

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

5(42)/2009

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. Хименко,
доктор технических наук, профессор
А. А. Шальто,
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, 2009

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

- Тихонов Э. П.* Модифицированные алгоритмы и классификация аналого-цифровых преобразователей. Часть 3: Нейроподобные и другие варианты алгоритмов 2
Волков В. Ю., Турнецкий Л. С. Пороговая обработка для сегментации и выделения протяженных объектов на цифровых изображениях 10

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

- Шереметов Л. Б.* Децентрализованное управление адаптивными сетями поставок на основе теории коллективного интеллекта и агентной технологии. Часть 2: Многоагентная среда моделирования и оптимизации сетей поставок 14
Бритов Г. С., Лупал А. В. Вероятностный анализ состояний idеf3-моделей технологических процессов 21
Шмидт И. А., Кавалеров Б. В., Один К. А., Шигапов А. А. Сопряжение программных сред в задачах моделирования и тестирования систем управления энергетическими газотурбинными установками 25

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

- Ронжин А. Л., Карпов А. А., Кагиров И. А.* Особенности дистанционной записи и обработки речи в автоматах самообслуживания 32
Лебедев И. С. Построение шаблонов кода по текстам спецификаций 39
Бураков В. В. Управление качеством программных средств 43

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

- Койгеров А. С., Забузов С. А., Дмитриев В. Ф.* Исследование корреляционного метода для решения задачи антиколлизии для систем радиочастотной идентификации на ПАВ 48

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

- Свешников О. В.* Компенсация влияния переотражений от подстилающей поверхности при автосопровождении морских объектов под круглыми углами визирования 56
Мочалов В. А. Алгоритмы оценки надежности структуры сенсорной сети 61

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

- Безмен Г. В., Колесов Н. В.* Функциональное диагностирование линейных динамических систем с использованием нечеткого анализа 67

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

- Брейман А. Д., Зерний А. Ю., Казьмин Б. В.* Исследование проблем интеграции в распределенных системах унаследованных приложений с использованием асинхронного пи-исчисления 74

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ

- Алсынбаева Л. Г.* Об одном подходе к автоматизированной генерации тестовых заданий для контента инструктивного типа 79

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Небылов В. А.* Методы и средства оптимизации режима посадки морского летательного аппарата 84

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

- III Международный семинар по системам множественного доступа «МАСОМ-2010» 87

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- 88

АННОТАЦИИ

- 93

ЛР № 010292 от 18.08.98.
Сдано в набор 21.08.09. Подписано в печать 25.09.09. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 11,4. Уч.-изд. л. 13,8. Тираж 1000 экз. Заказ 676.

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 681.314

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ¹

Часть 3: Нейроподобные и другие варианты алгоритмов

Э. П. Тихонов,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Предложено аналитическое описание различных модификаций алгоритмов аналого-цифровых преобразователей, включая мажоритарный и нейроподобный принцип обработки информации, на базе которых выполнен сравнительный анализ их свойств, доведенных до численных результатов, и разработана классификационная схема аналого-цифровых преобразователей.

Ключевые слова — аналого-цифровой преобразователь, функция активации, квант, помеха, погрешность, нейронный алгоритм, измерение.

Алгоритмы (10) (см. ч. 2) используют индикаторную и знаковую функции сравнения входного сигнала с уравнивающей величиной. Возникают вопросы: можно ли применять другие виды функции сравнения, например такие, которые используются в нейронных сетях со специфическим названием «функции активации» [8], и сохранится ли при этом основное предназначение алгоритма для преобразования аналоговой величины в цифровой код, а если сохранится, то в каком виде? Уместен также вопрос о возникновении подобной ситуации в реальных АЦП.

Для поиска ответов на поставленные вопросы необходимо кратко ознакомиться с основными свойствами функций активации. Функции активации должны обладать монотонностью и дифференцируемостью в области определения, соответствующей интервалу (1, -1) либо (0, 1), — общими свойствами, присущими этим функциям.

По аналогии с биологическими нейронами наибольшее распространение в известных математических моделях нейронов получили следующие виды функции активации [8, 11]:

— экспоненциальные функции $\psi_s\{\gamma\} = \exp(-\gamma\alpha)$, $\alpha = \text{const}$;

— функция гиперболического тангенса $\psi_s\{\gamma\} = (\exp(\alpha\gamma) - \exp(-\alpha\gamma)) / (\exp(\alpha\gamma) + \exp(-\alpha\gamma))$;

— сигмоидные функции вида $\psi_s\{\gamma\} = (1 - \exp \times (-\alpha\gamma)) / (1 + \exp(-\alpha\gamma))$, в том числе используемые

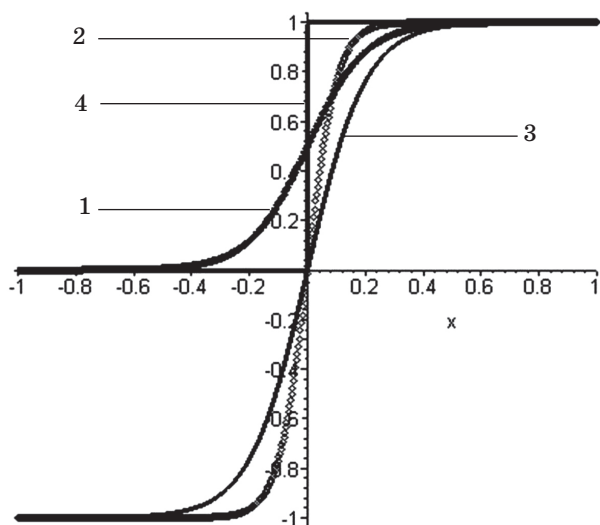
для описания идеальной функции сравнения — знаковые функции;

— несимметричные относительно нуля сигмоидные функции вида $\psi_h\{\gamma\} = 1 / (1 + \exp(-\alpha\gamma))$;

— для описания идеальной функции сравнения — индикаторные функции.

Переменная γ определяется разностью между уравнивающей величиной и входным сигналом, а параметр α характеризует степень «крутизны» функции активации. Чем больше значение параметра α , тем выше крутизна функции активации (рис. 12). Из анализа формул, описывающих функции активации, следует, что с увеличением параметра α соответствующие функции активации стремятся к знаковой или индикаторной функции. Идеальная реализация этих функций сравнения электронными техническими средствами в виде знаковой или индикаторной функции, какими бы они хорошими частотными характеристиками не обладали, практически невозможна. Именно поэтому в силу инерционности реальных сравнивающих устройств в них реализуются функции сравнения в той или иной степени близости к указанным функциям активации. При этом единица приписывается положительному, а ноль — отрицательному или нулевому значению функции сравнения. С этой точки зрения все рассмотренные выше алгоритмы аналого-цифрового преобразования с идеальными функциями сравнения (индикаторной или знаковой) являются предельным случаем алго-

¹ Окончание. Начало в № 1 и 2, 2009 г.



■ Рис. 12. Графики функций активации: 1 — сигмоидной; 2 — гиперболического тангенса; 3 — симметричной; 4 — индикаторной

ритмов аналого-цифрового преобразования с соответствующей функцией активации. Следует также иметь в виду степень влияния на результаты сравнения инерционности ключей, через которые подключаются в зависимости от веса разряда значения образцовой уравнивающей величины [12].

Для того чтобы установить связь между алгоритмами, имеющими разные виды функции сравнения, рассмотрим сначала алгоритм поразрядного уравнивания с функцией активации вида $\psi_h\{\gamma\}$, или кратко индикаторные нейронные алгоритмы

$$E[(n + 1)\Delta t] = E(n\Delta t) + E_0 2^{-n} \psi_h \times [x - E(n\Delta t) - E_0 2^{-n}], n = 1, \dots, N. \quad (11)$$

Представим функцию активации $\psi_h[\dots]$, описывающую операцию сравнения, в следующем эквивалентном виде:

$$\psi_h[x - E(n\Delta t) - E_0 2^{-n}] = \psi_h[x - E(n\Delta t) - E_0 2^{-n}] h\{\psi_h[x - E(n\Delta t) - E_0 2^{-n}]\}.$$

Тогда исходный алгоритм (11) можно переписать в форме

$$E[(n + 1)\Delta t] = E(n\Delta t) + E_0 \psi_h \times [x - E(n\Delta t) - E_0 2^{-n}] 2^{-n} h\{\psi_h[x - E(n\Delta t) - E_0 2^{-n}]\}, n = 1, \dots, N$$

или

$$E[(n + 1)\Delta t] = E(n\Delta t) + \Delta q \psi_h [x - E(n\Delta t) - E_0 2^{-n}] 2^{N-n} h\{\psi_h[x - E(n\Delta t) - E_0 2^{-n}]\}, n = 1, \dots, N.$$

Сравнение полученного выражения с исходным индикаторным алгоритмом поразрядного уравнивания показывает, что алгоритм (11) несколько меняет свои свойства, так как в зависимости от разности $\gamma_h(n\Delta t) = [x - E(n\Delta t) - E_0 2^{-n}]$ нелинейно меняется величина кванта Δq перед индикаторной функцией, причем изменение происходит от максимального значения Δq до нуля (см. рис. 12).

Для знакового алгоритма поразрядного уравнивания с функцией активации вида $\psi_s[x - E(n\Delta t)] = \gamma_s(n\Delta t)$, или кратко знакового нейронного алгоритма, имеем

$$E[(n + 1)\Delta t] = E(n\Delta t) + E_0 2^{-n} \psi_s [x - E(n\Delta t)], n = 1, \dots, N$$

или

$$E[(n + 1)\Delta t] = E(n\Delta t) + \Delta q(n) 2^{N-n} \text{sign} \times \{\psi_s [x - E(n\Delta t)]\}, n = 1, \dots, N, \quad (12)$$

где величина кванта меняется в соответствии с равенством

$$\Delta q(n) = \Delta q |\gamma_s(n\Delta t)|.$$

При этом возникает вопрос: как влияет это изменение кванта на результат преобразования? С учетом описанных выше свойств функции активации анализ алгоритмов (11) и (12) показывает, что входной сигнал x можно выразить через кодовый эквивалент результата преобразования для функции активации $\psi_h[x - E(n\Delta t) - E_0 2^{-n}]$:

$$x = \sum_{n=1}^N \Delta q(n) a_n 2^{N-n} + \gamma_h, \quad (13)$$

а для функции активации $\psi_s[[\gamma(n\Delta t) - E(n\Delta t)]]$ — в виде

$$x = 0,5 \left[1 - \sum_{n=1}^N \Delta q(n) a_n 2^{N-n} + \gamma_s \right], \quad (14)$$

где

$$\Delta q(n) = \begin{cases} \Delta q & \text{при } \phi_n(\theta) = 1 \\ \Delta q |\phi_n(\gamma)| & \text{при } \phi_n(\theta) < 1 \end{cases}$$

здесь

$$\phi_n(\gamma) = \begin{cases} \psi_h [x - E(n\Delta t) - E_0 2^{-n}] \\ \psi_s [x - E(n\Delta t)] \end{cases}$$

— величина кванта для индикаторной и знаковой функций активации; γ_h и γ_s — погрешности усечения соответственно для индикаторного и знакового нейронных алгоритмов (погрешность преобразования).

Таким образом, в отличие от индикаторных и знаковых алгоритмов поразрядного уравнивания, в которых результатом преобразования является двоичный код с постоянным значением кванта Δq , для алгоритмов (11) и (12) получаем результат преобразования с дробным значением кванта, зависящим от номера разряда. Величина кванта совместно с общим числом разрядов определяет диапазон преобразования и выполняет функцию масштабирования [13] относительно единичного диапазона преобразования. В рассматриваемом случае изменяющийся квант приводит к изменению масштаба от разряда к разряду, что и определяет механизм возникновения известных дифференциальной и интегральной нелинейностей в градуировочных характеристиках реальных АЦП. В этом случае для получения результата измерения входной величины необходимо запоминать для каждого разряда его значение кванта, или, что то же самое, значение масштаба. Если предположить, что эту операцию удастся выполнить, то вместо единицы на определенных двоичных разрядах придется запоминать при необходимости совсем другие числа, меньшие единицы.

