая информация для его идентификации. Исходными данными для решения этой задачи будут две матрицы измерений сигналов

$$\mathbf{U}d = [\mathbf{u}(0), \mathbf{u}(1), \dots, \mathbf{u}(Nd)];$$

$$Yd = [y(0), y(1), \dots, y(Nd)], \quad (5)$$

где Nd — число отсчетов при измерении входных и выходных сигналов объекта.

Следовательно, при неизвестном математическом описании САУ по результатам измерений можно, используя любой из методов идентификации, найти параметры УФД, минуя этап получения полной математической модели системы.

Алгоритмы расчета УФД

При решении задачи синтеза УФД будем рассматривать его как линейную динамическую систему k -го порядка, структурная схема которой показана на рис. 2. Она содержит последовательную цепочку из k интеграторов, на входы которых через матричные усилители α_i, β_i поступают входы и выходы проверяемой САУ u, y .

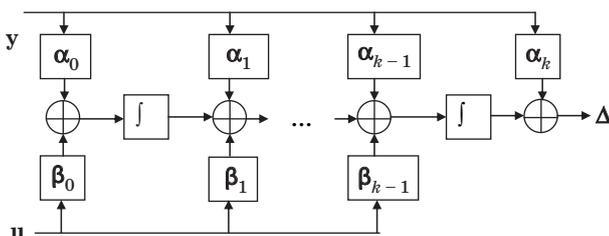
Выходной сигнал УФД Δ определяется формулой

$$\Delta = \alpha_k y + \frac{1}{p}(\alpha_{k-1} y + \beta_{k-1} u) + \dots + \frac{1}{p^k}(\alpha_0 y + \beta_0 u). \quad (6)$$

Синтезу УФД при заданном математическом описании уделено достаточно внимания в работах [1, 2, 6]. Все они опираются на описание ОД в пространстве состояний. Исходными данными соответствующего алгоритма синтеза УФД служат матрицы A, B, C описания САУ в пространстве состояний. Главным блоком алгоритма является вычисление минимального порядка k УФД. Для этого анализируются ранги частных матриц наблюдаемости САУ, построенных на основе матриц A, C . Расчет вектора-строки коэффициентов $\alpha = [\alpha_0, \dots, \alpha_k]$, с которыми выходные сигналы САУ y поступают на вход УФД, осуществляется путем решения системы уравнений

$$\alpha H_k = 0. \quad (7)$$

Здесь H_k — минимальная по размеру частная матрица наблюдаемости САУ, для которой уравнение (7) имеет решение.



■ Рис. 2. Схема устройства функционального диагностирования

Обозначим последний подвектор α_k вектора α через M и будем называть его вектором контроля, так как он непосредственно участвует в формировании диагностического признака:

$$\Delta(t) = My(t) + z(t) = 0,$$

где $z(t)$ — выходной сигнал последнего интегратора УФД (см. рис. 2).

При анализе системы уравнений (7) следует различать два случая: вектор контроля M задается заранее и может выбираться в процессе синтеза произвольным образом.

Это учитывается при решении системы (7).

Для вычисления вектора коэффициентов β , с которыми входные сигналы САУ u подаются на вход УФД, используется формула

$$\beta = -\Gamma H_{k-1} B, \quad (8)$$

где $\Gamma = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_k \\ 0 & \alpha_2 & \dots & \alpha_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_k \end{bmatrix}$ — блочно-треугольная

матрица из элементов вычисленного ранее вектора $\alpha = [\alpha_0, \dots, \alpha_k]$.

Этим завершается расчет УФД при заданном математическом описании САУ.

Рассмотрим теперь расчет УФД при неизвестном описании САУ. В этом случае исходной информацией служат сигналы результатов измерений входов и выходов (5). Как указывалось выше, для идентификации коэффициентов УФД можно использовать различные методы. Будем ориентироваться на простейший.

При отсутствии дефектов и нулевых начальных условиях уравнение (6) можно записать следующим образом:

$$\alpha_k y_0 + \alpha_{k-1} y_1 + \beta_{k-1} u_1 + \dots + \alpha_0 y_k + \beta_0 u_k = 0,$$

где $y_i = \frac{1}{p^i} y$, $u_i = \frac{1}{p^i} u$, $i = 0, 1, \dots, k$.

Для определения коэффициентов этого уравнения рассмотрим его для дискретных моментов времени $0, 1, \dots, Nd$. Вводя обозначения $V = [Y_0, Y_1, \dots, Y_k, U_1, \dots, U_k]$, $Ud = [u(0), u(1), \dots, u(Nd)]$, $Yd = [y(0), y(1), \dots, y(Nd)]$, приходим к системе алгебраических уравнений

$$Vx = 0, \quad (9)$$

где $x = [\alpha_k, \alpha_{k-1}, \dots, \alpha_0, \beta_{k-1}, \dots, \beta_0]$ — вектор искоемых коэффициентов УФД.

Как и раньше, вектор контроля $M = \alpha_k$ может быть свободным или заданным заранее (фиксированным). Это учитывается при решении системы уравнений (9).

Рассмотрим теперь программную реализацию предложенных расчетов.

Расчеты УФД в *m*-файлах пакета MATLAB

Описанные алгоритмы расчета УФД используют только операции линейной алгебры, поэтому их компьютерная реализация не вызывает затруднений. Разработана программа сценария для выполнения всех этапов процедуры расчета УФД, написанная на языке пакета MATLAB.

Сценарий имеет семь режимов.

- Описание САУ в пространстве состояний.
- Операторное описание САУ матричной ПФ.
- Структурное описание САУ.
- Описание САУ неизвестно.
- Расчет коэффициентов УФД.
- Получение результатов расчета.
- Выход.

При описании САУ задаются параметры математической модели САУ, после чего выполняется расчет коэффициентов УФД. Здесь возможны оба варианта расчета при заданном заранее и выбираемом векторе контроля $\mathbf{M} = \alpha_k$. В случае, когда описание САУ неизвестно, требуется загрузить массивы значений входов, выходов и времени. После этого, задав число отсчетов для идентификации, можно рассчитать коэффициенты УФД.

Результаты автоматизированного проектирования получаются в виде сообщений о значениях коэффициентов УФД и его порядке.

Работоспособность написанных программ для пакета MATLAB была проверена на ряде тестовых примеров. Приведем описание двух из них.

Тестовый пример 1. В качестве ОД рассматривается система второго порядка с двумя входами и двумя выходами (рис. 3).

Описание этой системы в пространстве состояний имеет вид

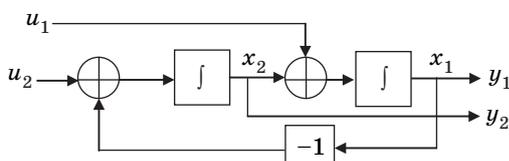
$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) + u_1(t); \quad \dot{x}_2(t) = -x_1(t) + u_2(t); \\ y_1(t) &= x_1(t); \quad y_2(t) = x_2(t), \end{aligned}$$

т. е. характеризуется матрицами

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Описание матричной ПФ имеет вид

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{p}{p^2+1} & \frac{1}{p^2+1} \\ -\frac{1}{p^2+1} & \frac{p}{p^2+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}.$$



■ Рис. 3. Структурная схема ОД второго порядка

Структурное описание характеризуется матрицами

$$\mathbf{Q}(p) = \begin{bmatrix} \frac{1}{p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{p} \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты α_i УФД при заданном векторе контроля $\mathbf{M} = [m_1 \ m_2] = [1 \ 2]$ находятся из уравнения (7) при $k = 1$:

$$[\alpha_{01} \ \alpha_{02} \ m_1 \ m_2] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} = 0,$$

что дает $\alpha_{01} = 2, \alpha_{02} = -1, \alpha_{11} = m_1 = 1, \alpha_{12} = m_2 = 2$.

Коэффициенты $\beta_0 = [-1 \ -2]$ находим по формуле (8).

Следовательно, описание УФД имеет вид

$$\Delta = y_1 + y_2 + \frac{1}{p}(y_1 - y_2 - u_1 - u_2).$$

Его структурная схема показана на рис. 4.

Если вектор \mathbf{M} не задан заранее, то система уравнений (7) имеет *s*-параметрическое семейство решений, т. е. общее решение можно представить в виде линейной комбинации *s* частных решений. В рассматриваемом примере $s = 2$, и общее решение имеет вид

$$\begin{aligned} \alpha_{01} &= m_2, \alpha_{02} = -m_1, \alpha_{11} = m_1, \alpha_{12} = m_2, \\ \beta_{01} &= -m_1, \beta_{02} = -m_2, \end{aligned}$$

где m_1, m_2 — произвольные константы.

В частности, при $m_1 = m_2 = 1$ получим $\alpha_{01} = 1, \alpha_{02} = -1, \alpha_{11} = 1, \alpha_{12} = 1, \beta_{01} = -1, \beta_{02} = -1$.

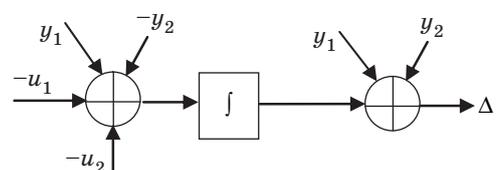
Приведем диалоги ввода данных для автоматизированного расчета УФД для различных вариантов описания ОД.

1. Описание в пространстве состояний:

Ввести матрицу $\mathbf{A} = [0 \ 1; -1 \ 0]$
 Ввести матрицу $\mathbf{B} = [1 \ 0; 0 \ 1]$
 Ввести матрицу $\mathbf{C} = [1 \ 0; 0 \ 1]$
 Ввести вектор $\mathbf{M} = [1 \ 2]$
 Рассчитать параметры УФД

2. Описание матричной ПФ:

Ввести коэффициенты числителей ПФ $\text{Nums} = \{[], \dots\} = \{[1 \ 0], [0 \ 1]; [0 \ -1], [1 \ 0]\}$
 Ввести коэффициенты знаменателей ПФ $\text{Dens} = \{[], \dots\} = \{[1 \ 0 \ 1], [1 \ 0 \ 1]; [1 \ 0 \ 1], [1 \ 0 \ 1]\}$
 Ввести вектор $\mathbf{M} = [1 \ 2]$
 Рассчитать параметры УФД



■ Рис. 4. Структурная схема УФД для примера 1

Таблица 1. Результаты расчетов коэффициентов УФД для тестового примера 1

Вариант		Коэффициент						
		a_{01}	a_{02}	b_{01}	b_{02}	a_{11}	a_{12}	k
Аналитический расчет при $M = [1 \ 1]$		1	-1	-1	-1	1	1	1
Аналитический расчет при $M = [1 \ 2]$		2	-1	-1	-2	1	2	1
Пространство состояний	Вектор $M = [1 \ 1]$	1	-1	-1	-1	1	1	1
	Вектор $M = [1 \ 2]$	2	-1	-1	-2	1	2	1
Передающая функция	Вектор $M = [1 \ 1]$	1	-1	-1	-1	1	1	1
	Вектор $M = [1 \ 2]$	2	-1	-1	-2	1	2	1
Структурное описание	Вектор $M = [1 \ 1]$	1	-1	-1	-1	1	1	1
	Вектор $M = [1 \ 2]$	2	-1	-1	-2	1	2	1
Описание неизвестно		1,0008	-1,0008	-1,0008	-1,0008	1	1	1

3. Структурное описание:
 Ввести коэффициенты числителей ПФ звеньев $Nums = \{[], \dots\} = \{[0 \ 1], [0 \ 1]\}$
 Ввести коэффициенты знаменателей ПФ звеньев $Dens = \{[], \dots\} = \{[1 \ 0], [1 \ 0]\}$
 Ввести матрицу связей звеньев $F = [0 \ 1; -1 \ 0]$
 Ввести матрицу входов $G = [1 \ 0; 0 \ 1]$
 Ввести матрицу выходов $H = [1 \ 0; 0 \ 1]$
 Ввести вектор $M = [1 \ 2]$
 Рассчитать параметры УФД

4. Случай неизвестного описания ОД:
 Ввести результаты измерений выходов и входов ОД
 Ввести вектор $M = [1 \ 2]$
 Выполнить идентификацию УФД

Все тесты дали положительные результаты, показав хорошее совпадение результатов ручного и автоматизированного расчетов коэффициентов УФД при векторах контроля $M = [1 \ 1]$ и $M = [1 \ 2]$ (табл. 1). При проведении компьютерных экспериментов использовался входной сигнал в виде единичного скачка.

Тестовый пример 2. Объектом диагностирования служит система управления четвертого порядка с одним входом и двумя выходами (рис. 5).

Описание этой системы в пространстве состояний характеризуется матрицами

$$A = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 0 & -0,75 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты α_i УФД при заданном векторе контроля $M = [m_1 \ m_2]$ находятся из системы линейных алгебраических уравнений (7) при $k = 2$:

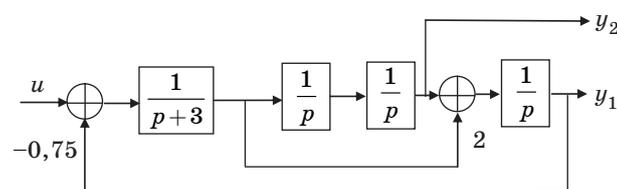


Рис. 5. Структурная схема ОД четвертого порядка

$$[\alpha_{01} \ \alpha_{02} \ \alpha_{11} \ \alpha_{12} \ m_1 \ m_2] \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -6 & 1 & 0 & -1,5 \end{bmatrix} = 0. \quad (10)$$

Решая ее при $m_1 = 1, m_2 = 2$, получаем

$$\alpha_{01} = -5,5, \alpha_{02} = 3, \alpha_{11} = -2, \alpha_{12} = 5,5, \alpha_{21} = m_1 = 1, \alpha_{22} = m_2 = 2.$$

Коэффициенты $\beta_0 = -4, \beta_1 = 0$ находим по формуле (8).

Следовательно, математическое описание УФД имеет вид

$$\Delta = y_1 + 2y_2 + \frac{1}{p}(-2y_1 + 5,5y_2) + \frac{1}{p^2}(-5,5y_1 + 3y_2 - 4u).$$

Его структурная схема приведена на рис. 6.

Если вектор M не задан заранее, то общее решение системы (10) имеет вид

$$\alpha_{01} = 0,5m_1 - 3m_2, \alpha_{02} = 1,5m_2, \alpha_{11} = -m_2, \alpha_{12} = -0,5m_1 + 3m_2, \alpha_{21} = m_1, \alpha_{22} = m_2, \beta_0 = -2m_2, \beta_1 = 0,$$

где m_1, m_2 — произвольные константы.

В частности, при $m_1 = m_2 = 1$ получим

$$\alpha_{01} = -2,5, \alpha_{02} = 1,5, \alpha_{11} = -1, \alpha_{12} = 2,5, \alpha_{21} = 1, \alpha_{22} = 1, \beta_0 = -2, \beta_1 = 0.$$

Отметим, что за счет выбора значений m_1, m_2 можно добиться некоторого упрощения УФД, обратив часть его коэффициентов в нуль.

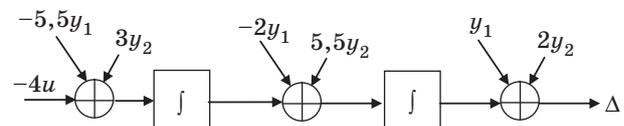


Рис. 6. Структурная схема УФД для примера 2

■ Таблица 2. Результаты расчетов коэффициентов УФД для тестового примера 2

Вариант		Коэффициент								
		a_{01}	a_{02}	b_0	b_1	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	k
Аналитический расчет при $M = [1 \ 1]$		-2,5	1,5	-2	0	-1	2,5	1	1	2
Аналитический расчет при $M = [1 \ 2]$		-5,5	3	-4	0	-2	5,5	1	2	2
Пространство состояний	Вектор $M = [1 \ 1]$	-2,5	1,5	-2	0	-1	2,5	1	1	2
	Вектор $M = [1 \ 2]$	-5,5	3	-4	0	-2	5,5	1	2	2
Передаточная функция	Вектор $M = [1 \ 1]$	-2,5	1,5	-2	0	-1	2,5	1	1	2
	Вектор $M = [1 \ 2]$	-5,5	3	-4	0	-2	5,5	1	2	2
Структурное описание	Вектор $M = [1 \ 1]$	-2,5	1,5	-2	0	-1	2,5	1	1	2
	Вектор $M = [1 \ 2]$	-5,5	3	-4	0	-2	5,5	1	2	2
Описание неизвестно		-2,5	1,5	-2	0	-1	2,5	1	1	2

Например, выбор $m_1 = 6$, $m_2 = 1$ делает нулевыми коэффициенты α_{01} и α_{12} .

Приведем диалоги ввода данных для автоматизированного расчета УФД для различных вариантов описания объекта диагностирования.

1. Описание в пространстве состояний:

Ввести матрицу $A = [-3 \ 0 \ 0 \ -0,75; \ 1 \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 1 \ 0 \ 0; \ 2 \ 0 \ 1 \ 0]$

Ввести матрицу $B = [1; \ 0; \ 0; \ 0]$

Ввести матрицу $C = [0 \ 0 \ 1 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$

Ввести вектор $M = [1 \ 2]$

Рассчитать параметры УФД

2. Структурное описание:

Ввести коэффициенты числителей ПФ звеньев $Nums = \{[], \dots\} = \{[1], [1], [1], [1]\}$

Ввести коэффициенты знаменателей ПФ звеньев $Dens = \{[], \dots\} = \{[1 \ 3], [1 \ 0], [1 \ 0], [1 \ 0]\}$

Ввести матрицу связей звеньев $F = [0 \ 0 \ 0 \ -0,75; \ 1 \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 1 \ 0 \ 0; \ 2 \ 0 \ 1 \ 0]$

Ввести матрицу входов $G = [1; \ 0; \ 0; \ 0]$

Ввести матрицу выходов $H = [0 \ 0 \ 1 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$

Ввести вектор $M = [1 \ 2]$

Рассчитать параметры УФД

3. Описание матричной ПФ:

Ввести коэффициенты числителей ПФ $Nums = \{[], \dots\} = \{[1 \ 0]; [2 \ 0 \ 1]\}$

Ввести коэффициенты знаменателей ПФ $Dens = \{[], \dots\} = \{[1 \ 3 \ 1,5 \ 0 \ 0,75]; [1 \ 3 \ 1,5 \ 0 \ 0,75]\}$

Ввести вектор $M = [1 \ 2]$

Рассчитать параметры УФД

4. Случай неизвестного описания ОД:

Ввести результаты измерений выходов и входов ОД

Ввести вектор $M = [1 \ 2]$

Выполнить идентификацию УФД

Результаты ручного и автоматизированного расчетов коэффициентов УФД при векторах контроля $M = [1 \ 1]$ и $M = [1 \ 2]$ приведены в табл. 2. Как и ранее, при проведении компьютерных экспериментов использовался входной сигнал в виде единичного скачка. Все тесты дали положительные результаты.

Заключение

Изложен подход к организации автоматизированного проектирования устройств функционального диагностирования для САУ, основанный на применении программ, написанных в пакете MATLAB. Показано, что для многомерных САУ всегда может быть синтезировано УФД сравнительно небольшой размерности, вырабатывающее диагностический признак. Результаты тестирования разработанных программ показали их работоспособность и целесообразность применения при создании систем функционального диагностирования.

Литература

- Игнатъев М. Б., Мироновский Л. А., Юдович В. С. Контроль и диагностика робототехнических систем: учеб. пособие / ЛИАП. — Л., 1985. — 160 с.
- Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. — М.: Изд-во МГУ, 1998. — 340 с.
- Мироновский Л. А., Михайлов Н. Л. О двух подходах к синтезу устройства функционального диагностирования // Вычислительные процессы и структуры: Межвуз. сб. / ЛИАП. Л., 1982. Вып. 154. С. 78–83.

- Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование линейных динамических систем (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1980. № 8. С. 96–121.
- Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Под ред. Я. З. Цыпкина. — М.: Наука, 1991. — 432 с.
- Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Расчет тестового режима линейных систем управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 11. С. 44–49.

УДК 551.46.08

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПОВ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «ПРИРОДА-ТЕХНОГЕНИКА»

Р. И. Сольницев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

М. А. Тревгода,

аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Рассматривается начальный этап процесса проектирования замкнутой системы управления «Природа-техногеника». Приводится алгоритм моделирования работы системы управления с учетом влияния соседних источников загрязняющих веществ, метеорологических данных и трансграничного переноса.

Ключевые слова — система управления, моделирование, алгоритм, загрязняющие вещества.

Актуальной экологической проблемой является проблема защиты окружающей среды от загрязняющих веществ (ЗВ), выбрасываемых промышленными предприятиями в атмосферу. Традиционные подходы к решению этой задачи основаны на использовании аппаратных систем с обязательным присутствием «человеческого фактора». Для соблюдения установленных нормативов выбросов вредных веществ в атмосферный воздух, их контроля и управления такими выбросами необходима замкнутая система управления.

В работах [1, 2] была предложена и в дальнейшем развита [3, 4] концепция замкнутой системы управления «Природа-техногеника» (ЗСУПТ), лишенной недостатков традиционных подходов. Основными преимуществами такой системы являются: гарантированность минимизации ЗВ в реальном времени, отсутствие влияния «человеческого фактора», формирование законов управления аппаратными средствами очистки от ЗВ в исполнительных устройствах в соответствии с экологическими критериями конкретного объекта управления.

Разработка такой сложной системы управления как ЗСУПТ невозможна без применения современных информационных технологий, в частности, без разработки САПР, обеспечивающей решение задач моделирования, расчета, синтеза управления, конструкторского проектирования.

Для создания эффективной САПР замкнутой системы управления необходима разработка многих подсистем: конструкторского проектирования, обработки результатов экспериментальных исследований, технологической подготовки, подготовки технической документации и в том числе рассматриваемой в данной работе подсистемы моделирования и расчета, применяемой на начальных этапах проектирования. Создание такой подсистемы требует алгоритмизации ряда проектных процедур, в том числе по разработке средств моделирования и расчета распространения ЗВ в условиях непрерывно изменяющихся параметров атмосферы и режимов источников ЗВ (ИЗВ) с дальнейшей реализацией таких алгоритмов в соответствующих пакетах прикладных программ.

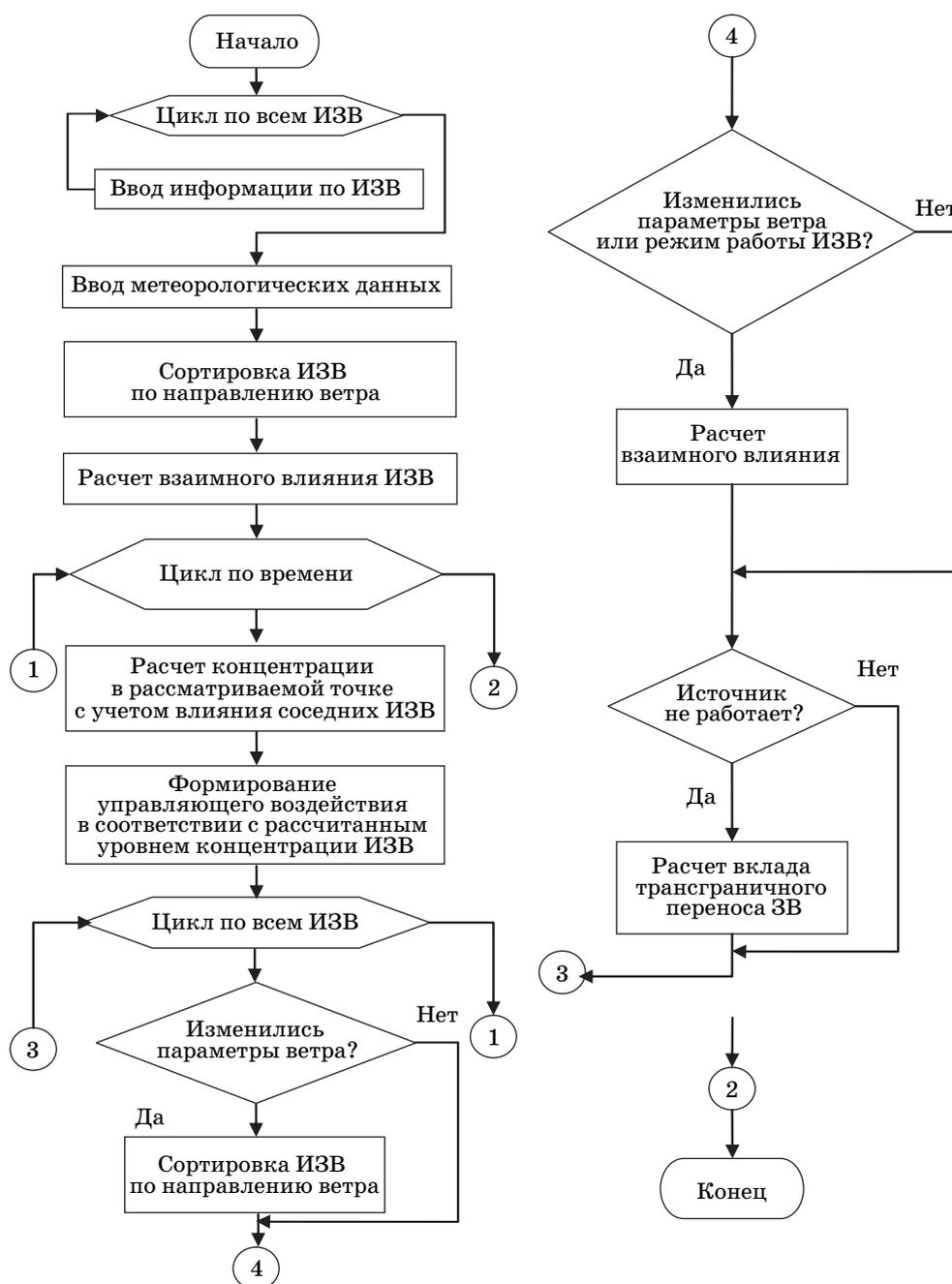
Проведенный анализ существующих моделей распространения ЗВ в пространстве [5] выявил их ограничения при проектировании ЗСУПТ выбросами ЗВ. Так, эмпирико-статистические модели, вследствие их прогностического характера, могут использоваться только как вспомогательные или для оценки перемещений ЗВ и степени загрязнения значительных пространств.

Существующие унифицированные программы расчета загрязнения атмосферы «Призма», «Эра», «Эколог» [6] предназначены лишь для последующего анализа результатов мониторинга и не могут быть использованы в САПР ЗСУПТ, поскольку они не позволяют:

- моделировать и производить расчеты ЗСУПТ как системы автоматического управления;
- определять взаимное влияние загрязнений источников ЗВ в (микрорайоне, промышленной зоне) в динамике;
- рассчитывать влияние загрязнений, не находящихся в рассматриваемом микрорайоне источников загрязнений, — «трансграничных переносов»;
- рассчитывать поля концентраций (выбросов) непрерывно в процессе проектирования ЗСУПТ.

При проектировании ЗСУПТ необходимо учитывать влияние выбросов ЗВ от «соседних» источников в рассматриваемом микрорайоне (промышленная зона, поселок, район города), учитывать выпадение сухого и мокрого осадков, а также определять влияние трансграничного переноса ЗВ.

В развитие полученных результатов [3, 4] предлагается алгоритм учета взаимного влияния ИЗВ в ЗСУПТ. Блок-схема алгоритма (рис. 1) включает в себя следующие блоки:



■ Рис. 1. Алгоритм учета взаимного влияния ИЗВ

1) блок ввода параметров ИЗВ — осуществляет ввод следующих параметров: координат расположения источников, мощности выбросов, режима работы ИЗВ;

2) блок ввода метеорологических и синоптических параметров — осуществляет ввод этих параметров;

3) блок расчета взаимного влияния — определяет суммарное значение концентрации ЗВ от ИЗВ рассматриваемого микрорайона, зафиксированное датчиком отдельного ИЗВ;

4) блок сортировки источников загрязнения — определяет проекции координат местоположения источников ЗВ в подветренной области на ось, совпадающую с направлением ветра, и затем сортирует источники по возрастанию модулей проекций в системе координат, связанной с граничной точкой микрорайона;

5) блок учета нестационарности работы источников по времени — определяет время выполнения пересчета параметров распространения ЗВ в зависимости от изменений режимов работы ИЗВ и изменений метеорологических параметров.

Работа описанных блоков выполняется в замкнутом цикле.

Влияние соседних источников на величину концентрации i -го точечного источника ЗВ рассчитывается с помощью формулы, предложенной и обоснованной в работе [3]:

$$\frac{Q_i^*(L_{ij}, p)}{C_j(\xi, \eta, \zeta, p)} = \frac{K_1^*}{V_{ij}} \left[1 - e^{-\frac{(p+K_2^*)L_{ij}}{V_{ij}}} \right], \quad (*)$$

где Q_i — вносимая в i -й датчик составляющая ЗВ j -го источника; L_{ij} — расстояние между i -м и j -м источниками; p — оператор Лапласа; C_j — выброс (концентрация) ЗВ j -го источника, измеренная в точке максимума; ξ, η, ζ — декартовы координаты; K_1^* — коэффициент передачи между C_j и Q_i ; V_{ij} — составляющие вектора скорости ветра в проекции на ось L_{ij} , соединяющую источники ЗВ; K_2^* — коэффициент, рассчитываемый по метеорологическим данным.