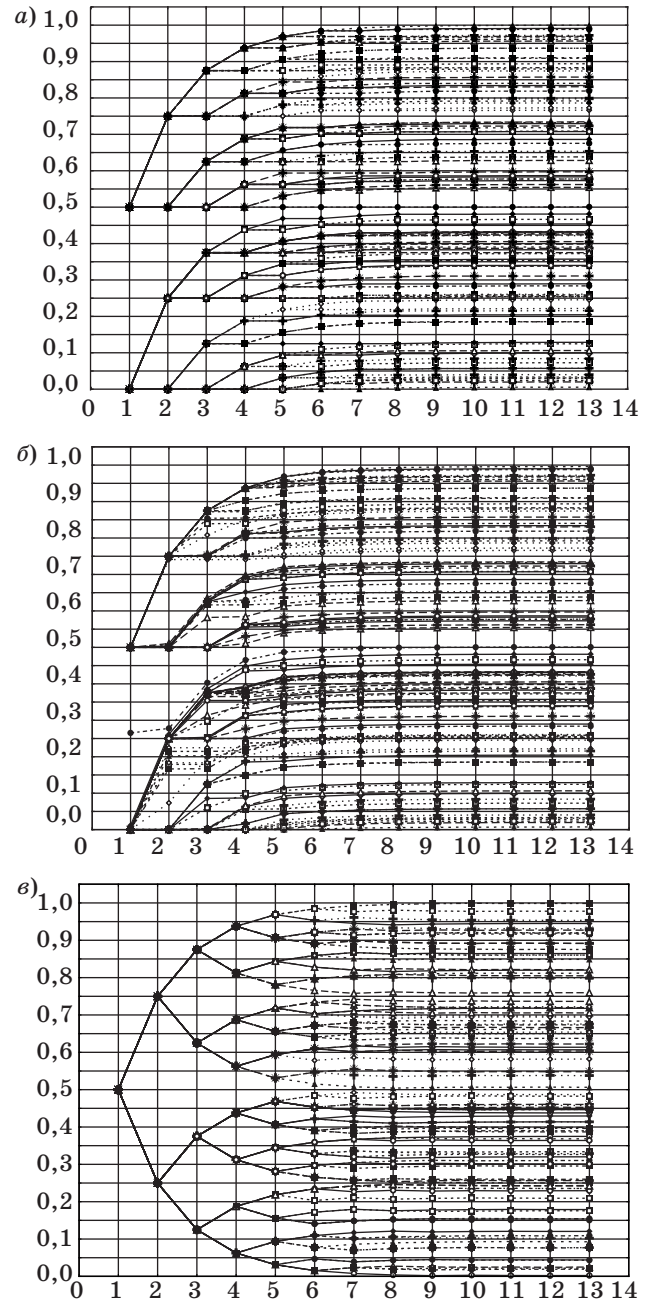
Отличие алгоритмов (10) и (11) от обычных алгоритмов поразрядного уравнивания хорошо заметно при сравнении графиков, описывающих динамику их работы в виде фрактальных структур при входном сигнале, случайно изменяющемся с равномерным законом распределения вероятностей (рис. 13, а–в).

Из анализа этих графиков следует, что при одинаковом числе разрядов уравнивания, отложенном на осях абсцисс, и независимо от отличия фрактальных структур для алгоритмов поразрядного уравнивания с различными функциями сравнения, конечные результаты для одного и того же значения входного сигнала совпадают с допустимой погрешностью. Оценка погрешности совпадения результатов сходимости требует отдельного анализа, для чего вычтем справа и слева значения сигнала и его эквивалентное представление при аналого-цифровом преобразовании обычными индикаторным и знаковым алгоритмами. В результате получим

$$0 = \Delta q \sum_{n=1}^N a_n 2^{N-n} + \gamma - \sum_{n=1}^N \Delta q(n) a_n^* 2^{N-n} - \gamma_h$$

и

$$0 = 0,5 \left[\left[1 - \Delta q \sum_{n=1}^N a_n 2^{N-n} - \gamma \right] - \left[1 - \sum_{n=1}^N \Delta q(n) a_n^* 2^{N-n} - \gamma_s \right] \right]$$



■ Рис. 13. Графики, характеризующие работу алгоритмов поразрядного уравнивания: а — индикаторного (в виде фрактальной структуры); б — с функцией активации $\psi\{\gamma\} = 1 / (1 + \exp(-\alpha\gamma))$ (в виде фрактальной структуры); в — знакового (в виде древовидной фрактальной структуры)

Поскольку $\Delta q(n) \leq \Delta q$, положим $\Delta q(n) = \alpha(n)\Delta q$, где $\alpha(n) \leq 1$, тогда для индикаторной функции сравнения получаем

$$\gamma_h - \gamma = \Delta q \sum_{n=1}^N [a_n - \alpha(n)a_n^*] 2^{N-n}.$$

■ Таблица 1

Вид алгоритма АЦП	Помеха отсутствует			Помеха Normal (ξ), $\xi = 0,01$		
	Параметр α	МО	СКО	Параметр α	МО	СКО
Индикаторный	–	$-5,8E-05$	$3,57E-05$	–	$-0,00051$	0,006803
Нейронный	100	$-0,00013$	0,000948	100	$5,29E-05$	0,00458
Индикаторный	–	$-6,1E-05$	$3,61E-05$	–	0,000268	0,006815
Нейронный	200	$-7,1E-05$	0,000394	200	$-0,00016$	0,004951
Индикаторный	–	$-6,2E-05$	$3,48E-05$	–	$-0,00027$	0,007071
Нейронный	400	$-6,1E-05$	0,000114	400	$-0,00011$	0,005341
Индикаторный	–	$-6,1E-05$	$3,53E-05$	–	$-0,0002$	0,00675
Нейронный	500	$-5,9E-05$	$8,38E-05$	500	0,000482	0,005758
Индикаторный	–	$-6E-05$	$3,45E-05$	–	$5,8E-06$	0,006674
Нейронный	600	$-6,2E-05$	$2,2E-05$	600	$9,11E-06$	0,005842
Индикаторный	–	$-6E-05$	$3,53E-05$	–	$-0,00027$	0,007071
Нейронный	700	$-6E-05$	$6,27E-05$	700	$-0,00015$	0,005731
Индикаторный	–	$-6,2E-05$,0000328	–	,0000283	,0063382
Нейронный	1000	$-6,1E-05$,0000350	1000	$-0,000263$,0067700

Значения коэффициентов a_n и a_n^* равны либо 0, либо 1, поэтому при одинаковых значениях этих коэффициентов разность $\gamma_h - \gamma > 0$. В остальных вариантах, как можно предположить, будут превалировать случаи, когда разность $a_n - \alpha(n)a_n^* < 0$, что подтверждается нижеприведенными результатами моделирования. Таким образом, в отсутствие помех нейронные алгоритмы существенно хуже по сравнению с обычными алгоритмами аналого-цифрового преобразования, так как в этом случае выполняются условия оптимальности дихотомического алгоритма поиска постоянной величины на ограниченном отрезке числовой оси. Иная картина должна наблюдаться при воздействии помехи.

Прежде чем продолжить некоторые теоретические выводы по оценке и интерпретации ре-

зультатов сходимости исследуемых алгоритмов, рассмотрим итоги их имитационного моделирования в отсутствие и при воздействии аддитивной помехи для анализируемых функций сравнения и различных значений параметра α установочных функций активации. В качестве входного постоянного сигнала, изменяющегося случайно от преобразования к преобразованию, использовались случайные числа с равномерным законом распределения вероятностей в диапазоне [0, 1], а для непрерывно изменяющегося сигнала — гармонический сигнал с единичной амплитудой. Значения математического ожидания (МО) и СКО погрешности результатов преобразования *индикаторным* и *нейронным индикаторным* (табл. 1), а также *знаковым* и *нейронным знаковым* (табл. 2) 14-разрядными алгоритмами преобразования

■ Таблица 2

Вид алгоритма АЦП	Помеха отсутствует			Помеха Normal (ξ), $\xi = 0,01$		
	Параметр α	МО	СКО	Параметр α	МО	СКО
Знаковый	–	$-1,8E-06$	$7,06E-05$	–	$-8E-05$	0,00697
Нейронный	100	$-0,0001$	0,000751	100	$-0,00017$	0,004726
Знаковый	–	$-3,1E-06$	$7,05E-05$	–	0,000186	0,007078
Нейронный	200	$-2,1E-05$	0,000264	200	$4,28E-05$	0,005084
Знаковый	–	$-3,2E-06$	$7,05E-05$	–	$-0,00042$	0,00704
Нейронный	400	$-3E-06$	0,00011	400	$-0,00013$	0,005485
Знаковый	–	$3,48E-06$	$7,18E-05$	–	$-0,00015$	0,007249
Нейронный	500	$-3,9E-06$	$6,71E-05$	500	$-0,00021$	0,005954
Знаковый	–	$-2,4E-06$	$6,91E-05$	–	0,000423	0,007267
Нейронный	600	$-1,9E-06$	$4,15E-05$	600	0,000318	0,006066
Знаковый	–	$-2,9E-06$	$7,2E-05$	–	$-0,00051$	0,007055
Нейронный	700	$-1,7E-06$	$4,31E-05$	700	$-0,00034$	0,005947
Знаковый	–	,000003	,0000710	–	,0004444	,0071644
Нейронный	1000	$-0,00002$,0000307	1000	,0003914	,0063740

при случайно изменяющемся с равномерным законом распределения вероятностей входном сигнале приведены для объемов выборки $N = 500$ и 1000 соответственно. Функция сравнения индикаторного нейронного алгоритма: для табл. 1 $\phi_h\{\gamma\} = 1 / (1 + \exp(-\alpha\gamma))$; для табл. 2 $\phi_s\{\gamma\} = (1 - \exp(-\alpha\gamma)) / (1 + \exp(-\alpha\gamma))$.

Анализ полученных результатов (см. табл. 1) позволяет в пределах статистической погрешности сделать следующие выводы.

1. В отсутствие помехи для постоянного сигнала:

- при определенных, меньших значениях параметра α характеристики погрешности (МО и СКО) для нейронного индикаторного алгоритма хуже, чем для обычного индикаторного алгоритма;

- с ростом параметра α , как следовало ожидать, характеристики погрешности обоих алгоритмов уравниваются.

2. При воздействии аддитивной гауссовой помехи:

- при определенных, меньших значениях параметра α характеристики погрешности для нейронного алгоритма лучше аналогичных характеристик обычного индикаторного алгоритма: по СКО — в 1,4 раза, а по среднему значению — в 9,6 раз;

- с ростом параметра α характеристики погрешности обоих алгоритмов несколько уравниваются, но преимущество для нейронного алгоритма сохраняется.

Анализ изменения основных характеристик погрешности преобразования для знаковой функции сравнения (см. табл. 2) в зависимости от изменения числа разрядов при фиксированном значении α показывает следующее.

1. В отсутствие помехи:

- при определенных меньших значениях параметра α среднее значение и СКО погрешности преобразования для нейронного алгоритма значительно хуже соответствующих значений характеристик погрешности, полученных для обычного знакового алгоритма;

- с ростом значения параметра α , влияющего на увеличение крутизны функции активации, при фиксированном числе разрядов характеристики погрешности у нейронного алгоритма ста-

новятся несколько лучше обычного знакового алгоритма.