Предположим, что мы измеряем концентрацию ЗВ в i -й точке на определенном расстоянии от j -го точечного источника ЗВ, тогда величина концентрации ЗВ в этой точке будет

$$C_{\Sigma i} = C_i + C_{pi} + C_{Ti},$$

где $C_{\Sigma i}$ — измеренная датчиком концентрация ЗВ i -го источника; C_i — составляющая концентра-

ции ЗВ, обусловленная собственными выбросами i -го источника; C_{pi} — составляющая концентрации ЗВ от соседних источников в рассматриваемом микрорайоне: $C_{pi} = \sum_{j=1, j \neq i}^n C_j$; C_{Ti} — состав-

ляющая концентрации ЗВ выбросов, обусловленная трансграничным переносом. Под трансграничным переносом понимается совокупность всех потоков определенного ЗВ в исследуемом районе, помимо потоков ЗВ, обусловленных источниками этого района.

Тогда, если i -й источник отключен, на величину концентрации ЗВ в заданной точке будут влиять только две составляющие:

$$C_{\Sigma i}^0 = C_{pi} + C_{Ti},$$

где $C_{\Sigma i}^0$ — концентрация ЗВ в заданной точке при неработающем i -м источнике загрязнений.

Вклад в значение концентрации от соседних источников C_{pi} может быть определен на основе формулы (*). Тогда значение трансграничного переноса для рассматриваемого источника может быть получено по формуле

$$C_{Ti} = C_{\Sigma i}^0 - C_{pi}.$$

Таким образом, определяя значение концентрации ЗВ, обусловленное трансграничным переносом для разных ИЗВ в микрорайоне, в соответствии с режимами работы этих ИЗВ, в конечном счете, можно получить более точное усредненное значение C_T для всего микрорайона.

Измерение и расчет концентрации ЗВ C_p и C_T позволяют определять концентрацию ЗВ от i -го источника ЗВ и управлять ею в ЗСУПТ.

Взаимодействие n ИЗВ в ограниченном районе (промышленная зона, микрорайон мегаполиса) представляется матрицей

$$[C_{ij}]^{n+1, n+1} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} & C_{1n+1} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} & C_{2n+1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} & C_{nn+1} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & C_{n+1, n+1} \end{pmatrix},$$

где при $i = j$ C_{ij} — собственная концентрация i -го источника ЗВ, измеренная его датчиком; при $i \neq j$ C_{ij} представляют концентрации взаимного влияния; $C_{1n+1}, C_{2n+1}, C_{3n+1}, C_{n+1, n+1}$ — концентрации, обусловленные трансграничным переносом ЗВ.

На основе данной матрицы определяются следующие характеристики:

$$1) \max_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1, j \neq i}^n C_{ij} \right\} \text{ — значение максимальной}$$

концентрации влияния соседних источников в микрорайоне;

$$2) \max_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^{n+1} C_{ij} - \sum_{i=1, i \neq j}^n C_{ij} \right\} \text{ — значение концен-}$$

трации самого «грязного» источника;

$$3) \max_{i \neq j, j=1, i=1}^n \{C_{ij}\} \text{ — максимальное значение}$$

концентрации влияния i -х источников ЗВ;

$$4) \max_{j=1}^n \left\{ \sum_{i \neq j, i=1}^n C_{ij} \right\} \text{ — максимальное значение}$$

концентрации суммарного влияния ИЗВ на i -е источники;

$$5) C_{\text{измерен}} - \left\{ \sum_{i=1, i \neq j}^n C_{ij} \right\} \text{ — концентрация ЗВ,}$$

обусловленная трансграничным переносом ЗВ.

Особенность предложенного алгоритма состоит в том, что на каждом шаге моделирования ЗСУПТ, помимо расчета параметров моделей ЗСУПТ, выполняется проверка необходимости пересчета параметров взаимного влияния ИЗВ в соответствии с режимами работы источников и изменением метеорологических параметров, и если такая необходимость возникает, происходит необходимый расчет. Таким образом, в процессе моделирования с учетом алгоритма измерений учитывается взаимное влияние источников загрязнения C_p и вычисляется величина трансграничного переноса C_T при изменении указанных выше параметров.

Данный алгоритм должен работать в определенные промежутки времени, и мы рассмотрим последовательность выполнения расчетов по алгоритму, представленному на рис. 1, во времени.

Предполагается, что все источники загрязнений являются точечными и их режим работы регламентирован в соответствии с результатами инвентаризации ИЗВ [7]. Тогда алгоритм измерений и мониторинга в районе ИЗВ можно представить следующей последовательностью операций:

1) i -й ИЗВ отключен, $C_i = 0$, $C_{i\Sigma}^0 = C_{ip} + C_{iT}$, $i = 1, n$, поскольку $C_{i\Sigma}^0 = C_i + C_{ip} + C_{iT}$;

2) i -й ИЗВ отключен, осуществляется выставка «0» датчика Δ_i , $C_{i\Sigma}^0 = 0$;

3) i -й ИЗВ включен, осуществляется измерение C_i в факеле при работающем производстве $C_i(t)$, $t_k < t_c < t_{k+1}$, $i = 1, n$, $k = 0, m$;

4) i -й ИЗВ включен, включается (замыкается) ЗСУПТ, осуществляется минимизация $C_i(t) \Rightarrow \min_{t_k < t < t_{k+1}} \{C_i(t)\}$, $k = 0, m$, $i = 1, M$;

5) i -й ИЗВ отключен (см. п. 1), расчетная величина

$$C_{ip} \cong \overline{C_{ip}}, \overline{C_{ip}} = \sum_{j=1, j \neq i}^n C_{j\Sigma} \frac{K_1^*}{V_{ij}} \left(1 - e^{-\frac{(p+K_{2j}^*)L_{ij}}{V_{ij}}} \right), \text{ тог-}$$

да $C_{iT} = C_{i\Sigma}^0 - \overline{C_{ip}}$, $i = 1, n$.

Усредненная оценка величины концентрации ЗВ на промежутке времени при $0 < t < T$, $(t_{k+1} - t_k) \in T$, $k = 1, N$, обусловленной трансграничным переносом, определяется как

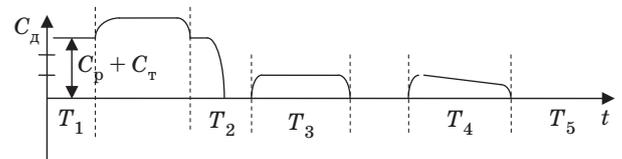
$$(\overline{C_T}) = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{t_{k+1} - t_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} C_{iT}(t) dt \right);$$

6) поскольку $C_i(t)$, $C_{ip}(t)$, $C_{iT}(t)$ — случайные процессы, то в дальнейшем оценки по пп. 1–5 должны носить статистический характер, т. е. должны вычисляться соответствующие им характеристики случайных процессов, например математические ожидания дисперсии, корреляционные функции.

Проиллюстрируем диаграмму работы алгоритма измерений и мониторинга на модельном примере. Пусть заданы уровни концентрации ЗВ C_T и C_p , промежутки времени работы i -го ИЗВ. Тогда работу алгоритма можно отобразить на временной диаграмме (рис. 2), где T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 — промежутки времени, соответствующие операциям алгоритма, описанным ранее; C_p — рассчитываемая концентрация влияния i -х источников; C_d — концентрация ЗВ, фиксированная на датчике ИЗВ; C_T — рассчитываемое значение концентрации ЗВ от трансграничного переноса ЗВ.

На диаграмме показано, что расчет концентраций C_T и C_p производится при неработающем ИЗВ, эти значения используются для «обнуления» датчика. Из диаграммы видно изменение концентрации ЗВ на датчике до «обнуления» — промежуток времени T_1, T_2 , после учета C_T и C_p — промежуток времени T_3 , и в процессе работающей ЗСУПТ — промежуток времени T_4 . В промежуток времени T_5 происходит расчет концентраций C_T и C_p .

Предложенный алгоритм составляет основу подсистемы моделирования и расчета САПР ЗСУПТ, которая позволит моделировать работу ЗСУПТ с учетом метеорологических данных, трансграничного переноса, влияния соседних ИЗВ.



■ Рис. 2. Временная диаграмма работы алгоритма учета взаимного влияния ИЗВ

Литература

1. Худoley В. В., Ливанов Г. А. Проблемы загрязнения окружающей среды стойкими органическими соединениями, в частности диоксинами // Тр. Междунар. конф. IENS'04 / Под ред. проф. Р. И. Сольничева / ГУАП. СПб., 2004. С. 39–43.
2. Сольничев Р. И. Построение замкнутых систем «Природа-техногеника» // Открытое образование / Информационные технологии в науке, образовании (IT+S&E'06): Материалы XXXIII Междунар. конф., Украина, Ялта—Гурзуф, 2006. С. 404–408.
3. Сольничев Р. И. Вопросы построения замкнутой системы управления «Природа-техногеника» // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. № 7. С. 23–32.
4. Сольничев Р. И., Коршунов Г. И., Шабалов А. А. Моделирование замкнутой системы управления «Природа — техногеника» // Информационно-управляющие системы. 2008. № 2. С. 36–41.
5. Обзор рынка экологических программных продуктов. <http://www.ektor.ru/pages/norm.asp?id=14> (дата обращения: 25.01.2010).
6. Квашнин И. М. Промышленные выбросы в атмосферу. Инженерные расчеты и инвентаризация. — М.: Авок-пресс, 2005. — 394 с.
7. Шабалов А. А. Сравнительный анализ и требования к математическим моделям распространения промышленных выбросов в атмосфере // Приборостроение в экологии и безопасности человека (ПЭБЧ'07): Тр. Пятой Междунар. конф. / Под ред. проф. Р. И. Сольничева / ГУАП. СПб., 2007. С. 265–270.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

При подготовке рукописей статей редакция просит Вас руководствоваться следующими рекомендациями.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 16 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала в Word шрифтом Times New Roman размером 13.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание, полное название организации; заглавие, аннотация (5–7 строк) и ключевые слова на русском и английском языках, подписанные подписи.

Формулы набирайте в Word, при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте вкладку Define; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации в текст не заверстываются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы изготавливаются в векторных программах: Visio 4, 5, 2002–2003 (*.vsd); Coreldraw (*.cdr); Excel; Word; Adobellustrator; AutoCad (*.dxf); Компас; Matlab (экспорт в формат *.ai);
— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, факс, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40 × 55 мм;
— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;
— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;
— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;
— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Более подробную информацию см. на сайте: www.i-us.ru

УДК 330.45

УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕГРАЦИЕЙ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ В ПРЕДМЕТНУЮ ОБЛАСТЬ

Д. Б. Босов,

канд. экон. наук, глава представительства
Компания «Алтек инвестментс лимитед»

Предложены модель и алгоритм решения задачи оптимизации многомерных параметрических рядов в интересах рациональной интеграции инновационных проектов в предметную область.

Ключевые слова — управление, инновационный проект, математическая модель, множество, вариант математической формализации, решение задачи.

Постановка задачи

Любой инновационный проект создается и реализуется в интересах удовлетворения некоторого спектра характерных для соответствующей предметной области его использования потребностей. Поскольку все они, как правило, не могут быть полностью обеспечены каким-либо одним вариантом инновационного продукта, рациональная интеграция инновационных проектов в предметную область путем формирования соответствующих параметрических рядов инновационных продуктов (изделий) становится актуальной задачей инновационного менеджмента.

Сложность современных инновационных проектов и разнообразие предъявляемых к ним требований приводят к тому, что проблемы формирования таких рядов в процессе инновационного развития становятся весьма непростыми. Попытки решить их на основе предыдущего опыта и интуиции часто приводят к грубым ошибкам, что в условиях высокой стоимости и большой длительности разработки и производства инноваций недопустимо. Поэтому решение указанных проблем должно опираться также и на объективные научные обоснования. Инструментом для таких обоснований могут быть соответствующие математические модели. В настоящей работе предложены модель и алгоритм решения задачи оптимизации многомерных параметрических рядов в интересах рациональной интеграции инновационных проектов в предметную область.

Сущность задачи состоит в следующем.

Задано множество $J = \{1, 2, \dots, j, \dots, N\}$ видов потребностей. Каждый вид потребности опреде-

ляется совокупностью многих характеристик (показателей, параметров).

Имеется также множество $I = \{1, 2, \dots, i, \dots, M\}$ изделий, способных совместно обеспечить все виды потребностей. Каждому i -му изделию также соответствует набор значений параметров, характеризующих его эксплуатационные, технические, эргономические и другие свойства. Так как каждый набор значений параметров соответствует изделию с определенным номером i , далее будем считать, что тип изделия полностью определяется своим порядковым номером.

Необходимо из множества I допустимых типов изделий выбрать такое подмножество $I^* \subset I$ (оптимальный ряд изделий), которое полностью обеспечит множество J видов потребностей с минимальными затратами.

Варианты математической формализации этой задачи зависят от многих факторов. В частности, их вид определяется структурой областей применения изделий, т. е. свойствами потребностей (обладают ли они свойством связности или нет), выбором критерия оптимизации ряда, учетом дополнительных ограничений, неопределенностью спроса и т. п. [1].

В данной работе мы рассмотрим формализацию указанной задачи в следующем виде. Требуется определить

$$C = \min \left(\sum_{i=1}^M c_i^0 y_i + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij} \right) \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^M \alpha_{ij} x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, N; \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_i, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad j = 1, 2, \dots, N; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad y_i \in \{0, 1\}, \\ i = 1, 2, \dots, M, \quad j = 1, 2, \dots, N; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^M y_i \leq M_0, \quad M_0 \leq M, \quad (5)$$

где c_i^0 — постоянные затраты на разработку и применение изделий i -го типа (начальные затраты);

$c_{ij} = \alpha_{ij} c_i b_j$ — затраты, связанные с обеспечением потребностей j -го вида изделиями i -го типа;

α_{ij} — число изделий i -го типа, необходимых для обеспечения единицы потребностей j -го вида;

c_{ij} — затраты на производство и эксплуатацию одного изделия i -го типа;

b_{ij} — величина потребностей j -го вида;

M_0 — количество типов изделий, которые могут быть включены в оптимальный ряд I^* .