2. При воздействии аддитивной гауссовой помехи соотношения между характеристиками погрешности сохраняются примерно такими же, как и для индикаторного алгоритма. При меньших значениях параметра α (за исключением первой позиции, для которой значение параметра слишком мало) нейронный знаковый алгоритм более помехоустойчив, однако по мере приближения функции активации (с ростом параметра α) к идеальной знаковой функции указанные характеристики погрешности уравниваются.

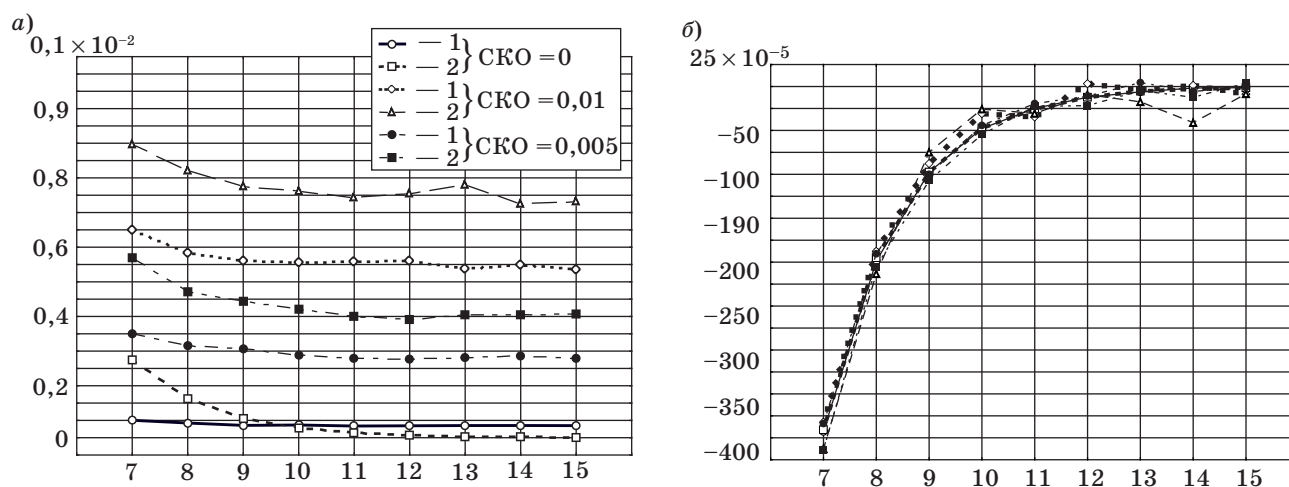
При преобразовании гармонического входного сигнала при фиксированной амплитуде и частоте характеристики погрешности преобразования имеют значения (табл. 3, столбец 1), существенно отличающиеся от аналогичных характеристик погрешностей при случайно изменяющейся амплитуде во всем диапазоне преобразования $[0, 1]$ и фиксированной частоте гармонического сигнала (табл. 3, столбец 2).

Для обоих нейронных алгоритмов установлено значение параметра $\alpha = 400$. Полученные результаты показывают, что при преобразовании непрерывно изменяющегося во времени входного сигнала, как и следовало ожидать, знаковые алгоритмы обладают лучшими следящими свойствами по сравнению с индикаторными алгоритмами.

Из анализа графиков (рис. 14, а, б) с учетом значений характеристик погрешностей следует, что наилучшим алгоритмом является нейронный знаковый алгоритм, который при заданных значениях параметра α и соответствующем числе разрядов имеет определенный выигрыш. Этот выигрыш, соответствующий помехоустойчивости алгоритма, можно оценить при фиксированных параметрах алгоритмов отношением соответствующих СКО погрешностей. Он находится в зависимости от алгоритма в пределах от 13 до 37 %, причем с уменьшением параметра α увеличивается незначительно (для $\alpha = 200$ имеем 14 и 39 % соответственно, тогда как для $\alpha = 800$ — 7 и 30 %). Отметим, что при воздействии гауссовой аддитивной помехи на входной сигнал указанная помехоустойчивость увеличивается и зависит от

■ Таблица 3

Алгоритм преобразования	Среднее значение		Среднеквадратическое отклонение	
	1	2	1	2
Нейронный знаковый	0	0,000056	0,02082	0,028639
Знаковый	0	-0,000172	0,02345	0,037050
Нейронный индикаторный	0,000244	-0,000014	0,02602	0,030773
Индикаторный	0,000244	-0,000023	0,02855	0,035069



■ Рис. 14. Изменение SKO (а) и средних значений (б) погрешности преобразования для индикаторного нейронного «1» (при $\alpha = 700$) и индикаторного «2» алгоритмов аналого-цифрового преобразования в отсутствие и при воздействии гауссовой аддитивной помехи в зависимости от изменения числа разрядов преобразования

уровня воздействия помехи. Если помеха по уровню превышает погрешность квантования примерно в 10 раз, то при $\alpha = 400$ помехоустойчивость составляет 18 и 36 % соответственно, причем с уменьшением уровня помех она понижается и в пределе достигает уровня, получаемого в отсутствие помехи.

Являются ли приведенные в статье результаты анализа посредством имитационного моделирования неожиданными с теоретической точки зрения? Прямой ответ на этот вопрос по итогам изучения существующей литературы не найти ввиду отсутствия рассмотрения в ней самих анализируемых алгоритмов. Однако достигнутые в последние десятилетия математиками результаты в области математической статистики, в частности в направлении исследования так называемой робастности в статистике [14] и в соответствующих приложениях [11], позволяют получить определенную, достаточно полную теоретическую интерпретацию численных результатов имитационного моделирования. Действительно, в работе [1] было показано, что алгоритмы аналого-цифрового преобразования минимизируют функцию качества, описывающую степень отклонения двоичного эквивалента входного сигнала от его точного значения. Причем в виде функции качества используется равномерная мера приближения входного сигнала к результату преобразования. При воздействии помехи выбранную функцию качества можно рассматривать как критерий приближения искомой оценки, т. е. двоичного кода сигнала, к истинному значению сигнала в условиях воздействия помехи в статистическом смысле [11]. Развитый в ра-

ботах по робастности в статистике подход [14] устанавливает, что любая оценка, минимизирующая указанный критерий, относится к так называемым М-оценкам. Для этих оценок в зависимости от вида плотности распределения вероятностей помехи существует такой критерий качества, для которого сходимость оценки (в нашем случае в виде двоичного кода) к действительному значению входного сигнала будет наилучшей. Теоретически оптимальная сходимость для М-оценок доказана в асимптотическом случае, т. е. когда число тактов преобразования стремится к бесконечности. Однако для практически применяемых оценок, ввиду монотонности убывания дисперсии оценки с ростом объема выборки, такое преимущество сохраняется для конечного объема выборки или для конечного числа тактов преобразования. В этих условиях знаковый и, следовательно, индикаторный алгоритмы при воздействии помехи на сигнал теряют свою оптимальность, тогда как функции активации оказываются близкими по виду к оптимальным критериям для М-оценок. При этом следует учесть, что в алгоритмах аналого-цифрового преобразования помимо гауссовой помехи имеется также случайная составляющая погрешности округления с равномерным законом распределения. В связи с этим оптимальный вид функции активации будет зависеть также от числа разрядов и определяться плотностью распределения вероятностей, равной суперпозиции плотности распределения вероятностей помехи с равномерной плотностью распределения вероятностей погрешности усечения. По мере увеличения числа разрядов при фиксированной мощности помехи плотность рас-

пределения вероятностей суммарной помехи будет сходиться к гауссовой плотности, а функции активации, рассмотренные выше, будут становиться оптимальными. Как отмечалось в ч. 2 статьи, в алгоритмах с нейронными функциями активации можно реализовать и мажоритарную обработку входного сигнала как по пространству, так и по времени.

При анализе алгоритмов до сих пор предусматривалось, что входной сигнал либо постоянный, либо его изменение во времени было незначительным по сравнению с временным тактом уравнивания Δt . Интересно проанализировать общий вариант, когда входной сигнал описывается моделью случайного стационарного процесса. Рассмотрим его применительно к следящему алгоритму со знаковой функцией сравнения. Для такого входного сигнала на результаты преобразования и сходимость алгоритма оказывает влияние соотношение между временным тактом уравнивания Δt и некоторой характеристикой случайного процесса, определяющей его динамические свойства. В качестве такой характеристики могут быть использованы либо интервал корреляции τ_k [15], либо верхняя граничная частота среза $\omega_{гп}$, либо ширина энергетического спектра сигнала $\Delta\omega$. Рассмотрим простейший предельный случай, когда $\Delta t \geq \tau_k$. Проанализируем условия сходимости в среднем следящего алгоритма

$$E[(n+1)\Delta t] = E(n\Delta t) + \Delta q \text{sign}[\xi(n\Delta t) - E(n\Delta t)], \quad (15)$$

где $\Delta t \geq \tau_k$; $\xi(t)$ — значения реализации входного стационарного эргодического процесса при $t = \Delta t n$.

Усредним правую и левую части алгоритма (15), тогда, с учетом неравенства $\Delta t \geq \tau_k$, получим

$$\bar{E}[(n+1)\Delta t] = \bar{E}(n\Delta t) + \Delta q \{1 - 2P[\bar{E}(n\Delta t)]\}, \quad (16)$$

где $P[\dots]$ — вероятность того, что знаковая функция принимает значение, равное -1 .

Для уравнения (16) сходимость при $n \rightarrow \infty$ достигается при равенстве

$$P[\bar{E}(n\Delta t)] = 0,5,$$

и

$$\bar{E}(n\Delta t) = P^{-1}[0,5],$$

т. е. для случая, когда уравнивающая величина равна медиане плотности распределения вероятностей, описывающей входной сигнал. Следовательно, для установленных условий выбора

Δt обеспечивается устойчивая сходимость алгоритма к медиане. Возникает вопрос, можно ли для указанных ограничений на величину Δt обеспечить сходимость не к медиане, а к некоторому заданному значению квантили распределения вероятности ξ . Оказывается, можно, если построить следящий алгоритм следующим образом:

$$E[(n+1)\Delta t] = E(n\Delta t) + \Delta q \text{sign}[\xi(n\Delta t) - E(n\Delta t) + |\beta|],$$

где $|\beta| < 1$ — заданная величина:

$$\bar{E}(n\Delta t) = P^{-1}[0,5] - |\beta|.$$

Более того, если в алгоритм (15) ввести некоторую образцовую случайную величину η с заданной функцией распределения вероятностей, то в результате получаем алгоритм для измерения функции распределения вероятностей при $\beta = \Delta\beta_j$, где $j = 1, 2, \dots, m$, в виде

$$E[(n+1)\Delta t] = E(n\Delta t) + \Delta q \{ \text{sign}[\xi(n\Delta t) - E(n\Delta t)] - \text{sign}[\eta(n\Delta t) - \beta] \},$$

где $\eta(n\Delta t)$ — образцовая случайная величина с известной функцией распределения вероятностей. Этот алгоритм был предложен [16] и исследован [17]. Он нашел практические приложения для решения достаточно важных задач как в промышленности [18], так и в других областях [19, 20], в частности при радиоизотопных измерениях.