Взаимосвязь элементов множеств I и J задается с помощью матрицы применений $\|\alpha_{ij}\|_{M \times N}$, в которой $\alpha_{ij} = 1$, если изделие i -го типа может обеспечивать j -й вид потребности, и $\alpha_{ij} = 0$ в противном случае. Причем полагаем, что $c_{ij} = \infty$, если $\alpha_{ij} = 0$.

Управляющие переменные принимают значения:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й тип изделия} \\ & \text{включают в выбираемый} \\ & \text{ряд изделий;} \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й тип изделий} \\ & \text{назначен для удовлетворения} \\ & \text{потребности } j\text{-го вида;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Ограничения (2) означают, что все потребности множества J должны быть обеспечены. Из выражения (3) следует, что для обеспечения потребностей j -го вида можно назначать изделия только тех типов, для которых $y_j = 1$.

Соотношения (1)–(5) формализуют рассматриваемую задачу в виде модели дискретной многомерной задачи стандартизации при детерминированном спросе [2].

Алгоритм решения задачи с использованием схемы метода ветвей и границ и теории двойственности

Рассмотрим алгоритм решения задачи (1)–(5), представляющий собой процесс направленного перебора с возвращениями. В основу этого процесса положена принципиальная схема метода ветвей и границ. При этом в предлагаемом алгоритме построение дерева возможных вариантов осуществляется в соответствии с односторонней схемой ветвления [2]. Для оценки нижней грани-

цы решения в процессе ветвления используется задача линейного программирования, двойственная по отношению к задаче (1)–(5), в которой условие целочисленности (4) заменяется условием

$$0 \leq y_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (6)$$

Проверка допустимого решения задачи (1)–(5) на оптимальность осуществляется решением оценочной двойственной задачи.

Для описания алгоритма введем следующие обозначения:

$I_0 = \{i | y_i = 0\}$ — множество индексов управляющих переменных y_i , вошедших в ветвь дерева вариантов со значением, равным нулю (такие переменные будем обозначать через y_i);

$I_1 = \{i | y_i = 1\}$ — множество индексов управляющих переменных y_i , вошедших в ветвь дерева вариантов со значением, равным единице;

$I_2 = I_1 \cup I_0$ — множество индексов управляющих переменных y_i , вошедших в ветвь дерева вариантов;

$I_3 = I/I_2$ — множество индексов управляющих переменных y_i , из которых выбирается индекс переменной для включения в множество I_2 ;

I_d ($I_d = I_1$ при условии $|I_2| = M$ или $I_3 = \emptyset$) — множество индексов управляющих переменных y_i , соответствующих допустимому решению задачи (1)–(5);

i^+ — индекс управляющей переменной y_i , включение которого в множество I_1 предпочтительнее по сравнению с другими индексами из множества I_3 ;

i^- — индекс управляющей переменной y_i , который целесообразно включить в множество I_0 .

Значения $c_{ij} = \infty$ заменяем величинами, равными $\min_{i \in I} (c_i^0 + c_{ij})$.

Двойственную задачу линейного программирования по отношению к релаксированной задаче (1)–(3), (6) можно записать следующим образом:

$$Z = \max \sum_{j \in J} V_j \quad (7)$$

при ограничениях

$$\sum_{j \in J} W_{ij} \leq c_i^0, \quad i = 1, 2, \dots, M; \quad (8)$$

$$V_j - W_{ij} \leq c_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad i = 1, 2, \dots, M; \quad (9)$$

$$W_{ij} \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (10)$$

где V_j, W_{ij} — переменные двойственной задачи.

Теоретически задачу (7)–(10), введя дополнительные переменные γ_{ij}, δ_i , ($i = 1, M, j = 1, N$), можно представить в виде основной задачи линейного программирования, исходное базисное решение которой имеет вид

$$Z = \sum_{j=1}^N V_j; \gamma_{ij} = c_{ij} + W_{ij} - V_j,$$

$$i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N;$$

$$\delta_i = c_i^0 - \sum_{j=1}^N W_{ij}, i = 1, 2, \dots, M.$$

Полученную таким образом задачу можно решить симплексным методом.

Однако практика показала, что даже небольшие задачи оптимизации многомерных параметрических рядов требуют решения задач линейного программирования большой размерности. Их опорные планы сильно вырождены, а установление оптимальности в некоторых случаях связано с большим числом симплексных итераций. Действительно, количество переменных k_1 и число уравнений ограничений k_2 задачи линейного программирования связано с размерностью исходной задачи соотношениями $k_1 = M + 2MN + N$, $k_2 = M(N + 1)$. Для решения задачи линейного программирования такой размерности требуется обычно от $M(N + 1)$ до $3M(N + 1)$ итераций. Учитывая, что оценка нижней границы производится многократно, такой способ решения является нерациональным. Кроме того, нецелесообразно искать и точное решение задачи (7)–(10), так как оно позволяет получить точное решение не исходной целочисленной задачи (1)–(5), а лишь непрерывной релаксированной задачи (1)–(3), (6). Поэтому дальнейшее развитие рассматриваемого направления идет по пути построения приближенных методов решения двойственной задачи [3] и упрощения тем самым способов оценки нижней границы исходной целочисленной задачи. Алгоритмы, использующие для оценки двойственную задачу, различаются способами определения приближенного решения задачи (7)–(10). Наиболее простым является способ расчета, основанный на следующих соотношениях:

$$W_{ij} = \frac{c_i^0}{J_i}; V_j = \min_{i \in I_j} (c_{ij} + W_{ij}); Z = \sum_{j=1}^N V_j,$$

где $J_i = \{j | \alpha_{ij} = I\}$; $I_j = \{i | \alpha_{ij} = I\}$.

При этом достаточно простая структура задачи (7)–(10) позволяет получить приближенное решение, совпадающее с оптимальным или достаточно близкое к нему. Вычислительные эксперименты на ЭВМ показали, что особенностью задачи (1)–(5) является довольно частое совпадение оптимального целочисленного решения с непрерывным. Поэтому обычно приближенно решают двойственную задачу, а от нее переходят к соответствующему решению непрерывной задачи (1)–(3), (6). При совпадении целочисленного

и непрерывного решений полученный результат является оптимальным, в противном случае переходят к обычному алгоритму ветвей и границ. Однако переход от приближенного решения двойственной задачи к соответствующему приближенному решению задачи (1)–(5) является достаточно сложным и не всегда однозначным. Значительно более простым является способ, когда вначале определяется достаточно точное решение задачи (1)–(5), а по этому решению определяется решение двойственной задачи. Совпадение решений свидетельствует об оптимальности целочисленного решения. В дальнейшем этот способ мы будем называть направленным, так как он использует решение целочисленной задачи в оцениваемой вершине.

Рассмотрим направленный способ решения двойственной задачи (7)–(10) более подробно.

Упростим структуру задачи (7)–(10), для этого исключим переменные W_{ij} , входящие лишь в ограничения. Действительно, при любом допустимом выборе переменных V_j переменные W_{ij} можно положить равными максимальной из величин 0 и $V_j - c_{ij}$. С учетом этого двойственную задачу (7)–(10) запишем в виде

$$Z = \max \sum_{j=1}^N V_j \tag{11}$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^N \max(V_j - c_{ij}; 0) \leq c_i^0,$$

$$i = 1, 2, \dots, M. \tag{12}$$

Сущность направленного решения двойственной задачи (11), (12) заключается в следующем. Учитывая ее более простую структуру и возможность использовать приближенное решение для оценки нижней границы на различных этапах ветвления, предлагаем следующий способ формирования значений переменных V_j , доставляющих целевой функции (11) по возможности большее значение. Процесс начинается с допустимого решения $V_j = \min_{i \in I_1 \in I_3} c_{ij}$ задачи (11), (12) и состоит

в многократном последовательном просмотре j -х столбцов ($j = 1, 2, \dots, N$) матрицы $\|c_{ij}\|$ в целях проверки возможности увеличения V_j до ближайшей большей величины c_{ij} . При этом в каждом цикле просмотра проверяется возможность увеличения V_j для тех столбцов, в которых находится наименьшее количество элементов c_{ij} , удовлетворяющих условию $c_{ij} \leq V_j$. Увеличение значений переменных V_j происходит с учетом (12) и ограничено величинами

$$V_j \leq \min_{i \in I_1} [\min_{i \in I} c_{ij}; \min_{i \in I} (c_{ij} + c_i^0)]. \tag{13}$$

Оценка, получаемая с помощью данного способа, определяется элементами множеств I_1, I_3 и, когда дальнейшее увеличение переменных V становится невозможным, вычисляется по формуле

$$Z(I_1) = z_x = \sum_{j=1}^N V_j + \sum_{i \in I_1} c_i^0. \quad (14)$$

В ходе экспериментов со случайными матрицами $\|c_{ij}\|$ выявлено довольно частое (до 90 %) совпадение оптимального целочисленного решения задачи (1)–(5) с решением, которое определялось с помощью двойственной задачи (11), (12). Учет этой особенности в сочетании с достаточно простым способом нахождения решения двойственной задачи позволил значительно сократить время поиска оптимального решения задачи (1)–(5). Выигрыш во времени достигается за счет доказательства оптимальности одного из допустимых решений задачи (1)–(5), полученных на первых шагах работы алгоритма.

Эффективность применения данного способа и точность полученного с его помощью результата в значительной степени определяются точностью используемого (одновременно проверяемого на оптимальность) целочисленного решения. Если для оценки нижней границы целевой функции путем направленного решения двойственной задачи (11), (12) используются ограничения (13), то при проверке допустимого решения на оптимальность вместо (13) требуется выполнение неравенств

$$c_{rj} \leq V_j \leq \min [c_{ij}; \min_{i \in I} (c_{ij} + c_i^0)], \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (15)$$

где $c_{ri} = \min_{i \in I_d} c_{ij}$; $c_{ij} = \min_{i \in I, i \neq 1} c_{ij}$.

Процесс проверки допустимого решения задачи (1)–(5) на оптимальность начинается с допустимого решения $V_j = \min_{i \in I} c_{ij}$ задачи (11), (12).

Необходимость неравенств (15) следует из соотношений

$$y_i^* \left[c_i^0 - \sum_{j=1}^N \max(V_j^* - c_{ij}; 0) \right] = 0; \\ (y_i^* - x_{ij}^*) \max(V_j^* - c_{ij}; 0) = 0,$$

определяющих оптимальность полученных решений для непрерывной и целочисленной задач. Знак «*» указывает на оптимальность решений соответствующих задач. При выполнении ограничения (15) совпадение величины

$$Z(I_d) = \sum_{j=1}^N V_j, \quad (16)$$

полученной в результате решения двойственной задачи (11), (12), со значением целевой функции

задачи (1)–(5), соответствующей проверяемому целочисленному решению

$$C_d = \sum_{i \in I_d} c_i^0 + \sum_{j=1}^N \min_{i \in I_d} c_{ij}, \quad I_d = I, \quad (17)$$

указывает на оптимальность найденного целочисленного решения, т. е.

$$I^* = I_d, \quad c^* = c_d.$$

В случае несовпадения значений целевых функций поиск оптимального решения задачи (1)–(5) продолжается методом ветвей и границ.

Поиск первого допустимого решения и дальнейшее ветвление осуществляется с помощью показателей вида

$$\rho_i = \sum_{j=1}^N \max(V_j - c_{ij}; 0) - c_i^0, \quad i \in I_3, \quad (18)$$

где $V_j = \min \left[\min_{i \in I_1} c_{ij}; \min_{i \in I} (c_i^0 + c_{ij}) \right]$.

Таким образом, общая схема алгоритма решения задачи (1)–(5) включает следующие основные этапы:

- 1) определение допустимого решения I_d, C_d исходной задачи;
- 2) проверка допустимого решения на оптимальность путем решения двойственной задачи;
- 3) уточнение, в случае необходимости, допустимого решения методом ветвей и границ и проверка его на оптимальность.

Вычислительный процесс заканчивается при выполнении одного из условий:

- доказана оптимальность допустимого решения с помощью решения двойственной задачи;
- просмотрены все перспективные ветви дерева вариантов.

Перед началом решения задачи полагаем $I_0 = I_1 = I_2 = 0, I_3 = \{1, 2, \dots, M\}$.

На каждом шаге вычислительного процесса определяются показатели $\rho_i, i \in I_3$, характеризующие целесообразность включения переменных $y_i, i \in I_3$ в формируемое допустимое решение задачи (1)–(5). Если среди показателей (18) имеются $\rho_i < 0$, то принимаем соответствующие им переменные y_i равными нулю, так как включение их в допустимое решение не приведет к его улучшению. Индексы $\{i | \rho_i < 0\}$ выводим из множества I_3 и включаем в множество I_0 . Кроме того, из множества I_3 исключается и в множество I_1 вводится индекс i^+ , для которого

$$\rho_{i^+} = \max_{\{i | \rho_i \geq 0\}} \rho_i, \quad (19)$$

так как переменная y_{i^+} может привести к улучшению решения. Последним шагом алгоритма, заканчивающим формирование допустимого ре-

шения, является шаг, на котором $I_3 = 0$. Значение целевой функции, соответствующее найденному допустимому целочисленному решению, определяется согласно (17). Если проверка с помощью решения двойственной задачи не подтверждает оптимальности допустимого решения, то его уточняем методом ветвей и границ. Схема ветвления односторонняя, использующая правило «последний вошел — первый выходит», т. е. для ветвления выбирается висячая вершина, образованная последней. В основу дерева вариантов принимается ветвь, полученная на первом этапе, дальнейшее ветвление производится с помощью показателей r_i , как и при поиске первого допустимого решения.

Отсечение бесперспективных ветвей осуществляется сравнением оценки (14), полученной в результате решения двойственной задачи (11)—(12) с учетом ограничения (13), со значением целевой функции (17), соответствующей наилучшему из уже найденных допустимых решений. Поэтому здесь важно с самого начала получить значение целевой функции задачи (1)—(5), близким к оптимальному. Следовательно, способ получения допустимого решения должен быть достаточно эффективным.

Одной из основных сложностей, связанных с решением задач оптимизации многомерных параметрических рядов, является их большая размерность. В некоторых случаях размерность задачи можно уменьшить на этапе предварительного анализа исходных данных. Сущность одного из возможных способов заключается в определении с помощью специальных показателей тех изделий, которые обязательно следует включить в оптимальный ряд. Поиск таких изделий осуществляется без решения исходной оптимизационной задачи с помощью показателей

$$\Delta_i = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^N \min [\max(c_{lj} - c_{ij}; 0)] - c_i^0, \quad i \in I, \quad (20)$$

характеризующих увеличение затрат на обеспечение заданных потребностей в изделиях, если принять $y_i = 0$. Поэтому при условии $\Delta_i \geq 0$ необходимо включить i -й тип изделия в I^* , приняв $y_i = 1$.