В качестве уравнивающей можно выбрать любую физическую величину для преобразования ее в цифровой код. Представляет интерес, например, алгоритм вида

$$\begin{aligned} \tau[(n+1)\Delta t] &= \tau(n\Delta t) - \Delta\tau \{ \text{sign}[\xi(n\Delta t) + \alpha] - \\ &- \text{sign}[\xi(n\Delta t) - \alpha] - \text{sign}[\xi(n\Delta t) + \tau(n\Delta t)] + \beta \} + \\ &+ \text{sign}[\xi(n\Delta t) + \tau(n\Delta t)] - \beta \}, \end{aligned}$$

где $\xi(n\Delta t)$ и $\xi[(n\Delta t) + \tau(n\Delta t)]$ — коррелированные или статистически зависимые временные сечения стационарного (квазистационарного) или нестационарного с достаточно медленно меняющейся функцией распределения вероятности преобразуемого случайного процесса на n -м временном такте уравнивания; $\tau[(n+1)\Delta t]$ и $\tau(n\Delta t)$ — временные задержки между временными сечениями рассматриваемого случайного процесса на $(n+1)$ -м и n -м временных тактах уравнивания, причем $\tau_{\min} \leq \tau(n\Delta t) \leq \tau_{\max}$; $0 < \beta < \alpha < 1$ — заданные постоянные величины.

Для исследования сходимости рассматриваемого алгоритма по первому начальному моменту, т. е. сходимости в среднем, применим к правой и левой частям алгоритма оператор математического ожидания по случайной двумерной величине $\xi(n\Delta t)$ и $\xi[(n\Delta t) + \tau(n\Delta t)]$. В результате перейдем к рассмотрению алгоритма вида

$$\begin{aligned} \bar{\tau}[(n+1)\Delta t] = \\ = \bar{\tau}(n\Delta t) - \Delta\tau [P_{\xi_1}(\alpha) + P_{\xi_2}(\alpha) - P_{\xi_1\tau}(\beta) - P_{\xi_2\tau}(\beta)] \end{aligned}$$

или для симметричных функций распределения вероятности случайного процесса, например гауссовых:

$$\bar{\tau}[(n+1)\Delta t] = \bar{\tau}(n\Delta t) - 2\Delta\tau [P_{\xi}(\alpha) - P_{\xi\tau}(\beta)],$$

где

$$P_{\xi}(\alpha) = \int_{-\infty}^{\alpha} w[\xi(n\Delta t)] d\xi(n\Delta t)$$

и

$$P_{\xi\tau}(\beta) = M_{\xi(n\Delta t)} \times \left[\int_{-\infty}^{\beta} w \left[\frac{\xi[n\Delta t + \tau(n\Delta t)]}{\xi(n\Delta t)} \right] d\xi[n\Delta t + \tau(n\Delta t)] \right],$$

где $w[\xi(n\Delta t)]$ и $w[\xi[(n\Delta t) + \tau(n\Delta t)] / \xi(n\Delta t)]$ — соответственно безусловная и условная плотности распределения вероятностей в указанных временных сечениях случайного процесса; $M_{\xi(n\Delta t)}$ — оператор усреднения по случайной величине $\xi(n\Delta t)$.

Нижний предел интегрирования можно заметить на нижнее значение диапазона изменения случайного процесса, определяемого соответствующим техническим средством — датчиком.

Искомое значение временного сдвига определяется из равенства

$$\tau_0 = r^{-1} \left(\sqrt{1 - \frac{\beta}{\alpha}} \right),$$

где $r^{-1}(\dots)$ — функция, обратная нормированной корреляционной функции; τ_0 — искомая временная задержка между временными сечениями случайного процесса для заданных значений α и β .

Алгоритмы, связанные с измерением временной задержки сечений случайного процесса относительно друг друга, нашли широкое применение для решения некоторых задач в промышленности [21]. Преимущество рассматриваемого алгоритма заключается в простоте его реализации и в совмещении операции измерения с преобразованием в цифровой код. Возможны и другие варианты подобных алгоритмов.

Таким образом, в работе представлены и проанализированы математические модели в виде нелинейных отображений различных модифицированных алгоритмов аналого-цифрового преобразования. Результаты проведенных по данной тематике исследований на математических моделях, включая представленные ранее [см., например, 1, 5, 22], позволяют существенно расширить сферу поиска решения различных прикладных задач на основе использования нелинейных динамических алгоритмов.

Литература

11. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации. — М.: Наука. Физматлит, 1995. — 336 с.
12. Островерхов В. В. Динамические погрешности аналого-цифровых преобразователей. — Л.: Энергия, 1975. — 213 с.
13. Цветков Э. И. Основы математической метрологии. — СПб.: Политехника, 2005. — 510 с.
14. Хампель Ф., Рончетти Э., Рауссеу П., Штаэль В. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 512 с.
15. Мирский Г. Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. — М.: Энергоиздат, 1982. — 320 с.
16. А. с. 235412, Кл. 42m⁴, 7/52, МПК G 06g / Устройство для измерения функции распределения случайных сигналов / Э. П. Тихонов.
17. Тихонов Э. П. Измерения с опорным случайным процессом // Метрология. 1985. № 10. С. 20–29.
18. Тихонов Э. П., Селиванова М. П. Основные принципы, области применения и перспективы развития измерений с опорным случайным процессом // Измерения, контроль, автоматизация. 1990. № 3. С. 3–6.
19. Тихонов Э. П. Алгоритмы обработки сигналов в медицинской диагностике с использованием опорного случайного процесса // Информационно-управляющие системы. 2003. № 4. С. 43–51.
20. А. с. SU 1783304 A1, СССР, МКИ G 01 №47 / Расходомер двухфазных сред / Э. П. Тихонов, М. П. Селиванова.
21. Белоглазов Н. Н., Тарасенко В. П. Корреляционно-экстремальные системы. — М.: Сов. радио, 1974. — 392 с.
22. Тихонов Э. П. Стохастический пространственный аналого-цифровой преобразователь и его связь с нейронными структурами // Информационно-управляющие системы. 2007. № 1. С. 8–18.

УДК 621.397:621.396.96

ПОРОГОВАЯ ОБРАБОТКА ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ И ВЫДЕЛЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

В. Ю. Волков,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича**А. С. Турнецкий,**

канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент

ОАО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

Исследуется задача установки порога бинарного квантования для сегментации и выделения объектов на цифровых изображениях. Рассматривается структура цифровой обработки, включающая предварительную фильтрацию, пороговую обработку и логическую фильтрацию. Предложен новый метод динамической установки и регулировки порогового уровня, который основан на анализе изолированных фрагментов, выделенных на изображении в процессе сегментации. Предложенный метод позволяет оптимизировать решение задачи сегментации объектов на цифровых изображениях на фоне гауссова шума.

Ключевые слова — фильтрация, сегментация, выделение объектов, эрозия элементов, порог бинарного квантования.

Введение

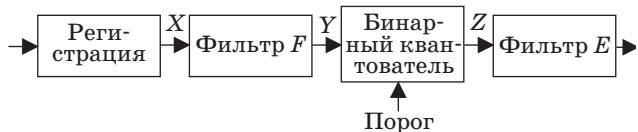
Сегментация представляет разделение изображения (оптикоэлектронных или радиолокационных) на отдельные области, в частности, выделение на сложном фоне объектов интереса, имеющих требуемые свойства [1–3]. Во многих случаях полезные объекты на изображениях являются протяженными, и сегментация может использовать это свойство. Данную идею авторы статьи развивают на основе исследования обработки оптикоэлектронных изображений и предлагают новый метод для выделения именно протяженных объектов интереса неизвестного размера на фоне множества зашумляющих изображение локальных яркостных фрагментов, имеющих случайные местоположение и форму и меньшую протяженность, чем объекты интереса.

Общая структура цифровой обработки изображений включает предварительную фильтрацию, бинарное квантование и последующую логическую обработку. Целью статьи является исследование влияния порогового уровня на результаты сегментации и разработка метода для автоматической установки и изменения порога бинарного

квантования. Задача автоматической установки порога в автономных информационно-управляющих системах очень важна для сегментации, выделения и распознавания полезных объектов на фоне помех [2]. Хорошо известные методы установки глобальных и локальных порогов обычно используют гистограммы или локальные свойства точки на изображении. Предлагаемый метод для вычисления порога использует результаты сегментации. Этот метод применим для установки как глобального порога, так и локального порога в скользящем окне.

Структура цифровой обработки изображений и предварительная фильтрация

Общая структура цифровой обработки для сегментации и выделения объектов на изображениях (рис. 1) содержит после формирования изображения на входном преобразователе предварительную фильтрацию (фильтр F), пороговую обработку (бинарное квантование) и обработку бинарного изображения (фильтр E). Исходное изображение X после регистрации представляется двумерным массивом на прямоугольной сетке точек.



■ Рис. 1. Общая структура цифровой обработки изображений

Предварительная фильтрация имеет целью улучшение изображения и подчеркивание перепадов и границ. В данном случае применяются дифференцирующие фильтры, которые позволяют затем использовать глобальный порог для бинарного квантования изображения.

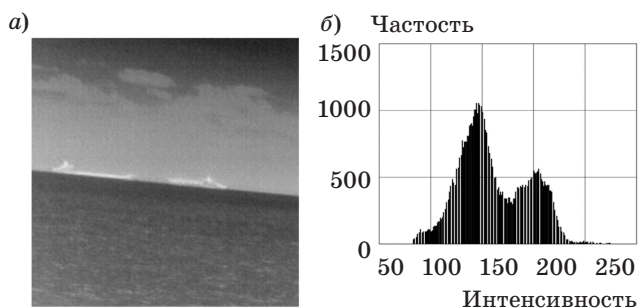
Исследовались два типа фильтров, которые использовали скользящее окно размером 9×9 :

$$y_{i,j}^A = x_{i,j} - A_{i,j}; \quad y_{i,j}^M = x_{i,j} - M_{i,j}.$$

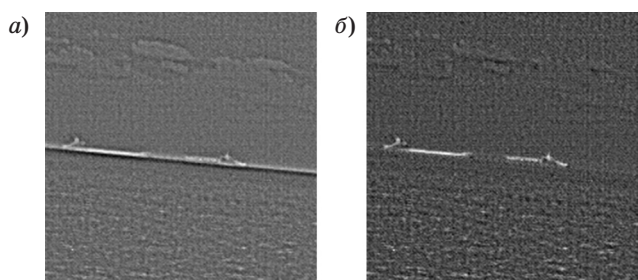
Первый фильтр — стандартный линейный лапласиан, где $A_{i,j} = (1/N) \sum_{k \in S'_{i,j}} x_k$ — выборочное среднее в окне. Второй фильтр — нелинейный, он использует выборочную медиану $M_{i,j} = \text{med}(x_k)_{k \in S'_{i,j}}$

вместо выборочного среднего. Здесь k представляет пару координат вокруг точки (i, j) , а область $S'_{i,j}$ не содержит центрального элемента (i, j) .