В целом предложенный подход к математической формализации задачи формирования параметрических рядов и алгоритм ее решения позволяют обеспечить рациональную интеграцию инновационных проектов в предметную область их использования и могут найти широкое применение в инновационном менеджменте.

Литература

1. Береснев В. Л., Гимади Э. Х., Дементьев В. Г. Экстремальные задачи стандартизации. — Новосибирск: Наука, 1978. — 333 с.
2. Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г. Метод решения одного класса задач целочисленного программирования // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1989. Т. 29. № 10. С. 1586–1590.
3. Алексеев О. Г., Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г. Применение двойственности для повышения эффективности метода ветвей и границ при решении задачи о ранце // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1985. Т. 25. № 11. С. 1666–1673.

УДК 681.326.3

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ СГЛАЖИВАНИЯ ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ БОРТОВЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ

В. Б. Кублановский,
генеральный директор, главный конструктор
С. В. Кошелев,
ведущий инженер
ОАО «НИИ ВС «Спектр»

Предлагаются математическая модель и алгоритмы сглаживания входных информационных процессов, наблюдаемых в автоматизированных системах контроля бортовой аппаратуры летательных аппаратов. Модель основана на экспериментальных данных, а алгоритмы сглаживания построены с учетом ограниченных временных и аппаратных ресурсов реальных бортовых систем контроля.

Ключевые слова — математическая модель, информационный параметр, алгоритмы сглаживания, система контроля.

Введение

Математические модели сигналов необходимы как для синтеза алгоритмов функционирования аппаратуры контроля, так и для ее отладки в стендово-имитационной среде, используемой при автоматизированном проектировании бортовых автоматизированных систем контроля (БАСК).

Система контроля бортовой аппаратуры является информационно-измерительной, поэтому вопрос выбора способов предварительной обработки входных сигналов для обеспечения повышенной точности и достоверности измерения контролируемых параметров становится одним из важнейших вопросов при ее проектировании [1].

Основной целью предварительной обработки функционального преобразования над сигналами является ослабление действия помех, содержащих более высокочастотные компоненты по сравнению с полезным сигналом. Искажения сигналов в измерительных и цифровых трактах в результате возникновения сбоев в цифровых устройствах также можно интерпретировать как воздействие помех.

На входы БАСК поступает значительный объем параметрической информации в аналоговой, бинарной и кодовой форме (несколько тысяч параметров). При достаточно высокой частоте опроса входных каналов для обеспечения предварительной об-

работки информационных потоков требуется специальная аппаратная реализация как средств сбора информации, так и средств ее обработки.

При существующей производительности бортовых ЦВМ, пропускной способности каналов измерения и сложности программного обеспечения программные решения при опросе каналов ввода информации и при предварительной обработке последней практически неосуществимы [2]. Поэтому решения о способах сглаживания, реализуемых ограниченными аппаратными средствами, приобретают особую важность. Это, в свою очередь, приводит к необходимости построения простых и адекватных математических моделей входных информационных сигналов, на основании которых синтезируются, тестируются и оцениваются алгоритмы, реализующие предварительную обработку.

Формализация задач измерения, сохранения и обработки информации в БАСК

При формализации процессов измерения, сохранения и обработки информации в БАСК необходимо, как указано выше, определить математические модели этих процессов.

Наблюдаемые динамические процессы, происходящие в БАСК, проявляются в виде ряда последовательно расположенных во времени значе-

ний того или иного показателя, который в своих изменениях отражает ход изменения контролируемого параметра. Эти значения служат основой для соответствующих выводов о работоспособности наблюдаемой системы или устройства, а также о вероятных сбоях и прогнозе возможности выхода оцениваемого параметра за пределы допусков.

В этой работе ограничимся рассмотрением вопросов сглаживания параметров, предполагая, что все вопросы, связанные с дискретизацией по времени и по уровню, решены в системе сбора информации в соответствии с необходимыми техническими требованиями. В этом случае в качестве математической модели наблюдаемых процессов можно принять математическую модель временных рядов [3].

Итак, пусть имеется некоторый отрезок наблюдаемого временного ряда, состоящий из n отсчетов x_1, x_2, \dots, x_n . Тогда отдельный отсчет ряда может быть представлен в виде $x_t = U_t + \xi_t$, где U_t — информационный сигнал, подлежащий измерению и регистрации, а ξ_t — помеха в моменты времени $t = 1, 2, \dots, n$.

В классическом анализе временных рядов полагаются, что информационный сигнал U_t может содержать как некоторую устойчивую составляющую, характеризующую основную тенденцию изменения информационного параметра, называемую трендом, так и периодическую составляющую, под которой понимаются более или менее регулярные колебания. Составная часть временного ряда, остающаяся после выделения из него тренда и периодической составляющей (регулярных компонент), представляет собой случайную, нерегулярную компоненту. Она всегда присутствует в любом временном ряде, отражающем процесс наблюдения показателей технических систем и устройств.

Предполагается, что случайная компонента ξ_t временного ряда обладает следующими свойствами: случайностью колебаний уровней; соответствием распределения нормальному закону; равенством математического ожидания нулю; отсутствием существенной автокорреляции. Если не выполняется хотя бы одно из перечисленных свойств случайной составляющей, непосредственное применение классических методов сглаживания временных рядов некорректно.

Отличительные особенности временных рядов БАСК

В реальной ситуации при снятии данных с технических систем и устройств некоторые из указанных свойств классических временных рядов могут и не выполняться. Прежде всего это от-

носится к постулату о нормальности распределения случайной компоненты, а также к требованию отсутствия существенной автокорреляции. В силу этого в автоматизированных системах контроля нельзя непосредственно использовать классические методы сглаживания временных рядов.

Авторами был проведен анализ записей БАСК-124 и последней версии БАСК-225. Эти системы контроля работоспособности бортовой аппаратуры регистрируют более 4000 параметров [3]. В результате анализа выяснилось, что для некоторых каналов регистрации вполне приемлемы математические модели сигналов в виде временных рядов. В этом случае для повышения точности измерений достаточно использовать линейные преобразования входных сигналов, т. е. классические методы сглаживания.

Некоторые каналы регистрации содержат помеху, распределение которой отличается от гауссова. При этом, кроме шумовой негауссовой составляющей, помеха может содержать составляющую, которая приводит к появлению аномальных выбросов. Эти аномальные выбросы могут быть обусловлены как электромагнитными наводками, так и сбоями бортовой аппаратуры. Для математического описания помех с подобными аномальными выбросами можно использовать распределения с «утяжеленными хвостами», к которым относятся такие распределения как экспоненциальное, распределение Лапласа, логарифмически-нормальное распределение, а также составные распределения Тьюки и Хьюбера [4].

В том случае, когда ξ_t имеет распределение, существенно отличающееся от гауссова, для повышения эффективности алгоритмов сглаживания используются нелинейные преобразования последовательности x_1, x_2, \dots, x_n . В присутствии аномальных наблюдений, обусловленных сбоями в работе аппаратуры или наводками, для сглаживания применяются робастные алгоритмы обработки временных рядов. На практике наиболее распространенными (в силу простоты реализации) видами таких преобразований являются мажоритарное сглаживание и вычисление медианы.

Большинство каналов регистрации содержат как гауссову, так и негауссову помеху, которая может включать и аномальные выбросы. Эта ситуация наиболее характерна для БАСК. В таких случаях необходимо сочетать оба способа сглаживания — линейные и нелинейные преобразования, а в присутствии аномальных выбросов необходима предварительная отбраковка этих выбросов.

Линейные сглаживающие алгоритмы

К наиболее простым классам линейных сглаживающих алгоритмов относят алгоритм вычис-

ления выборочного среднего и алгоритм экспоненциального сглаживания, которые достаточно просто реализуются аппаратно с помощью цифровых фильтров.

При анализе точности цифровых фильтрующих устройств необходимо учитывать два класса ошибок — случайные и динамические. Природа случайных ошибок проистекает из случайного характера измерений. Динамические ошибки возникают в результате того, что любое цифровое сглаживающее устройство обладает конечной степенью астатизма, а следовательно, в общем случае не может воспроизвести полезный сигнал без ошибки, если степень астатизма сглаживающего устройства меньше степени полинома, описывающего изменение полезного сигнала.

Алгоритм вычисления выборочного среднего может быть записан в виде

$$y_t = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i, \quad (1)$$

где y_t — вычисленное выборочное среднее значение сигнала в момент t ; m — количество измерений за цикл вычисления; x_i — i -е значение входного сигнала за цикл вычисления. Этот способ весьма эффективен и может дать хороший результат, но лишь когда m достаточно велико. Необходимо учитывать, что систематическая составляющая погрешности в этом случае остается без изменений, а ширина разброса случайной составляющей уменьшается при нормальном распределении ошибки и отсутствии корреляции в \sqrt{m} раз.

Алгоритм экспоненциального сглаживания записывается в виде

$$y_t = \gamma x_t + (1 - \gamma)y_{t-1}, \quad (2)$$

где $y_0 = 0$, $y_1 = \gamma x_1$; y_t — значение сигнала после фильтрации в момент t ; γ — константа, выбираемая из соображений минимизации ошибки, удобства вычислений и других соображений, $0 \leq \gamma \leq 1$; x_t — значение входного сигнала в момент t ; y_{t-1} — значение сигнала после фильтрации в предыдущий момент $t - 1$. Формула (2) преобразуется к виду $y_t = y_{t-1} + \gamma(x_t - y_{t-1})$, что представляет собой рекуррентную формулу вычисления y_t [5].

Качество алгоритмов, представленных выражениями (1) и (2), по динамическим ошибкам при анализе их методом наименьших квадратов оценивается коэффициентами полинома второй степени c_0, c_1, c_2 , а по случайным ошибкам — коэффициентом сглаживания p .

Для алгоритма вычисления выборочного среднего $p = 1/(v + 1)$, а для алгоритма экспоненциального сглаживания $p = \gamma/(2 - \gamma)$. Легко видеть, что, выбрав соответствующие значения γ , можно обеспечить значение p , одинаковое с алгоритмом вы-

борочного среднего $1/(n + 1) = \gamma/(2 - \gamma)$, откуда $\gamma = 2/(n + 2)$.

Алгоритм экспоненциального сглаживания значительно более прост в реализации, чем метод вычисления выборочного среднего, особенно для случая, когда γ представляет собой число вида $1/2^k$. Кроме того, этот метод требует значительно меньшего количества измерений за цикл фильтрации, чем вычисление выборочного среднего, который работает лучше при увеличении числа измерений m за цикл вычислений.

Анализ линейных алгоритмов сглаживания показывает, что их эффективность значительно падает при больших дисперсиях случайных редких ошибок, характерных при сбоях в старших разрядах измерительных и цифровых трактов. Для сглаживания таких ошибок необходимо либо выбирать большое m в алгоритме выборочного среднего, либо малое γ в алгоритме экспоненциального сглаживания, что, в свою очередь, естественно приведет к увеличению динамических ошибок в сглаженном сигнале.

Нелинейные сглаживающие алгоритмы

Для борьбы с помехами, обусловленными сбоями аппаратуры и наводками, используют нелинейные преобразования наблюдаемого сигнала. На практике наиболее распространенными (в силу простоты реализации) видами таких преобразований являются мажоритарное сглаживание и вычисление медианы.

Мажоритарное сглаживание предполагает наличие некоторого допуска δ на возможное изменение сигнала за период дискретизации по времени. В качестве отфильтрованного значения сигнала y_n выбирается некоторое x_k из множества значений сигнала, находящихся в окрестностях δ [6].

Из практики известно, что подобные алгоритмы имеют большую эффективность в сравнении с линейными алгоритмами при возникновении ошибок в результате сбоев. Анализ значений p и динамической ошибки такого нелинейного сглаживания возможен только на основе математического моделирования.

Алгоритм сглаживания на основе выбора медианы чаще всего используется при нечетном числе данных. При этом выделяется средний член вариационного ряда $y = x_{k+1}$ (ряда x_1, \dots, x_{2k+1} , упорядоченного по величине x_i). Можно показать, что для нормального распределения случайной составляющей ряда с дисперсией σ^2 дисперсия случайной ошибки σ_y^2 медианы при нечетном числе измерений приближенно равна $\sigma_y^2 \cong \pi \sigma^2 / (4k + \pi)$, т. е. $p_y^{\text{мед}} = \pi / (4k + \pi)$, где $k = (m - 1)/2$. Для $m = 3$, $k = 1$ $p_y^{\text{мед}} \cong \pi / (4 + \pi)$, для $m = 5$, $k = 2$ $p_y^{\text{мед}} \cong \pi / (8 + \pi)$.

Преимущества такого нелинейного сглаживания перед линейными алгоритмами проявляются особенно ярко при распределении погрешностей, представимых моделью Хьюбера [4], т. е. в виде смеси распределений $f(x) = (1 - \alpha)f_1(x) + \alpha f_2(x)$, где $0 \leq \alpha \leq 1$, $f_1(x)$, $f_2(x)$ — плотности вероятности с дисперсией σ_1^2 , σ_2^2 соответственно, причем $\sigma_2^2 \gg \sigma_1^2$. Это выражение, в частности, описывает случай возникновения ошибок в результате сбоев.

Можно показать, что при сглаживании на основе выборочной медианы вероятность больших отклонений значительно снижается и составляет примерно α^{k+1} (для случая $k = 1$ в α^2 раз), в то время как для линейных алгоритмов сглаживания вероятность будет близка к α .

Следует отметить, что сопоставление способов мажоритирования и выбора медианы при сглаживании погрешностей от сбоев при допущении, что ошибки в измерениях сигнала типа «завышение» или «занижение» уровня равновероятны и среднеквадратическое отклонение ошибок значительно больше допуска δ (сбои в старших разрядах трактов), дает результат:

— для алгоритма мажоритирования

$$Q_1^{\text{маж}} = \alpha^3 + 2,5\alpha^2;$$

— для алгоритма выборочной медианы

$$Q_2^{\text{мед}} = \alpha^3 + 1,5\alpha^2,$$

где Q — вероятность ошибки; α — вероятность искажения измерения. Таким образом, сглажи-

вание на основе медианы оказывается эффективнее алгоритма мажоритирования по способу «2 из 3», хотя и незначительно.

Заключение

В реальной ситуации при снятии данных с технических систем и устройств входной сигнал БАСК может представлять собой аддитивную смесь информационного сигнала, включающего тренд и периодическую составляющую, и сигнала помехи, состоящего из шумовой помехи и аномальных выбросов.

При выборе алгоритма предварительной обработки информации в БАСК необходимо использовать как линейные, так и нелинейные алгоритмы предварительного сглаживания информации. Наиболее приемлемыми представляются алгоритм экспоненциального сглаживания в случае нормальных флюктуационных помех и алгоритм выбора медианы для тех каналов, в которых с большой вероятностью могут присутствовать сбои в работе технических систем.

При исследовании нелинейных алгоритмов сглаживания фактически единственным методом исследования этих алгоритмов является метод математического моделирования, который позволяет не только определить устойчивость исследуемых алгоритмов к воздействию негауссовых помех, но и вычислить характеристики качества алгоритмов.

Литература

1. Kublanovsky V. B., Shepeta A. P. Avtomatic Check-out Systems For Aviation Machinery (abstracts) // Intern. Symp. on Problems of Modular Information Computer Systems And Networks. Abstracts // IEEE. M.-St.-P.: Russian Academy Of Science; Moscow State University, 1997. P. 46.
2. А. с. 1149255 СССР, МКИ³ G 06 F 9/00. Устройство для управления многоканальной измерительной системой / В. Б. Кублановский, Т. Н. Кошелева (СССР). — 3861462/24-24; заявл. 28.02.85; опубл. 15.09.86. Бюл. 34. — 5 с.
3. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов / Пер. с англ. И. Г. Журбенко, В. П. Носко. — М.: Мир, 1976. — 756 с.
4. Хьюбер Дж. П. Робастность в статистике: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 304 с.
5. А. с. 1615745 СССР, МКИ³ G 06 F 15/353. Устройство для дискретного экспоненциального сглаживания / В. Б. Кублановский, Я. В. Маховер (СССР). — 4668223/24-24; заявл. 25.01.89; опубл. 23.12.90. Бюл. 47. — 3 с.
6. А. с. 1247889 СССР, МКИ³ G 06 F 15/332. Многоканальное измерительное устройство для цифровой фильтрации / В. Б. Кублановский, Я. В. Маховер (СССР). — 3749572/24-24; заявл. 30.05.84; опубл. 30.07.86. Бюл. 28. — 3 с.

УДК 621.833:628.517.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛ, ВЫНУЖДАЮЩИХ ВИБРАЦИЮ В ОПОРАХ КАЧЕНИЯ

В. А. Голубков,
 канд. техн. наук, доцент

А. В. Голубков,
 ассистент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Представлены аналитические выражения для расчета спектральных характеристик сил, вызывающих вибрацию в зависимости от дефектов элементов шарикоподшипников с учетом неоднородности физико-механических свойств материала.

Ключевые слова – вибрация, неоднородность, подшипник.

Экспериментальные исследования показывают, что упругие свойства элементов шарикоподшипника зависят не только от дефектов его элементов, радиусов кривизны, материала, но также в значительной степени определяются неоднородностью структуры материала. Большой интерес представляет анализ сил, вынуждающих вибрацию в зависимости от этой неоднородности.

Рассмотрим динамические перемещения внутреннего кольца шарикоподшипника, пренебрегая центробежными силами и силами демпфирования. Дифференциальные уравнения, описывающие движение внутреннего кольца шарикоподшипника, можно записать в виде

$$\begin{cases} M\ddot{x}_1 + \sum_{i=1}^m F_{упр1i} = F_{ст1} \\ M\ddot{x}_2 + \sum_{i=1}^m F_{упр2i} = F_{ст2}, \\ M\ddot{x}_3 + \sum_{i=1}^m F_{упр3i} = F_{ст3} \end{cases} \quad (1)$$

где x_1, x_2, x_3 — координаты, определяющие положение центра масс внутреннего кольца; $F_{упрji}$ — проекция силы упругости, действующей в контакте внутреннего кольца с i -м шариком на j -е направление; $F_{стj}$ — проекция статической нагрузки на j -е направление.

Согласно теории Герца—Беляева, силу упругости, действующую со стороны i -го шарика на q -е кольцо, можно записать как

$$F_{упрi} = K_q \delta_{qi}^{3/2} e(\delta_{qi}),$$

где K_q — конструктивный коэффициент; δ_{qi} — деформация i -го шарика в контакте с q -м кольцом.

В работе [1] показано, что деформация i -го шарика в контакте с внутренним кольцом с учетом осевых нагрузок определяется статической и динамической составляющими, обусловленными действием статической нагрузки и вибрации соответственно:

$$\begin{aligned} \delta_{2i} = \delta_{2стi} + \frac{(K_1)^{2/3}}{(K_1)^{2/3} + (K_2)^{2/3}} \times \\ \times (x_1 \sin \beta_i + x_2 \cos \beta_i \cos \psi_{1i} + \\ + x_3 \cos \beta_i \sin \psi_{1i} - \delta r_{1i} - \delta r_{2i} + \delta d_i), \end{aligned}$$

где β_i — угол контакта i -го шарика с внутренним кольцом; $\psi_{1i} = \psi_1 + \frac{2\pi}{m}(i-1)$ — угловое положение i -го шарика в плоскости вращения, m — число шариков; $\delta r_{1i}, \delta r_{2i}, \delta d_i$ — составляющие, характеризующие технологические погрешности, не учтенные при статических расчетах. Линеаризуем функцию степени $3/2$

$$\begin{aligned} (\delta_{2i})^{3/2} e(\delta_{2i}) = \\ = \left[(\delta_{2стi})^{3/2} + (\delta_{2стi})^{1/2} \frac{(K_1)^{2/3}}{(K_1)^{2/3} + (K_2)^{2/3}} (x_1 \sin \beta_i + \right. \\ \left. + x_2 \cos \beta_i \cos \psi_{1i} + x_3 \cos \beta_i \sin \psi_{1i} - \delta r_{1i} - \delta r_{2i} + \delta d_i) \right] \times \\ \times e(\delta_{2i}). \end{aligned}$$

Учитывая, что $e(\delta_{2i}) \approx e(\delta_{2cti})$ [1] и условия статического равновесия

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m K_2(\psi)(\delta_{2cti})^{3/2} e(\delta_{2cti}) \sin \beta_i &= F_{ct1}; \\ \sum_{i=1}^m K_2(\psi)(\delta_{2cti})^{3/2} e(\delta_{2cti}) \cos \beta_i \cos \psi_{1i} &= F_{ct2}; \\ \sum_{i=1}^m K_2(\psi)(\delta_{2cti})^{3/2} e(\delta_{2cti}) \cos \beta_i \sin \psi_{1i} &= F_{ct3}, \end{aligned}$$

систему нелинейных уравнений (1) преобразуем к виду

$$\begin{aligned} M\ddot{x}_1 + \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \sin \beta_i x_1 + \\ + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \cos 2\beta_i \cos \psi_{1i} x_2 + \\ + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \cos 2\beta_i \sin \psi_{1i} x_3 = \\ = \sum_{q=1}^2 \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \sin \beta_i \delta r_q - \\ - \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \sin \beta_i \delta d_i; \\ M\ddot{x}_2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \sin 2\beta_i \cos \psi_{1i} x_1 + \\ + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \cos^2 \beta_i \cos \psi_{1i} x_2 + \\ + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \cos^2 \beta_i \sin 2\psi_{1i} x_3 = \\ = \sum_{q=1}^2 \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \delta r_q \cos \beta_i \cos \psi_{1i} - \\ - \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \cos \beta_i \cos \psi_{1i} \delta d_i; \\ M\ddot{x}_3 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \sin 2\beta_i \sin \psi_{1i} x_1 + \\ + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \cos^2 \beta_i \sin 2\psi_{1i} x_2 + \\ + \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \cos^2 \beta_i \sin^2 \psi_{1i} x_3 = \\ = \sum_{q=1}^2 \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \cos \beta_i \sin \psi_{1i} - \\ - \sum_{i=1}^m K_2'(\psi)(\delta_{2cti})^{1/2} e(\delta_{2cti}) \cos \beta_i \cos \psi_{1i} \delta d_i, \end{aligned}$$

где

$$K_2' = \frac{K_2(K_1)^{2/3}}{(K_1)^{2/3} + (K_2)^{2/3}}.$$

Зависимость вынуждающей силы в осевом направлении от углового положения элементов качения и дефекта наружного кольца имеет вид

$$\begin{aligned} F_{\text{вын}} = B \frac{3m}{2} r_{1k} \left\{ \sin \beta' \sum_{S=0}^{\infty} \gamma_{(sm \pm k)} \cos[(sm \pm k)\psi_q \mp \right. \\ \left. \mp k\psi_1 + \varphi_{(sm \pm k)} \mp \varphi_{1k}] + \frac{\beta_m}{2} \sin \beta' \left[\sum_{S=0}^{\infty} \gamma_{(sm - k \pm 1)} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \cos[(sm - k \pm 1)\psi_q + (k \mp 1)\psi_1 + \varphi_{(sm - k \pm 1)} + \varphi_{1k} \mp \varphi_m] + \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{S=0}^{\infty} \gamma_{(sm + k \pm 1)} \cos[(sm + k \pm 1)\psi_q + (-k \mp 1)\psi_1 + \right. \right. \\ \left. \left. + \varphi_{(sm + k \pm 1)} - \varphi_{1k} \mp \varphi_m] \right\}, \end{aligned}$$

где $\psi_q = K_q \psi_q(t)$,

$$K_q = \begin{cases} \frac{D_0 - d_{\text{ш}} \cos \beta_0}{2D_0}, & q = 1; \\ -\frac{D_0 + d_{\text{ш}} \cos \beta_0}{2D_0}, & q = 2, \end{cases}$$

β_0 — начальный угол контакта до приложения нагрузки и без учета технологических погрешностей; D_0 — диаметр окружности, проходящий через центры шариков; $d_{\text{ш}}$ — диаметр шарика; $\psi_{qi} = \psi_q + \frac{2\pi}{m}(i-1)$ — угол, определяющий точку контакта i -го шарика в комплекте с q -м кольцом подшипника; ψ_B — угол, определяющий положение внутреннего кольца; $\psi_B = \omega_B t$; $\psi_q = \omega_q t$, ω_B , ω_1 — частоты вращения внутреннего кольца и сепаратора шарикоподшипника; $\omega_2 = \omega_B - \omega_1$.

$$B = \frac{K_1 K_2}{(K_1^{2/3} + K_2^{2/3})^{3/2}} = B_0 + \sum_{q=1}^2 \sum_{k=1}^{128} B_k \cos(k\psi_q + \varphi_{qk})$$

— конструктивный параметр шарикоподшипника [2]:

$$\begin{aligned} K_1 &= \sum_k K_{1k} \cos(k\psi_1 + \varphi_{1k}); \\ K_2 &= \sum_k K_{2k} \cos(k\psi_2 + \varphi_{2k}). \end{aligned}$$

Для подшипников с равномерными спектрами профилограмм и преобладающими дефектами q -го кольца функцию $(\delta_i)^{1/2} e(\delta_i)$ в силу ее периодичности можно представить рядом

$$(\delta_i)^{1/2} e(\delta_i) = \gamma_0 + \sum_p \gamma_p \cos(p\psi_{qi} + \varphi_p),$$

где

- Дополнительные гармонические составляющие вынуждающих сил, вызванные неоднородностью физико-механических свойств материала колец, с учетом k -й гармоники некруглости наружного r_{1k} и внутреннего r_{2k} колец

Наружное кольцо		Внутреннее кольцо	
Амплитуда	Частота	Амплитуда	Частота
$\frac{3}{2}mB_{k6}\gamma_0r_{1k}\cos\beta$	$(k_6n \pm k + 1)\omega_1 - k_6l\omega_2$	$\frac{3}{2}mB_{k5}\gamma_0r_{2k}\cos\beta$	$(k_5l \pm k)\omega_2 + (k_5n + 1)\omega_1$
$\frac{3}{2}mB_{k7}\gamma_0r_{1k}\cos\beta$	$(k_7n \pm k + 1)\omega_1$	$\frac{3}{2}mB_{k5}\gamma_0r_{2k}\cos\beta$	$(k_5l \pm k)\omega_2 + (k_5n - 1)\omega_1$
$\frac{3}{2}mB_{k7}\gamma_0r_{1k}\cos\beta$	$(k_7n \pm k - 1)\omega_1$	$\frac{3}{2}mB_{k6}\gamma_0r_{2k}\cos\beta$	$(k_6l + 1)\omega_1 - (k_6l \mp k)\omega_2$
$\frac{3}{2}mB_{k7}\gamma_0r_{1k}\cos\beta$	$k_8l\omega_2 + (1 \pm k)\omega_1$	$\frac{3}{2}mB_{k6}\gamma_0r_{2k}\cos\beta$	$(k_6n - 1)\omega_1 - (k_6l \mp k)\omega_2$
$\frac{3}{2}mB_{k8}\gamma_0r_{1k}\cos\beta$	$k_8l\omega_2 - (1 \mp k)\omega_1$	$\frac{3}{2}mB_{k7}\gamma_0r_{2k}\cos\beta$	$(k_7n + 1)\omega_1 \pm k\omega_2$
		$\frac{3}{2}mB_{k8}\gamma_0r_{2k}\cos\beta$	$(k_8l \pm k)\omega_2 + \omega_1$
		$\frac{3}{2}mB_{k8}\gamma_0r_{2k}\cos\beta$	$(k_8l \pm k)\omega_2 - \omega_1$

¹ k_5, k_6, k_7, k_8 — целые числа 1, 2, ..., 128; k, l, n — целые числа 1, 2, ..., m ; ω_1, ω_2 — частоты вращения сепаратора относительно наружного и внутреннего колец соответственно.

$$\gamma_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} (\delta_i)^{1/2} e(\delta_i) d\psi;$$

$$\gamma_p = \sqrt{(\gamma_p^c)^2 + (\gamma_p^s)^2};$$

$$\varphi_p = \arctg \left[-\frac{\gamma_p^s}{\gamma_p^c} \right];$$

$$\gamma_p^c = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} (\delta_i)^{1/2} e(\delta_i) \cos p\psi d\psi;$$

$$\gamma_p^s = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} (\delta_i)^{1/2} e(\delta_i) \sin p\psi d\psi.$$

Аналогично выводятся выражения для вынуждающих сил в радиальном направлении при преобладающих дефектах наружного и внутреннего колец.

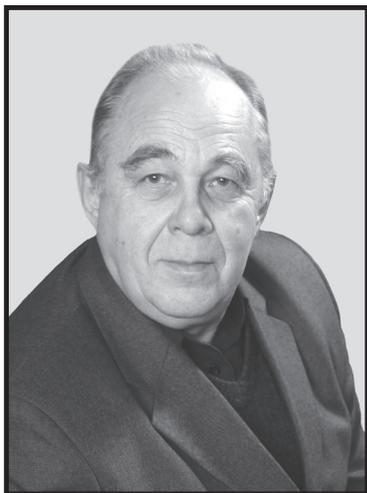
Дополнительные спектральные составляющие вынуждающих сил, обусловленные технологическими погрешностями изготовления и сборки шарикоподшипников с учетом неоднородно-

сти упругих свойств материала, имеют широкий диапазон и представлены в таблице.