На примере реального изображения морской сцены (рис. 2, а), полученного с выхода инфракрасной системы наблюдения, приводятся результаты исследования (рис. 2, б). Предваритель-



■ Рис. 2. Исходное изображение морской сцены (а) и его гистограмма интенсивности (б)



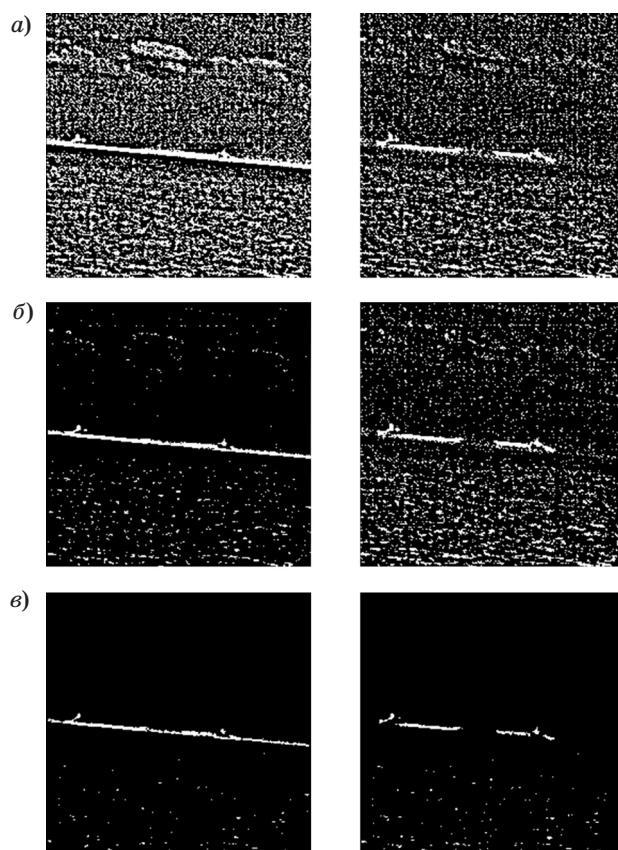
■ Рис. 3. Результаты предварительной фильтрации изображений для двух типов фильтров: а — с выборочным средним; б — с выборочной медианой

ная фильтрация позволяет сделать изображения однородными (рис. 3, а, б). Гистограммы концентрируются около нулевого уровня. Для визуализации изображений использовались соответствующие преобразования сдвига и масштаба. Хорошо заметно, что использование выборочной медианы приводит к подавлению протяженных границ, в частности, линии горизонта. Этот эффект может быть использован для построения комбинированной обработки изображений.

Пороговая обработка

Бинарное квантование представляет весьма ответственный этап обработки изображений, поскольку может привести к необратимым потерям информации. Предположим, что объекты на изображении светлые, тогда квантование дает высокий уровень (белое) при превышении порога в данной точке и низкий уровень (черное) в противном случае. Влияние уровня квантования на данные изображения иллюстрирует рис. 4, а—в.

Слишком низкий порог квантования приводит к трудностям сегментации, поскольку мно-



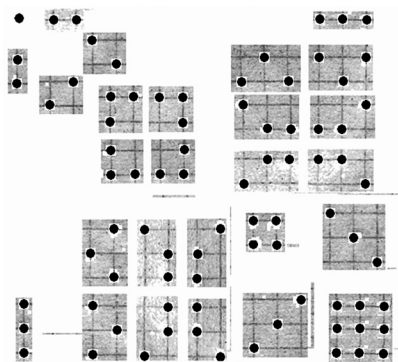
■ Рис. 4. Результаты бинарного квантования для скользящего окна 9×9 : низкий (а), промежуточный (б) и высокий (в) уровни квантования; слева — фильтр с выборочным средним, справа — с выборочной медианой

гие объекты сливаются, полезные объекты и помехи практически не различаются по протяженности. С увеличением уровня квантования на изображении начинают проявляться различия в протяженностях для разных объектов. Слишком высокий уровень квантования изображений может привести к разрушению полезных объектов, которые «раскалываются» на мелкие фрагменты и теряют свои информационные части.

Иерархия изолированных фрагментов на изображении и их сегментация

Наилучший порог бинарного квантования дает максимальные отличия в протяженностях полезных объектов и помех. Это позволяет осуществить эффективную сегментацию и выделение полезных объектов на фоне помех с учетом их формы и протяженности.

Основная идея установки и регулирования порога квантования для эффективного выделения полезных объектов на фоне помех связана с учетом результатов сегментации. Для этого предлагается иерархия изолированных фрагментов, которые образуются на квантованном изображении, по их форме и размерам. Протяженные свойства изолированного фрагмента можно характеризовать минимальной прямоугольной маской, которая полностью его покрывает. Изолированные точки (пиксели) характеризуются маской 1×1 , изолированные пары точек могут иметь характеристическую маску 1×2 , 2×1 или 2×2 в зависимости от их ориентации. Маска 2×2 может также характеризовать уголки из трех точек. Более крупные фрагменты из трех точек имеют маски 2×3 и 3×2 . Линии из трех точек могут иметь маски 1×3 , 3×1 или 3×3 в зависимости от ориентации. Предлагаемая иерархия фрагментов иллюстрируется на рис. 5 для масок с максимальным размером 3×3 (показаны не все фрагменты, а только с малым числом точек (до трех), чтобы пояснить принцип иерархии).

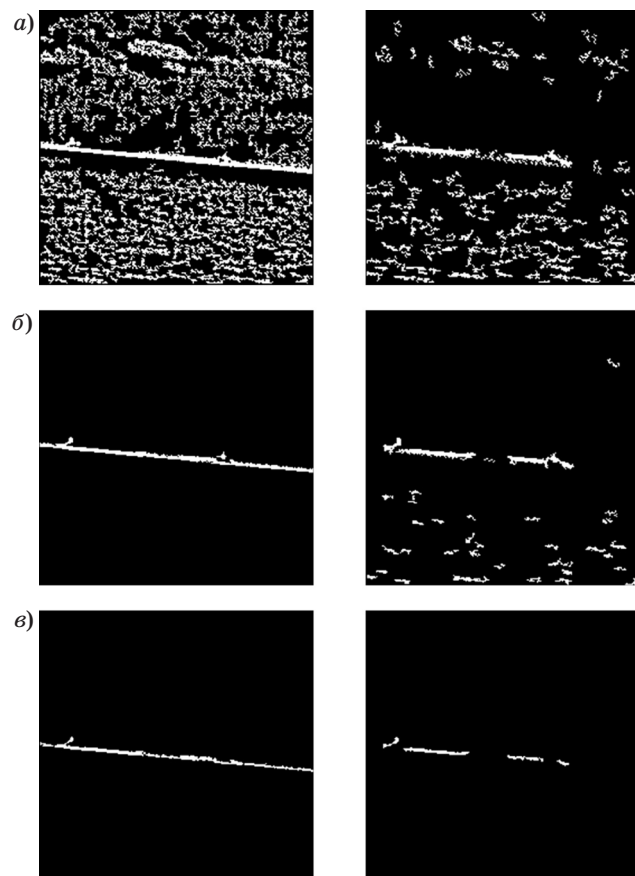


■ Рис. 5. Иерархия мелких изолированных фрагментов на изображении

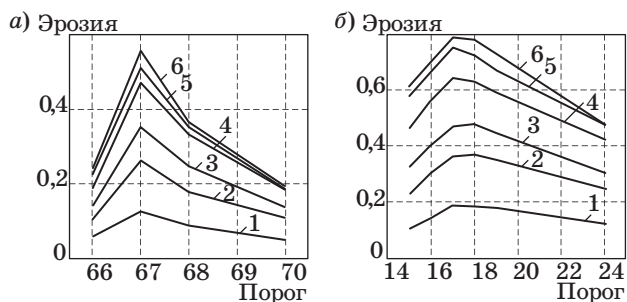
Простейшая иерархия фрагментов не учитывает их ориентацию и использует только квадратные характеристические маски 1×1 , 2×2 , 3×3 и т. д.

Метод сегментации изображения состоит в последовательном выделении мелких изолированных фрагментов, начиная с изолированных точек, и удалении (эрозии) их из изображения. На первом шаге удаляются изолированные точки, на втором — изолированные фрагменты с характеристической маской 2×2 , затем — изолированные фрагменты с маской 3×3 и т. д. В данном исследовании применялась эрозия всех изолированных фрагментов изображения, имеющих максимальный размер до маски 9×9 (рис. 6).

Число точек, удаленных из изображения на каждом шаге эрозии, является полезным индикатором для установки и изменения порога бинарного квантования. Эти значения зависят от величины порога квантования. Будем считать, что в случае превышения порога бинарного квантования на выходе получается яркая точка.



■ Рис. 6. Результаты выделения протяженных объектов путем эрозии мелких изолированных фрагментов изображения: низкий (а), промежуточный (б) и высокий (в) порог квантования; слева — фильтр с выборочным средним, справа — с выборочной медианой



■ **Рис. 7.** Эффективность эрозии для характеристических масок (1 — 1×1 ; 2 — 2×2 ; 3 — 3×3 ; 4 — 5×5 ; 5 — 7×7 ; 6 — 9×9) в зависимости от значения порога квантования: а — фильтр с выборочным средним; б — фильтр с выборочной медианой

Пусть после бинарного квантования изображение содержит некоторое количество таких ярких точек. Исходное число точек NIP (number of initial points) зависит от величины порогового уровня. Эти точки распределяются по изолированным фрагментам изображения. Можно составить распределение числа точек по изолированным фрагментам, тогда число исходных изолированных одиночных точек будет NIP_1 , число точек в изолированных фрагментах с маской 2×2 (изолированные пары и уголки из трех точек) — NIP_2 , в изолированных фрагментах с маской 3×3 — NIP_3 и т. д. Поскольку числа точек в изолированных фрагментах изображения зависят от порога квантования, то необходимо произвести нормировку и рассматривать относительные значения NIP_1/NIP , NIP_2/NIP , NIP_3/NIP и т. д. Эти значения можно рассматривать как эффективность эрозии квантованного изображения на соответствующем шаге эрозии.

Зависимости компьютерных испытаний эффективности эрозии от значения порога квантования для приведенных выше реальных изображений представлены на рис. 7, а, б.

Кривые имеют максимумы, концентрирующиеся для разных характеристических масок вблизи одного значения порога квантования и для каждого используемого типа фильтра предварительной обработки в скользящем окне. Это позволяет для конкретного текущего качества изображения и типа наблюдаемой сцены (сюжета) для одной из характеристических масок определить соответствующее типу предварительной обработки наилучшее значение порога квантования с точки зрения эффективности эрозии (удаления из изображения) мелких изолированных объектов (помеховых) на изображениях и выявления протяженных объектов, представляющих интерес. При этом для текущего обрабатываемого изображения в дальнейшем не требуется на каждом

шаге эрозии производить заново адаптивную точную настройку значения порога квантования, что значительно сокращает время обработки изображения. Таким образом, наилучший порог квантования может быть оперативно автоматически установлен по максимуму эффективности эрозии на изображениях помеховых изолированных фрагментов различных типов (размера и формы) при изменении содержания наблюдаемой сцены.

Заключение

1. Предложен метод сегментации на изображениях протяженных объектов, представляющих интерес, включающий в качестве логической фильтрации пошаговое последовательное удаление (эрозию) на квантованном изображении мелких изолированных, различных по размерам и форме типов помеховых фрагментов с помощью набора характеристических масок различной формы и размера.

2. Введена эффективность эрозии как относительное число удаляемых точек на каждом шаге обработки. Показано, что для каждого из двух рассмотренных типов фильтров предварительной обработки в скользящем окне (с выборочным средним и выборочной медианой) этот показатель имеет максимум при некотором значении порога квантования для применявшихся характеристических масок.

3. Предложен новый метод установки и регулировки порога бинарного квантования изображения с учетом результатов эрозии изолированных фрагментов. Наилучший порог квантования соответствует максимальной величине эффективности эрозии изолированных объектов для данного типа фильтра предварительной обработки в скользящем окне. Метод опробован на серии изображений морских сцен и показал хорошие практические результаты в тех случаях, когда требовалось выделить протяженные объекты на фоне помех различного вида.

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2005. — 1072 с.
2. Weszka J., Rosenfeld A. Threshold evaluation Techniques // IEEE Trans. SMC-8. 1978. P. 622–629.
3. Волков В. Ю., Макаренко А. А., Рогачев В. А., Турецкий Л. С. Анализ характеристик и цифровая обработка тепловых дискретизированных изображений // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Тр. 10-й Междунар. конф. / ИПУ РАН. Вып. X. Т. 2. М., 2008. С. 485–488.