Анализ амплитуд и частот позволяет сделать вывод о том, что неоднородность физико-механических свойств материала элементов шарикоподшипника в сочетании с дефектами приводит к значительному увеличению виброактивности опор качения, к увеличению динамических нагрузок в зоне контакта тел качения, к повышенному износу и как следствие к снижению ресурса работы опор качения.

Литература

1. **Приборные шариковые подшипники:** Справочник / Под ред. К. Н. Явленского. — М.: Машиностроение, 1981. — 351 с.
2. **Ефимов А. А., Голубков В. А., Голубков А. В.** Гармонический анализ сил, вынуждающих вибрацию в опорах качения // Завалишинские чтения: Сб. докл. / СПбГУАП. СПб., 2007. С. 51–54.



ПАМЯТИ ЕРОША ИГОРЯ ЛЬВОВИЧА

30 апреля 1937 — 5 января 2010

На 72-м году ушел из жизни доктор технических наук, профессор Игорь Львович Ерош — замечательный человек, друг, педагог.

И. Л. Ерош родился 30 апреля 1937 года в Оренбурге. Школу окончил с золотой медалью. В 1960 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина).

Более 40 лет трудовой деятельности Игоря Львовича связаны с Санкт-Петербургским государственным университетом аэрокосмического приборостроения (ГУАП): в 1968 году он пришел на кафедру технической кибернетики Ленинградского института авиационного приборостроения, в 1972-м был одним из основателей кафедры вычислительных систем и сетей.

Область научных интересов И. Л. Ероша — дискретная математика, защита информации, распознавание образов, робототехнические системы. Он автор более 350 научных работ, 100 изобретений, соавтор большого числа монографий и учебных пособий по дискретной математике, робототехническим системам, системам с искусственным интеллектом, обработке изображений. Разработанные им методы нашли применение во многих промышленных информационных системах.

За свою научную деятельность Игорь Львович награжден медалью «Изобретатель СССР». Он избран действительным членом Международной академии информатизации, членом Японской ассоциации промышленных роботов.

Игорь Львович был прекрасным педагогом, воспитателем, наставником, подготовившим десятки инженеров и научных работников высшей квалификации. Его заслуги в этой области были отмечены званием «Почетный работник высшего профессионального образования РФ». Трижды И. Л. Ерош был лауреатом международной соровской образовательной программы в области точных наук.

Игорь Львович был превосходным лектором, его с удовольствием слушали студенты ГУАП, Курганского государственного университета, Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, Будапештского технического университета и др.

За долголетний добросовестный труд И. Л. Ерош награжден медалью «Ветеран труда», за значительный вклад в развитие города — медалью «В память 300-летия Санкт-Петербурга».

Игоря Львовича всегда отличали жизненный оптимизм, отзывчивость, энергичность, исключительная работоспособность.

Светлая память об Игоре Львовиче Ероше сохранится в наших сердцах.

*Коллектив кафедры
вычислительных систем и сетей
Санкт-Петербургского
государственного университета
аэрокосмического приборостроения*



ПАМЯТИ СТОГОВА ГЕНРИХА ВЛАДИМИРОВИЧА

2 апреля 1933 — 3 февраля 2010

Ушел из жизни крупный ученый и замечательный педагог, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, почетный работник высшей школы, действительный член Российской академии космонавтики им. К. Э. Циолковского Генрих Владимирович Стогов.

Его научно-педагогическая деятельность многие годы неразрывно связана с двумя вузами Санкт-Петербурга — Военно-космической академией им. А. Ф. Можайского (ВКА) и Санкт-Петербургским государственным университетом аэрокосмического приборостроения (ГУАП). Г. В. Стогов — известный ученый в области обработки сигналов, помехозащищенности радиоканалов, анализа и синтеза сложных радиотехнических систем, создатель научной школы «Космические радиотехнические системы и комплексы». Он является автором более 300 научных и методических трудов. Под его руководством подготовлено более 30 кандидатов и 8 докторов наук.

После окончания Ленинградской Военно-воздушной инженерной академии им. А. Ф. Можайского в 1957 году Г. В. Стогов — начальник отделения на Главном аэродроме ВВС, затем в Ленинградской Военно-воздушной инженерной академии им. А. Ф. Можайского прошел путь от инженера отделения до начальника кафедры космических радиотехнических систем, с 1991 года — ведущий научный сотрудник в секции прикладных проблем Санкт-Петербургского научного центра РАН, преподавал в ВКА и ГУАП. В обоих вузах Г. В. Стогову было присвоено звание почетного профессора.

Генрих Владимирович в своих исследованиях одним из первых обратился к вопросам использо-

вания дискретных сигналов, цифровых методов передачи информации и космических ретрансляционных систем, под его руководством были начаты приоритетные исследования в области сетевых низкоорбитальных систем связи и управления. Г. В. Стогов входил в состав Государственных комиссий по испытаниям и приему новых систем на вооружение. В числе работ, выполненных Г. В. Стоговым в разные годы, — расчет программ облета и посадки на Луну в рамках отечественной лунной программы, обоснование принципов применения сложных сигналов в космических радиоприемах, системное проектирование спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС, разработка информационно-управляющего комплекса многофункциональной радиотехнической системы.

Коллеги, ученики и выпускники Г. В. Стогова помнят его как прекрасного и широко эрудированного преподавателя, доброжелательного и отзывчивого человека. Он всегда щедро делился своим богатейшим опытом и знаниями. До последнего дня вел активную научную и педагогическую деятельность, участвовал в работе научных семинаров, работал в нескольких советах по защите докторских и кандидатских диссертаций и много сделал для подготовки высококвалифицированных специалистов и становления молодых ученых. Замечательный человек, ученый и педагог Генрих Владимирович Стогов навсегда останется в нашей памяти.

*Коллективы кафедр
космических радиотехнических систем ВКА
и антенн и эксплуатации
радиоэлектронной аппаратуры ГУАП*

АВETИCOBA
Нина
Григорьевна



Соискатель ученой степени кандидата технических наук на кафедре вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.
В 2007 году окончила Северо-Кавказский государственный технический университет по специальности «Прикладная информатика (в экономике)». Область научных интересов — защита подлинности цифрового содержимого посредством цифровых водяных знаков.
Эл. адрес: dizzle@list.ru

AKИMЦEB
Владимир
Васильевич



Доцент, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра проблем федеральной системы разведки и контроля воздушного пространства. В 1973 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиотехника». В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 40 научных публикаций и запатентованного изобретения. Область научных интересов — статистическая радиолокация, обработка радиолокационной информации.
Эл. адрес: vvznak@mail.ru

АЛЬ-ДЖУНЕЙДИ
БАДЖИС
ЗЙЯД



Гражданин Иордании. Аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2006 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» по специальности «Информатика и вычислительная техника». Область научных интересов — теория параметризации, компьютерная графика, методы проектирования систем, системы конструкторского проектирования.
Эл. адрес: ba-jes@hotmail.com

БОCOB
Дмитрий
Борисович



Глава представительства компании «Алтек инвестментс лимитед» в РФ. В 1991 году окончил Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственный технический университет им. Н. Э. Баумана по специальности «Оптические приборы и системы». В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Является автором 30 научных публикаций, в том числе четырех монографий. Область научных интересов — управление народным хозяйством, инновационный менеджмент.
Эл. адрес: bosovalm@yandex.ru

БРИТОВ
Георгий
Семенович



Доцент кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1963 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Авиационное приборостроение». В 1968 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и 13 запатентованных изобретений. Область научных интересов — теория надежности и техническая диагностика информационных систем.
Эл. почта: bgs@ibi.metrocom.ru

ВАСИЛЬЕВСКИЙ
Александр
Сергеевич



Ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «Гранит-Электрон». В 1968 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика». В 1978 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — интеллектуальные системы управления, системы жесткого реального времени.
Эл. адрес: vas727@peterlink.ru

**ГОЛОЛОБОВ
Леонид
Иванович**



Доцент, старший научный сотрудник Военно-морского института радиоэлектроники им. А. С. Попова.
В 1963 году окончил Высшее военно-морское училище радиоэлектроники, в 1974 году — Военно-морскую академию.
В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором более 80 научных публикаций.
Область научных интересов — информационные и сетевые технологии, исследование процессов обработки и передачи данных человеком и техническими средствами, автоматизация управленческой деятельности.
Эл. адрес: lig01@mail.ru

**ГОЛУБКОВ
Виктор
Александрович**



Доцент, заместитель заведующего кафедрой электротехники и технической диагностики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.
В 1975 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Автоматизированные системы управления».
В 1982 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором более 140 научных публикаций и 25 изобретений.
Область научных интересов — теория контроля и диагностики электромеханических систем.
Эл. адрес: viktor-golubkov@yandex.ru

**КОРДЕРО
Либорио**



Гражданин Италии.
Магистр технических наук, аспирант кафедры радиоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.
В 1987 году окончил Рижский государственный институт гражданской авиации.
В течение 10 лет работал в телекоммуникационных компаниях в Нью-Йорке и Нью-Джерси (США).
Обладатель сертификатов CCNP, CCDP, MCSE и CCIE.
Является автором пяти научных публикаций.
Область научных интересов — радиосвязь с космическими аппаратами на траектории спуска.
Эл. адрес: lcordero@mail.ru

**ГОЛУБКОВ
Александр
Викторович**



Ассистент кафедры электротехники и технической диагностики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.
В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».
Область научных интересов — теория контроля и диагностики электромеханических систем.
Эл. адрес: kaerulus2@yandex.ru

**ГРИГОРЬЯН
Амаяк
Карэнович**



Аспирант кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.
В 2007 году окончил Северо-Кавказский государственный технический университет по специальности «Прикладная информатика (в экономике)».
Область научных интересов — применение цифровых водяных знаков для защиты информации.
Эл. адрес: mikaello@mail.ru

**КОШЕЛЕВ
Сергей
Вениаминович**



Ведущий инженер ОАО «Научно-исследовательский институт вычислительных средств «Спектр» холдинговой компании «Ленинец».
В 2000 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Является автором четырех научных публикаций.
Область научных интересов — системный анализ, математическое моделирование, программирование, обработка информации.
Эл. адрес: spectr2008@gmail.com

**КУБЛАНОВСКИЙ
Вениамин
Борисович**



Генеральный директор ОАО «Научно-исследовательский институт вычислительных средств «Спектр» холдинговой компании «Ленинец».

В 1972 году окончил Ленинградский институт точной механики и оптики по специальности «Электронные вычислительные машины».

Является автором восьми научных публикаций и 17 авторских свидетельств на изобретения.

Область научных интересов — системный анализ, математическое моделирование, программирование, проектирование бортовых авиационных комплексов.

Эл. адрес: jsc.spectr@gmail.com

**ЛАПШИН
Кирилл
Владимирович**



Начальник научно-исследовательской лаборатории ОАО «Концерн «Гранит-Электрон».

В 1998 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Приборы и системы ориентации, навигации и стабилизации летательного аппарата».

Является автором девяти научных публикаций.

Область научных интересов — системы управления сложными динамическими объектами.

Эл. адрес: kir_i_k@mail.ru

**ЛЯЧЕК
Юлий
Теодосович**



Доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

В 1963 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 1975 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 120 научных публикаций и пяти авторских свидетельств на изобретения.

Область научных интересов — теория параметризации, компьютерная графика, методы проектирования топологических схемотехнических систем и др.

Эл. адрес: tylyachek@mail.ru

**МЕЩЕРИН
Александр
Николаевич**



Адъюнкт Санкт-Петербургского высшего военного училища радиоэлектроники.

В 2001 году окончил Военный университет противовоздушной обороны по специальности «Радиотехнические средства».

Является автором двадцати девяти научных публикаций.

Область научных интересов — теория обнаружения и разрешения сигналов, цифровая обработка радиолокационной информации.

Эл. адрес: mes-al@mail.ru

**МИРОНОВСКИЙ
Леонид
Алексеевич**



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Действительный член Академии навигации и управления движением, заслуженный работник высшей школы.

В 1962 году окончил Ленинградский политехнический институт.

В 1981 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 170 научных публикаций, соавтором пяти учебников и монографий, автором более 50 изобретений.

Область научных интересов — техническая диагностика и компьютерное моделирование динамических систем.

Эл. адрес: mir@aanet.ru

**СЕСИН
Алексей
Евгеньевич**



Заместитель генерального директора ФГУП «Санкт-Петербургское опытно-конструкторское бюро «Электроавтоматика» имени П. А. Ефимова. Заслуженный технолог РФ. Почетный авиастроитель.

В 1972 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения.

Является автором семи научных публикаций.

Область научных интересов — системный анализ, математическое моделирование, проектирование бортовых авиационных комплексов.

Эл. адрес: sesin@elavt.spb.ru

**СОЛЬНИЦЕВ
Ремир
Иосифович**



Профессор кафедры компьютерного проектирования информационно-измерительных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1956 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина). В 1970 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 300 научных публикаций. Область научных интересов — системы автоматизации проектирования, системы управления, экологические системы. Эл. адрес: remira@iv13910.spb.edu

**ТИХОНОВА
Ульяна
Николаевна**



Аспирант кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, стажер-исследователь в лаборатории астрономического программирования Института прикладной астрономии РАН. В 2008 году окончила Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Прикладная математика и информатика». Является автором пяти научных публикаций. Область научных интересов — формализация знаний, UML, проблемно-ориентированные языки, теория трансляции, автоматное программирование. Эл. адрес: ulyana.tikhonova@gmail.com

**ШЕПЕТА
Дмитрий
Александрович**



Доцент кафедры компьютерной математики и программирования Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, обладатель сертификата MCSD. В 1997 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 20 научных публикаций. Область научных интересов — математическое моделирование и программирование. Эл. адрес: alex@shepeta.com

**СУКОНЩИКОВ
Алексей
Александрович**



Доцент кафедры автоматизации и вычислительной техники, докторант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Вологодского государственного технического университета, почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1982 году окончил Вологодский политехнический институт. В 1986 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 120 научных публикаций. Область научных интересов — методы моделирования корпоративных сетей, многоагентные системы, методы формализации и верификации на базе сетей Петри. Эл. адрес: avt@mh.vstu.edu.ru

**ТРЕВГОДА
Михаил
Александрович**



Аспирант кафедры САПР Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ». Является автором семи научных публикаций. Область научных интересов — моделирование, системы управления, алгоритмизация. Эл. адрес: misha_0312@mail.ru

**ЯКОВЛЕВ
Сергей
Алексеевич**



Профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», действительный член Международной академии информатизации, заслуженный работник высшей школы РФ. В 1970 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина). В 1989 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 250 научных и учебных работ. Область научных интересов — интеллектуализация информационно-управляющих систем, имитационное моделирование, инфокоммуникационные сети. Эл. адрес: SAJakovlev@list.ru

УДК 658.310.11

Закономерность и свойства совместной обработки и передачи данных операторами и техническими средствами

Гололобов Л. И. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 2–8.