УДК 62-519

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ АДАПТИВНЫМИ СЕТЯМИ ПОСТАВОК НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ КОЛЛЕКТИВНОГО ИНТЕЛЛЕКТА И АГЕНТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ¹ Часть 2: Многоагентная среда моделирования и оптимизации сетей поставок

Л. Б. Шереметов,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

Описана среда моделирования сети поставок как динамической, гибкой и самонастраивающейся системы автономных агентов. Экспериментальный комплекс выполнен на основе агентной платформы CAPNET. Приведены результаты экспериментов.

Ключевые слова — сети поставок, многоагентная система, теория коллективного интеллекта, стимулированное обучение.

Агентная модель сети поставок

Агентное моделирование — это новый подход к имитационному моделированию систем, содержащих автономных и взаимодействующих агентов [1]. Агентная модель сети поставок была реализована в целях проверки разработанных алгоритмов динамической оптимизации АСП в многоагентной среде моделирования и оптимизации сети поставок [2]. Эта среда позволяет моделировать сложные динамические взаимодействия между партнерами АСП, неопределенность заказов, а также проверять и, при необходимости, модифицировать конфигурацию сети, оптимизируя ее поведение. Среда может быть использована для улучшения процесса ПР в пределах широкой области задач в различных сценариях сети поставок. Хотя среда ориентируется больше на решение задач операционного типа, она также может быть использована в категориях стратегических и тактических задач. Так, в процессе экспериментов показано, как результаты имитационного моделирования могут быть использованы для конфигурации АСП, основанной на производственном анализе. С другой стороны, алгоритм динамической оптимизации хорошо подходит

для принятия решений в моделях «точно в срок» (*just-in-time manufacturing*).

Элементы модели

В модели рассматриваются следующие потоки управления АСП: верхний (закупка), внутренний (производство, сборка) и нижний (распределение). Каждый эшелон сети имеет параллельные производственные и сборочные единицы и буферы ограниченной емкости. При этом моделируются три типа участников. Во-первых, агенты-поставщики (SA), которые несут ответственность за поставку деталей другим участникам, но ни от кого их не принимают. Поставщики моделируются как склады, генерирующие потоки сырья. При этом предполагается, что всегда имеется в наличии достаточное количество исходных материалов, которые генерируются по запросу. Второй тип — агенты-производители (PA), которые являются промежуточными участниками в сети поставок (производственные и сборочные единицы). Они занимаются как размещением заказов (у участников сети предыдущего эшелона), так и доставкой заказов (участникам следующего эшелона). Входные буферы находятся перед каждым операционным элементом; производимые продукты транспортируются между всеми

¹ Окончание. Начало в № 4, 2009 г.

узлами сети. Существует очень важное отличие между РА: в случае агентов сборки несколько входных буферов (один для каждого компонента) должны располагаться перед агентом (см. ч. 1, рис. 2). Без потери общности, в данном случае мы рассматриваем только продукты, состоящие максимум из двух частей, элемент сборки, таким образом, будет иметь два входных буфера. Также для простоты мы рассматриваем линейную схему АСП, однако локализация ПР на уровне агента, взаимодействующего только со своими соседями, делает алгоритм прозрачным для любой структуры сети АСП — необходима только соответствующая конфигурация множества «знакомств» каждого агента (агентов, с которыми он взаимодействует).

Каждый РА имеет доступ к спецификациям материалов (Bill of Materials — BOM), которые могут быть получены от системы планирования ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning — ERP) в момент, когда выполнено соединение с системой планирования материальных ресурсов (Material Resource Planning — MRP), реализованной на Excel [3]. Excel-файл содержит таблицы продаж продуктов и компонентов, а также спецификации заказов на поставку, наряду с результатами расчетов показателей производительности, характеризующих эффективность управления заказами, доставкой, запасами и использования ресурсов [2].

Наконец, заказчики (дистрибьюторы или розничные торговцы) размещают заказы и выполняют доставку вместо изготовления. Важно отметить, что имитационная модель позволяет учитывать заказы с разными сроками выполнения (производство точно в срок).

Организация процесса агентного моделирования

Имитация — это процесс «выполнения» агентной модели через дискретные изменения состояния во времени. С целью их синхронизации к многоагентной системе добавлен агент-планировщик (SCHА). На этапе размещения заказов каждый заказчик генерирует заказы на любой из моделируемых продуктов. Фактически, для моделирования этой фазы заказчик моделируется агентом-«заглушкой», ассоциируемым с соответствующим складом готовой продукции (DWA), который динамически генерирует заказы, используя алгоритмы прогнозирования [4]. Как только заказ сгенерирован, он размещается на соответствующем РА внутреннего потока АСП. Агенты-производители, в свою очередь, решая, какие компоненты должны быть доставлены, размещают заказы среди агентов-поставщиков.

Во время фазы размещения заказа динамически определяется лучший маршрут с учетом доступной производственной мощности партнеров АСП, которая хранится в Q-таблицах. Этот маршрут используется в дальнейшем при моделировании производственных процессов.

Имитационное моделирование начинается, когда SCHА передает сообщение *startup* всей системе. Получая этот сигнал, агенты выполняют задачи внутренней инициализации, в основном относящиеся к инициализации Q-таблиц и переменным, которые используются Q-алгоритмами. Агент DWA загружает списки технологических процессов и заказов, которые должны быть выполнены. Сначала он вызывает модель прогнозирования, чтобы определить производственную программу. Как только программа сгенерирована, посылает исходный список заказов SCHА, при этом сроки выполнения заказов не моделируются явно. Вместо этого фактическая моделируемая дата выполнения заказа сравнивается со сроком платежа. Те заказы, сроки платежа которых вышли, заносятся в список запоздалых заказов. Продукты наследуют приоритет заказов, которые связаны со сроками платежа.

Поток материалов инициируется поставщиками, которые генерируют сырье в соответствии с полученными заказами на поставку. Затем РА берут необходимое им сырье со складов, чтобы изготовить продукты, согласно перечню материалов. Сырье, промежуточные и конечные продукты физически не существуют — они моделируются как информационные объекты, передаваемые по АСП. Информация, касающаяся каждого из них, передается путем обмена сообщениями между SA и РА. Сырье становится окончательным продуктом после обработки в АСП. Вначале этот объект создается с ассоциированным вектором операций, который уменьшается на каждом этапе до тех пор, пока не обнулится и пока окончательный продукт не окажется на соответствующем складе.

Начало операции над продуктом из внутренней очереди РА происходит по сигналу SCHА. Когда операция закончится, агент несет ответственность за маршрутизацию продукта к следующему элементу сети, где инициируются два следующих события: запрос соседа на добавление промежуточного продукта и запрос SCHА на добавление нового события для того, чтобы соответствующий агент проверил свой буфер на наличие очереди заказов. Также существует пинг-операция, которая удостоверяет, что выбранный агент до сих пор жив. В противном случае будет выбрана вторая лучшая альтернатива и соответствующий РА будет уведомлен о том, что он должен поставить продукт в очередь для дальней-

шей обработки. Вследствие этого Q-таблицы изменяются, так как новый продукт добавляется между текущим агентом и его соседом.

В процессе этапа инициализации РА запрашивают локальную службу каталогов своей агентной платформы с целью получить списки партнеров со следующего эшелона АСП, создавая таким образом локальную таблицу соседних агентов. Также РА запрашивает соседей (находящихся в следующем эшелоне) об их способностях и доступной производственной мощности. Эта информация используется для того, чтобы инициализировать Q-таблицы. Обратное распространение данных к предыдущему эшелону осуществляется после того, как РА ставит продукт в очередь. Этот механизм помогает убедиться в том, что каждый агент обладает информацией для оптимизации маршрута продукта. Q-алгоритмы встроены в тело РА. Это приводит к обновлению информации, предназначенной для оптимизации процесса принятия решений по выбору наилучшего маршрута для каждого эшелона.

Нужно отметить, что DWA работает частично как РА по следующей причине: DWA хранит Q-таблицу для принятия решений о том, куда отсылать заказ после его генерации. Если РА обнаруживает, что обработанный продукт больше не содержит операций, он извещает DWA. В свою очередь, этот агент корректирует число складированных экземпляров данного продукта и сравнивает время производства со сроком платежа.

Различные виды событий, в курсе которых должны быть агенты, кодируются в сообщения, например такие, как «выпуск сырья», «отчет о конечной продукции» и «продукт покидает буфер агента». Структура сообщений между РА и SA немного отличается от диалогов с SCHA. Последние являются только извещениями о событиях, передаваемыми от одной группы агентов к другой, в целях моделирования. РА и SA, в свою очередь, осуществляют запросы на операции, используя протокол взаимодействия FIPA-request. Каждый запрошенный РА отвечает на запрос значением расчетного времени окончания операции.

Агенты распределены по контейнерам CAPNET в соответствии с эшелонами, которому они принадлежат. Контейнер упрощает работу, так как является мостом для экспериментирования с распределенным размещением агентов. Существует вариант физического соединения отдаленных компьютеров, который воспроизводит реальную структуру АСП. Другими словами, многоагентная система может иметь двойное приложение: для моделирования различных конфигураций и, при необходимости, для управления реальной АСП.

Контрольный пример агентного моделирования АСП

Нами преследуются три основные цели:

1) показать способность алгоритма двойной Q-маршрутизации к обучению среде и к глобальной оптимизации;

2) сравнить, как локально принятые партнерами АСП оптимальные решения в «эгоистичной» манере и в согласованной манере (следуя алгоритму двойной Q-маршрутизации) влияют на параметры глобальной АСП;

3) показать типичный пример того, как результаты моделирования могут быть использованы для принятия управленческих решений, интегрирующих оптимизацию как макро-, так и микроуровней.

Для того чтобы проверить аргументированность предлагаемого подхода, была создана имитационная модель для простой пятиэшелонной сети поставок и проверена для сценария распределения производственной мощности. Модель выполнена в среде агентного параллельного моделирования с использованием агентной платформы CAPNET и имитатора Netlogo для визуализации результатов [5, 6].

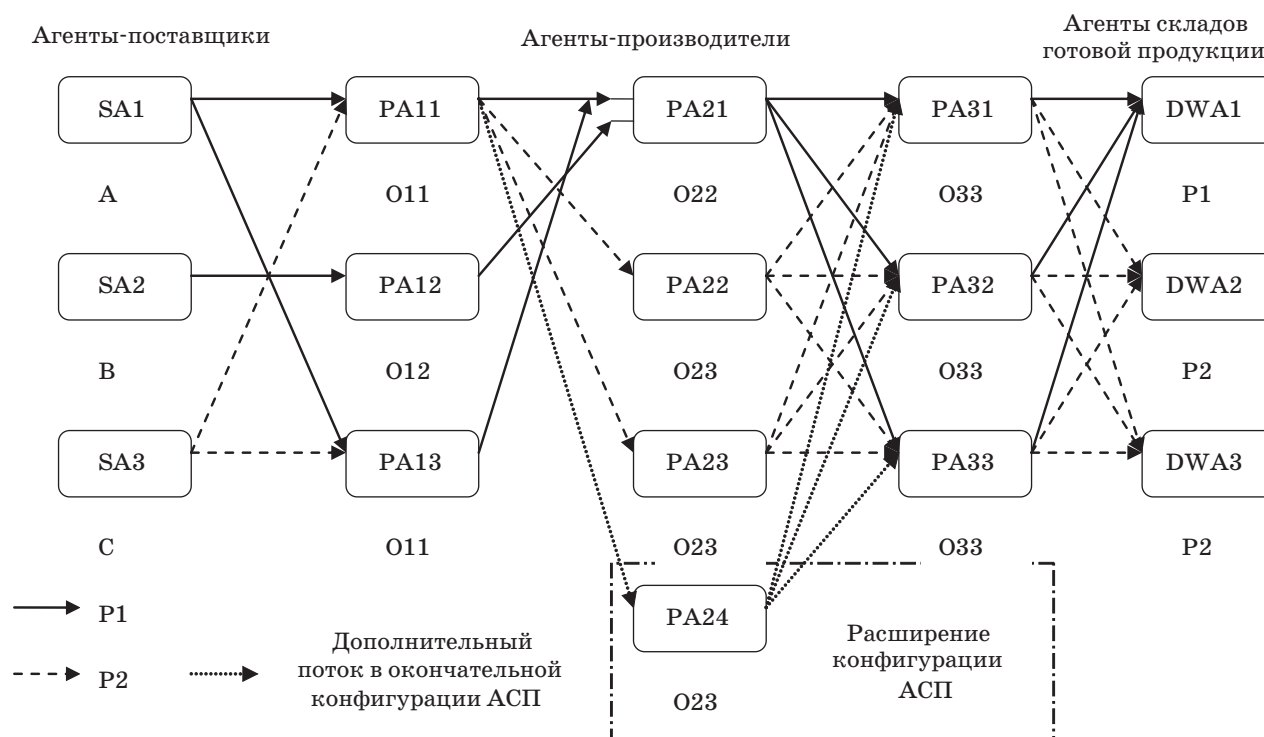
Полагаем, что задачи макроуровня сводятся к минимизации цен в сети поставок (оптимизация уровня запасов рассматривается как координация уровней запасов, а оптимизация уровня производственной мощности — как координирование уровней производства партнеров АСП). С другой стороны, оптимизация микроуровня связана с целями партнеров АСП при наличии ограничений, установленных решением макроуровня (уровнями производственных мощностей и приоритетами производства). В частности, задачей исследования конкретного примера было получение квазиоптимальных уровней производственной мощности эшелона с применением разработанного алгоритма двойной Q-маршрутизации с регулировкой параметров.

■ Таблица 1

Тип сырья	Продукт	Поставщик	Количество
A	P1	SA1	600
B	P1	SA2	1200
C	P2	SA3	1000

■ Таблица 2

Продукт	Технологический процесс	Прогноз заказов на неделю
P1	$((AO_{11} + BO_{12})O_{22})O_{33}$	600
P2	$((CO_{11})O_{23})O_{33}$	1000



■ **Рис. 1.** Потоксовая модель продуктов (P1, P2) для исследовательского примера

В примере рассматривается динамическая оптимизация потока как заказов, так и производства для двух конечных продуктов и трех видов сырья согласно перечню материалов (табл. 1). Спецификация продуктов P1 и P2 определяет технологический процесс их изготовления (табл. 2): каждая единица продукта P1 состоит из одной единицы сырья А (после операции обработки O11) и двух единиц сырья В (после операции обработки O12). Эти компоненты собираются (операция O22) и затем обрабатываются (O33). Каждая единица продукта P2 состоит из операций обработки O11, O23 и O33 над сырьем С. Поставщики SA1, SA2 и SA3 поставляют сырье А, В и С соответственно (рис. 1). Наконец, мы моделируем трех заказчиков (представленных агентами DWA1—

DWA3), которые генерируют заказы динамически в течение первого дня недели таким образом, что DWA1 заказывает/складирует продукты P1, в то время как DWA2 и DWA3 заказывают/складируют продукт P2. При базовой конфигурации каждая операция имеет продолжительность в соответствии с табл. 3. Для упрощения будем считать, что время переходного процесса равно одной единице времени, и оценивать время ожидания динамически по длине очереди.

Реализация алгоритма двойной Q-маршрутизации в агентной модели сети поставок

Сначала рассмотрим основные фазы алгоритма двойной Q-маршрутизации, который позволяет агенту динамически приспосабливать свои решения к текущему состоянию системы. Каждый раз, когда нужно выбрать лучшее решение (лучшего поставщика, лучшую операцию технологического процесса, лучший склад готовой продукции и т. д.), его ищут в Q-таблицах. Инициализацию Q-значений каждого агента в АСП иллюстрирует рис. 2, а, б. ΔQ вычисляется по формуле Q-обучения. Значения весов, обозначенных на линиях, связывающих агента с соседями, представляют логическую цену выбора действия, связанного с данным партнером. При первой итерации алгоритма Q-значение является этой логиче-

■ **Таблица 3**

Агент	Операция	Продолжительность, усл. ед. времени
PA11	O11	3
PA12	O12	1
PA13	O11	1
PA21	O22	1
PA22	O23	5
PA23	O23	2
PA31	O33	1
PA32	O33	9
PA33	O33	6

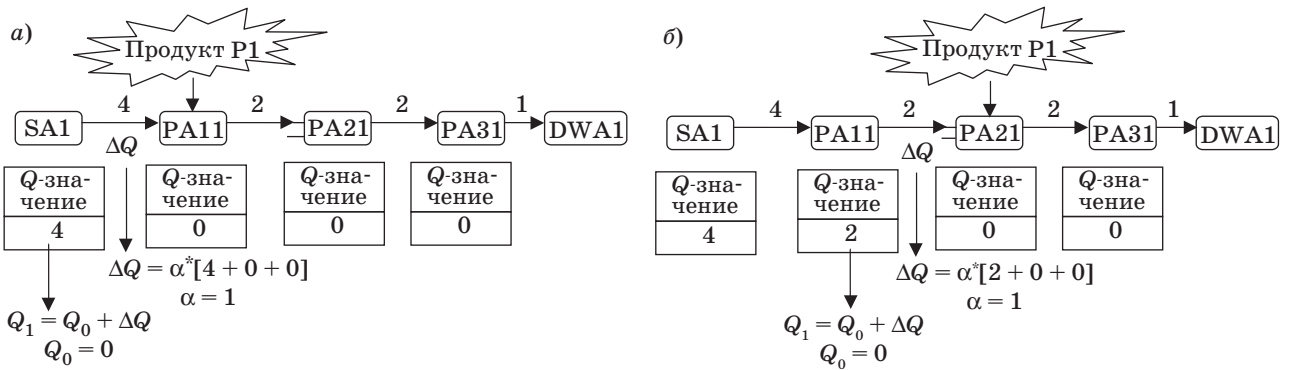


Рис. 2. Алгоритм двойной Q-маршрутизации: инициализация Q-таблиц для первой (а) и второй (б) операций над продуктом P1

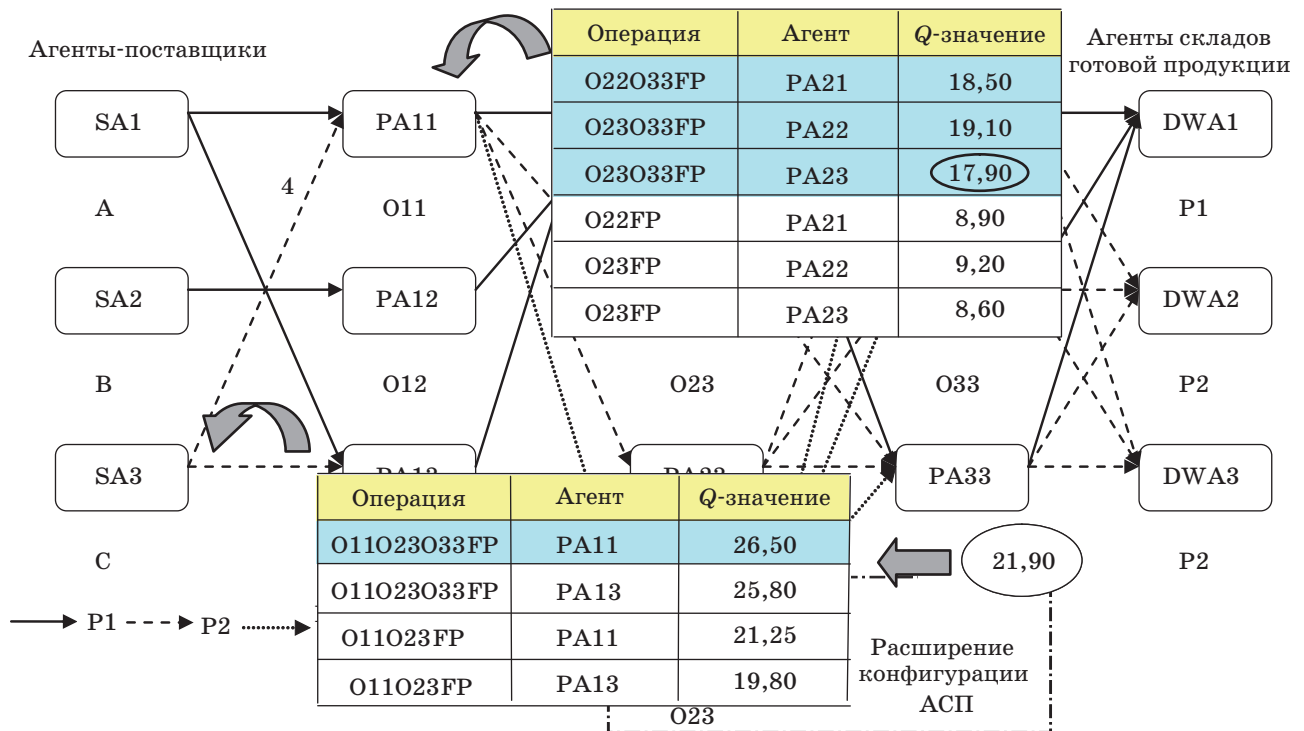


Рис. 3. Алгоритм планирования двойной Q-маршрутизации

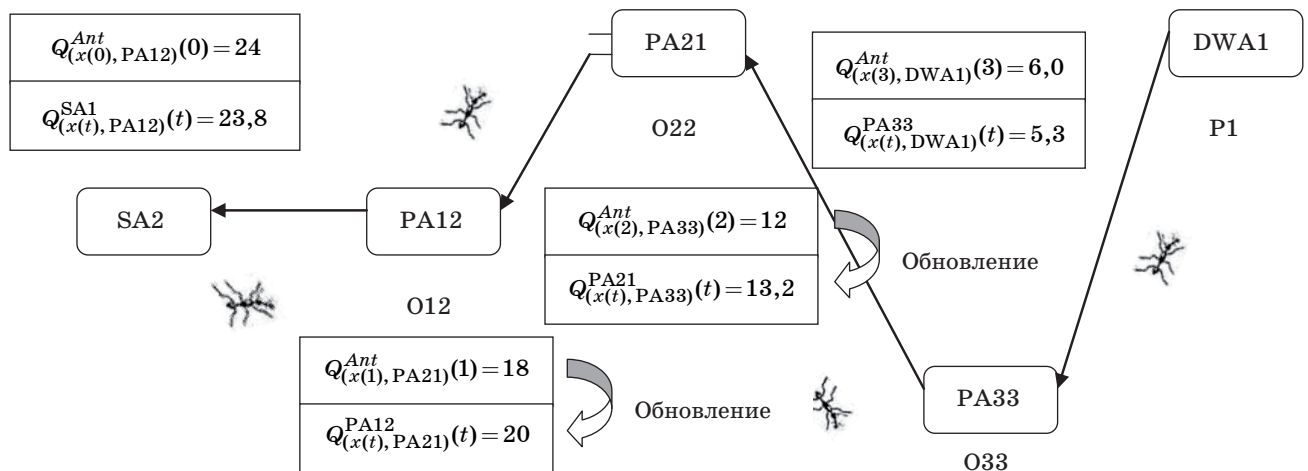


Рис. 4. Алгоритм «муравья» двойной Q-маршрутизации

ской ценой (ожидаемая операция и время переходного процесса). Как только система вовлекается в операцию, выполняется алгоритм планирования, представляющий собой упреждающую часть предложенного подхода. При его использовании нет необходимости получения обратной связи от среды: каждый партнер АСП, представляемый агентом, строит локальное внутреннее состояние среды. Во время выполнения алгоритма выбирается наилучшая альтернатива (маршрут PA11—PA23) с минимальным Q -значением 17,90 (рис. 3). Q -значения модифицируются посредством сообщений обновления. В то же время Q -значение агента SA3 по отношению к PA11 должно быть изменено на основании этого минимума и логической цены операции (равной 4): 21,90 вместо 26,50. Наконец, на рис. 4 изображен алгоритм «муравья». Основная цель каждого «муравья» — как можно быстрее сообщить плохие и хорошие новости об изменениях в среде АСП. Как показано, агенты PA12 и PA21 должны обновить свои соответствующие Q -значения, основанные на сообщении от «муравья». Эти значения представляют реальное состояние АСП в момент, когда последний образец продукта P1 был доставлен на склад.