Определены мера объема и объект совместной обработки и передачи данных для моделирования деятельности и функционирования технических средств. Раскрыты закономерность и свойства совместной обработки и передачи данных операторами и техникой.

Ключевые слова — операторы, технические средства, объект совместной обработки и передачи данных, производительность.

Список лит.: 3 назв.

УДК 681.324

Обобщенная модель системы ситуационного интеллектуально-агентного моделирования

Яковлев С. А., Суконщиков А. А. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 9–14.

Рассмотрены вопросы построения ситуационных интеллектуально-агентных систем моделирования сложных объектов на примере корпоративных сетей с поддержкой качества обслуживания, приведена мульти-агентная интеллектуальная система, дано теоретико-множественное описание агентов и их взаимодействий.

Ключевые слова — агент, интеллектуальная система, ситуационное интеллектуально-агентное моделирование.

Список лит.: 4 назв.

УДК 004.896

Темпоральные немонотонные логические системы в задачах моделирования систем управления сложными динамическими объектами

Васильевский А. С., Лапшин К. В. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 15–20.

Рассматриваются возможности использования темпоральных немонотонных логических систем на основе линейной временной логики с часами в задачах моделирования систем управления сложными динамическими объектами, работающих в режиме жесткого реального времени.

Ключевые слова — темпоральная логика, жесткое реальное время, система управления.

Список лит.: 3 назв.

УДК 658.310.11

The regularities and properties of joint processing and data transmission by the operators and technical means

Gololobov L. I. IUS, 2010. N 2. P. 2–8.

We define the measure of the volume and the object of joint processing and data transmission for the activity modeling and technical means functionality. The regularities and properties of joint processing and data transmission by the operators and technological means are described.

Keywords — operators, technical means, joint processing and data transmission object, performance.

Refs: 3 titles.

УДК 681.324

A generalized model of intellectually situational agent modeling system

Yakovlev S. A., Sukonshykov A. A. IUS, 2010. N 2. P. 9–14.

In this article, the issue of constructing an intellectually situational agent modeling systems of complex objects, by an example of corporate networks with support of quality of service, are discussed. Multi-agent intellectual systems are considered, and a plural-theoretical description of the agents and their interactions is given.

Keywords — the agent, intellectual system, situational intellectually agent modeling.

Refs: 4 titles.

УДК 004.896

Temporal non-monotonic logical systems in the tasks of modeling complex dynamic object control systems

Vasilevskiy A. S., Lapshin K. V. IUS, 2010. N 2. P. 15–20.

The article discusses the possibility of using temporal non-monotonic logical systems, based on linear clock-faced temporal logic, in modeling complex dynamic object control systems that work under rigid real time conditions.

Keywords — temporal logic, tight real time, control system.

Refs: 3 titles.

УДК 621.396.06

Математическая модель эхо-сигналов морской поверхности, наблюдаемых бортовыми локаторами летательных аппаратов

Сесин А. Е., Шенета Д. А. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 21–25.

Предлагается математическая модель эхо-сигналов морской поверхности, наблюдаемых в строге дальности бортовых локаторов летательных аппаратов. Модель построена на основе экспериментальных данных, что позволяет моделировать работу бортовых комплексов летательных аппаратов в условиях, приближенных к натурным испытаниям.

Ключевые слова — математическая модель, корреляционная функция, локационный сигнал, морская поверхность.

Список лит.: 6 назв.

УДК 621.3

Программная параметрическая модель безрезьбовых отверстий

Аль-Джунейди Баджис зйяд, Лячек Ю. Т. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 26–30.

Проводится анализ процесса формирования отверстий на чертежах в соответствии со стандартами. Выделяются типы и виды их представления. Рассматривается программная параметрическая модель формирования изображений безрезьбовых отверстий на чертеже в соответствии с предложенным алгоритмом ее работы. Реализация модели выполнена на языке AutoLisp и подключается к системе AutoCAD.

Ключевые слова — параметрическая модель, отверстия, стандарты изображения, типы и виды отверстий, резьба, алгоритм.

Список лит.: 3 назв.

УДК 004.434

Автоматный метод определения проблемно-ориентированных языков (Часть 2)

Новиков Ф. А., Тихонова У. Н. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 31–37.

Описывается новый метод определения синтаксиса и семантики проблемно-ориентированных языков с помощью диаграмм классов и диаграмм автоматов. Во второй части статьи приводится используемая автоматная модель и рассматривается задание конкретного синтаксиса с помощью системы взаимодействующих автоматов на примерах языка описания шахматных позиций и мини-языка множеств.

Ключевые слова — проблемно-ориентированный язык, абстрактный синтаксис, метамодель, автоматное программирование.

Список лит.: 10 назв.

УДК 621.396.06

A mathematical model of sea surface echo — signals, received by onboard aircraft radars

Sesin A. E., Shpeta D. A. IUS, 2010. N 2. P. 21–25.

In this paper a mathematical model of the sea-surface echo-signals received in a range strobe of onboard radars receivers, is offered. The models are built using experimental data that approaches the results of mathematical modeling to the results gained from half-natural and natural tests of onboard complexes.

Keywords — mathematical model, correlation function, radar signal, sea surface.

Refs: 6 titles.

УДК 621.3

A parametrical program model of no-threading holes

Al-Dzhuneidi Badzhis Zaid, Lyachek Yu. T. IUS, 2010. N 2. P. 26–30.

An analysis of the process of holes formation on drafts, conforming to the standards, is given. Types and kinds of holes representation are defined. A programmed parametrical model of formation of images of holes without threading on drafts is considered. An algorithm of the model is offered. A realization of the model is done in the language AutoLisp and is connected to AutoCAD system.

Keywords — parametrical model, holes, standards of the image, types and kinds of holes, a threading, algorithm.

Refs: 3 titles.

УДК 004.434

An automata based method for domain specific languages definition

Novikov F. A., Tikhonova U. N. IUS, 2010. N 2. P. 31–37.

A new method for domain specific language definition is proposed. The method allows to define both syntax and semantics with class and state machine diagrams. In the second part a particular syntax definition through the automata system and define the automata model used is considered.

Keywords — domain specific language, abstract syntax, metamodel, automata based programming.

Refs: 10 titles.

УДК 004.021

Методы внедрения цифровых водяных знаков в потоковое видео. Обзор

Григорьян А. К., Аветисова Н. Г. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 38–45.

Дан обзор методов внедрения цифровых водяных знаков в потоковое видео, используемых российскими и зарубежными специалистами. Подробно описаны такие алгоритмы внедрения, как аддитивные алгоритмы, алгоритмы слияния, приведен пример использования консилограмм. Сделаны выводы об эффективности описанных алгоритмов.

Ключевые слова — аддитивные алгоритмы, цифровой водяной знак, потоковое видео, робастность, консилограммы, вейвлет-преобразование.

Список лит.: 13 назв.

УДК 621.391.01

Показатели качества разрешения радиолокационных сигналов

Акимцев В. В., Мецгерин А. Н. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 46–51.

Предложены показатели качества, учитывающие статистический характер задачи разрешения сигналов и позволяющие сравнивать различные алгоритмы разрешения между собой. Приводятся примеры их использования.

Ключевые слова — разрешение-обнаружение сигналов, полное разрешение сигналов, показатель качества.

Список лит.: 8 назв.

УДК 621.375

Шумовая температура антенного окна

Кордеро Л. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 52–54.

Решается задача оценки шумовой температуры антенного окна. Антенное окно рассматривается в виде круглого волновода с теплозащитой, находящегося в условиях высоких температур. Получено выражение для расчета шумовой температуры.

Ключевые слова — шумовая температура, антенное окно, круглый волновод, теплозащита, плазма.

Список лит.: 5 назв.

УДК 004.021

Some methods of digital watermarks video stream integration. A review

Grigoryan A. K., Avetisova N. G. IUS, 2010. N 2. P. 38–45.

This article represents the digital watermarks video stream integration methods used by Russian and foreign specialists. It contains a detailed description of the following algorithms: additive algorithms and fusion ones, as well as concealograms. In the conclusion, we made certain decisions about the effectiveness of the algorithms described.

Keywords — additive algorithms, digital watermarks, video stream, robustness, concealogram, wavelet transform.

Refs: 13 titles.

УДК 621.391.01

Quality indices of radar signals resolution

Akimtsev V. V., Mesherin A. N. IUS, 2010. N 2. P. 46–51.

Some quality indices, that take into account the statistical nature of the radar signals resolution problem and allow comparison of the different distance resolution algorithms, are suggested. Application examples of the quality indices are given.

Keywords — signal resolution and determination, full signal resolution, quality index.

Refs: 8 titles.

УДК 621.375

Noise temperature of the antenna window

Cordero L. IUS, 2010. N 2. P. 52–54.

The problem of estimating the noise temperatures of the antenna window is being solved. The antenna window is viewed as a round wave guide with a heat-shield, subjected to high temperature. A formula to calculate the noise temperature is given.

Keywords — noise temperature, antenna window, round wave guide, heat-shield, plasma.

Refs: 5 titles.

УДК 681.326.74

Автоматизированное проектирование устройств функционального диагностирования

Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 55–60.

Рассмотрено автоматизированное проектирование устройств функционального диагностирования линейных систем автоматического управления. Описан алгоритм синтеза устройств диагностирования, использующий только процедуры и операции линейной алгебры. Приведено программное обеспечение для расчета параметров устройств функционального диагностирования. Показаны результаты его тестирования.

Ключевые слова — автоматизированное проектирование, функциональное диагностирование, линейные системы автоматического управления, алгоритм синтеза, устройство функционального диагностирования, тестирование программ.

Список лит.: 6 назв.

УДК 551.46.08

Алгоритмизация начальных этапов процесса проектирования замкнутой системы управления «Природа-техногенника»

Сольнищев Р. И., Тревгода М. А. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 61–65.

Рассматривается начальный этап процесса проектирования замкнутой системы управления «Природа-техногенника». Приводится алгоритм моделирования работы системы управления с учетом влияния соседних источников загрязняющих веществ, метеорологических данных и трансграничного переноса.

Ключевые слова — система управления, моделирование, алгоритм, загрязняющие вещества.

Список лит.: 7 назв.

УДК 330.45

Управление интеграцией инновационных проектов в предметную область

Босов Д. Б. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 66–70.

Предложены модель и алгоритм решения задачи оптимизации многомерных параметрических рядов в интересах рациональной интеграции инновационных проектов в предметную область.

Ключевые слова — управление, инновационный проект, математическая модель, множество, вариант математической формализации, решение задачи.

Список лит.: 3 назв.

УДК 681.326.74

Automated design of functional diagnosing devices

Britov G. S., Mironovskiy L. A. IUS, 2010. N 2. P. 55–60.

The automated design of functional diagnosing devices of linear control systems is considered. The synthesis algorithm of the diagnosing devices, using only procedures and linear algebra operations is described. The software for calculation of parameters of functional devices diagnosing is developed. The results of its testing are shown.

Keywords — automated designing, functional diagnostic, linear control systems, synthesis algorithm, functional diagnosing device, program testing.

Refs: 6 titles.

УДК 551.46.08

Algorithmization of the initial stages of the design process of the closed control system «Nature-technogenics»

Solnitsev R. I., Trevгода M. A. IUS, 2010. N 2. P. 61–65.

The initial stage of the design process of the closed control system «Nature-technogenics» is described. An algorithm for control system simulation with regard to the influence of neighboring sources of pollutants, meteorological data and cross-border transport is discussed.

Keywords — control system, modeling, algorithm, contaminants

Refs: 7 titles.

УДК 330.45

Control of innovation projects integration in the object zone

Bosov D. B. IUS, 2010. N 2. P. 66–70.

We suggest a model and a scheme of solving the tasks of multidimensional parametric series regarding the rational integration of the innovation projects in the object zone.

Keywords — control, innovation project, control, innovation project mathematical model, multitude, variant of mathematical formalization, problem solution.

Refs: 3 titles.

УДК 681.326.3

Математические модели и алгоритмы сглаживания входных сигналов бортовых автоматизированных систем контроля

Кублановский В. Б., Кошелев С. В. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 71–74.

Предлагаются математическая модель и алгоритмы сглаживания входных информационных процессов, наблюдаемых в автоматизированных системах контроля бортовой аппаратуры летательных аппаратов. Модель основана на экспериментальных данных, а алгоритмы сглаживания построены с учетом ограниченных временных и аппаратных ресурсов реальных бортовых систем контроля.

Ключевые слова — математическая модель, информационный параметр, алгоритмы сглаживания, система контроля.

Список лит.: 6 назв.

УДК 621.833:628.517.2

Моделирование сил, вынуждающих вибрацию в опорах качения

Голубков В. А., Голубков А. В. Информационно-управляющие системы, 2010. № 2. С. 75–77.

Представлены аналитические выражения для расчета спектральных характеристик сил, вызывающих вибрацию в зависимости от дефектов элементов шарикоподшипников с учетом неоднородности физико-механических свойств материала.

Ключевые слова — вибрация, неоднородность, подшипник.

Список лит.: 2 назв.

УДК 681.326.3

Mathematical models and algorithms of smoothing the input signals of onboard automated control systems

Kublanovsky V. B., Koshelev S. V. IUS, 2010. N 2. P. 71–74.

A mathematical model and algorithms of smoothing the input information processes received by automated control systems of onboard aircraft equipment are offered. The model is based on experimental data, and smoothing algorithms are constructed taking into account the limited time and hardware resources of the real onboard control systems.

Keywords — mathematical model, information parameter, algorithms of smoothing, the monitoring system.

Refs: 6 titles.

УДК 621.833:628.517.2

Modeling the forces causing vibration in sliding supports

Golubkov V. A., Golubkov A. V. IUS, 2010. N 2. P. 75–77.

Some analytical expressions for the calculation of spectral characteristics of the forces causing vibration depending on defects of the elements of ball-bearings supports that take into account the heterogeneity of physicomachanical properties of the material are presented.

Keywords — vibration, heterogeneity, bearing.

Refs: 2 titles.