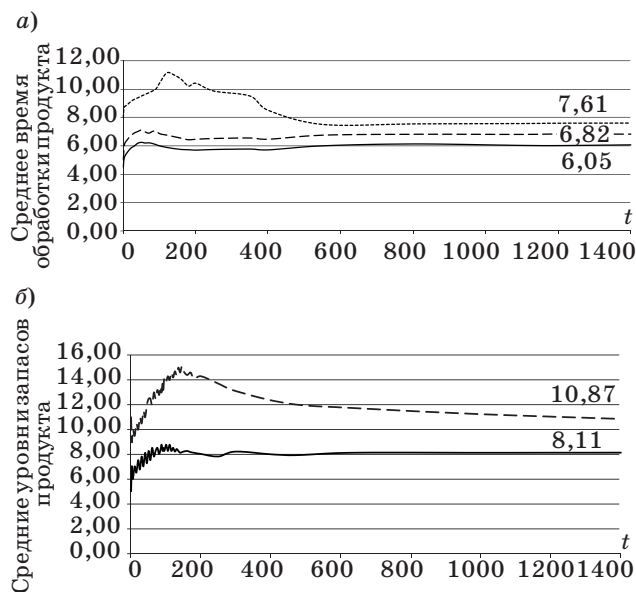
Описание результатов экспериментов по конфигурированию АСП

Экспериментальные результаты показаны в таблице продаж продуктов (табл. 4). Полные циклы обычного имитационного прогона получены с использованием различных алгоритмов (рис. 5). Среднее время между размещением заказа и доставкой готового продукта показано на рис. 5, а. Сначала был использован традиционный алгоритм Q -маршрутизации. Так как моделирование начинается с нулевых уровней Q -таблиц (что означает абсолютно неизвестную среду), процесс перехода занимает время, равное производству первых 100 продуктов для среднего срока изготовления и примерно 300 продуктов для уровней запасов.

Агенты, использующие алгоритм Q -маршрутизации, с целью оптимизировать свои функции локальной полезности принимают решения «эго-

■ Таблица 4

Продукт	Прогон модели	Количество	
		Прогноз	Произведено
P1	1	600	599
P1	2	600	600
P2	1	1000	870
P2	2	1000	999



■ Рис. 5. Среднее время обработки (а) и средние уровни запасов (б) продукта: — алгоритм Q -маршрутизации (кратчайшего пути) в исходной конфигурации АСП; ----- — алгоритм двойной Q -маршрутизации в исходной конфигурации АСП; ————— — алгоритм двойной Q -маршрутизации в окончательной конфигурации АСП

истичным» образом, что моделирует ситуацию управления индивидуальными предприятиями без знания действий других участников сети. Это приводит к высоким уровням запасов и сопровождается понижением функции глобальной полезности. Для исходной конфигурации АСП (см. рис. 1) алгоритм двойной Q -маршрутизации показывает лучшую производительность по сравнению с алгоритмом Q -маршрутизации, понижая средний срок изготовления на 10 % (см. рис. 5, а). Это становится возможным из-за того, что агенты принимают решения, учитывая производительность не только на локальном уровне, но и во всей АСП. В результате производительность сценария улучшается благодаря адаптации к изменениям в среде АСП.

Второй вид экспериментов основывается на результатах, полученных во время имитационных прогонов с использованием алгоритма двойной Q -маршрутизации. Согласно анализу результатов, полученных во время первого прогона, мы можем прийти к заключению, что исходная модель не является оптимальной из-за длительности операции O23, которая приводит к высокой утилизации агентов PA22 и PA23. Конфигурация конечной АСП была получена модификацией исходной структуры, которая заключалась в добавлении агента PA24, что позволило избежать «узкого» места, обнаруженного в исходной структуре.

По сравнению с конфигурацией исходной АСП срок изготовления уменьшен на 13 % (см. рис. 5, а). Модель также рационализирует уровни запасов продуктов, стараясь максимально обеспечить равные уровни запасов по каждому продукту (рис. 5, б). В примере уровни запасов снижены почти на 25 %.

Наконец, были проведены тесты по масштабируемости модели. Для данного примера производство 1600 продуктов заняло примерно полчаса моделирования, проходящего в режиме клиент-сервер, столько же для АСП, состоящей из 25 агентов. Позже промоделирована конфигурация с 5 эшелонами по 10 элементов в каждом примерно за 1 час. Следует учитывать, что основная часть времени расходуется на запись параметров моделирования для последующего воспроизведения динамики производственного процесса в Netlogo. Вместе с тем это время можно в значительной мере уменьшить в распределенном режиме, который является естественным для агентной технологии.

Заключение

В данной статье задача динамической оптимизации поведения АСП сформулирована в рамках теории КОИН. Наиболее важные результаты работы, составляющие научную новизну, включают:

1. Модель децентрализованного управления, разработанную в рамках теории КОИН и реализованную на основе алгоритма коллективного обучения для адаптации локального поведения каждого партнера АСП к глобальной цели, в ка-

честве которого разработан алгоритм двойной Q-маршрутизации.

2. Многоагентную среду моделирования и оптимизации сети поставок, реализующую эту модель.

3. Конкретный пример реконфигурации АСП в целях получения квазиоптимальных уровней производственной мощности эшелонов сети, разработанный в данной среде моделирования.

Разработанная модель была реализована в среде агентного моделирования на основе платформы CAPNET. В случае ее встраивания в информационную инфраструктуру предприятия алгоритмы, проверенные в модельной среде, могут быть использованы в практических приложениях.

В будущих исследованиях запланированы эксперименты с переменными объемами производства (для моделирования производственных систем с независимыми/зависимыми производственными программами) и отказами оборудования с тем, чтобы оценить влияние решений по конфигурации АСП в различных производственных условиях. Хотя сегодня нет результатов этих экспериментов, уже можно сделать вывод, что задачи управления АСП в условиях неопределенной среды и гибких связей между партнерами хорошо подходят для применения теории КОИН. Алгоритмы коллективного обучения, примером которых является разработанный алгоритм двойной Q-маршрутизации, станут одной из основных задач, которые необходимо решить, чтобы прийти к децентрализованному автономному принятию решений в альянсных сетях поставок и заказов (Supply/Demand Alliance Networks).

Литература

1. Contreras M., German E., Chi M., Sheremetov L. Design and implementation of a FIPA compliant Agent Platform in NET // J. of Object Technology. Zurich: ETH, 2004. Vol. 3. N 9. P. 5–28.
2. Борщев А. От системной динамики и традиционного ИМ — к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты. — СПб.: СПбГПУ, 2004. — 26 с. www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf
3. Sheremetov L., Rocha L., Batyrshin I. Towards a Multi-agent Dynamic Supply Chain Simulator for Analysis and Decision Support // Proc. of the NAFIPS-05 Annual Conf.: Soft Computing for Real World Applications. Ann Arbor, Michigan: IEEE Computer Society Press, 2005.
4. Production-scheduling Excel Toolbox. <http://www.production-scheduling.com/index.asp>
5. Batyrshin I., Sheremetov L. Perception Based Time Series Data Mining with MAP Transform / Ed. A. Gelbukh, A. Albornoz, H. Terashima-Marin // MICA I 2005: Advances in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer Verlag, 2005. Vol. 3789. P. 514–523.
6. Powell W. B., Shapiro J. A., Simão H. P. An Adaptive Dynamic Programming Algorithm for the Heterogeneous Resource Allocation Problem // Transportation Science. 2002. Vol. 36. N 2. P. 231–249.

УДК 681.324(031)

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЙ IDEF3-МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Г. С. Бритов,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

А. В. Лупал,

главный специалист

ЗАО «Компания ТрансТелеКом»

Приводится один из подходов к исследованию технологических моделей бизнес-процессов, основанных на вероятностном анализе отказов связей между единицами работы и позволяющих рассчитать вероятности различных состояний технологического процесса и вычислить время исправной работы системы.

Ключевые слова — бизнес-процесс, вероятность, граф, марковский процесс, надежность, перекресток, рекуррентные уравнения, состояние, узкие места.

Под технологическим моделированием бизнес-процессов понимается процесс создания сценариев и описания последовательности операций для каждого бизнес-процесса [1, 2]. Для разработки сценариев бизнес-процессов предназначена методология IDEF3, которая успешно реализована на базе CASE-средства BPWin.

Стандарт IDEF3 был создан для описания последовательностей и логики взаимодействия операций и событий в анализируемой системе. IDEF3 обеспечивает аналитика методологией структурированного подхода и графическим языком для наглядного представления с необходимой степенью детализации знаний об очередности событий и действий описываемого бизнес-процесса.

Для описания процесса в IDEF3 определены две стратегии и, соответственно, два типа диаграмм [1]:

1) *proceSS-centered Strategy* — стратегия описания процесса как последовательности выполняемых действий. Диаграммы этого типа получили название *ProceSS FloW DeScription Dia-gramS (PFDD)* — диаграммы потокового описания процесса;

2) *object-centered Strategy* — стратегия описания процесса как последовательности изменений состояний объекта, над которым выполняются действия. Диаграммы такого типа получили название *Object State TranSition NetWork (OSTN)* — диаграммы последовательности изменений состояний объекта.

Описание процесса в IDEF3 может содержать диаграммы какого-либо одного или обоих типов.

Для того чтобы обеспечить аналитика инструментом, описывающим возможные ветвления и параллельность выполнения ряда действий в описываемом процессе, в диаграмме PFDD технологической модели используются перекрестки. Перекрестки усиливают описание временных отношений и отношений очередности выполнения различных частей процесса. Они применяются для отображения логики взаимодействия стрелок при слиянии и разветвлении или для отображения множества событий, которые могут или должны быть завершены перед началом следующей работы.

Использование перекрестков позволяет в технологической модели анализировать «узкие места», отрицательно влияющие на эффективность деятельности и определяющие надежность процесса.

На основе анализа PFDD-диаграммы можно разработать OSTN-диаграмму (диаграмму состояний объекта), которая представляет собой граф переходов состояний технологического процесса (ТП) в зависимости от внешних факторов [3].

Используя OSTN-диаграммы, можно проводить вероятностный анализ соответствующих процессов [4], который заключается в расчете вероятности исправной работы системы и вероятности достижения того или иного критического состояния при заданных вероятностях отказов ее

элементов. Для примера рассмотрим ТП, состоящий из трех работ и одного перекрестка с *O*-разветвлением. PFDD-диаграмма этого процесса показана на рис. 1.

В этом технологическом процессе могут происходить следующие события:

- C_1 — не срабатывает (отказ) верхняя связь перекрестка, вероятность такого события p_1 ;
- C_2 — противоположное событие, когда верхняя связь исправна, вероятность такого события $(1 - p_1)$;
- C_3 — не срабатывает (отказ) нижняя связь перекрестка, вероятность такого события p_2 ;
- C_4 — противоположное событие, когда нижняя связь исправна, вероятность такого события $(1 - p_2)$;
- C_5 — не срабатывают (отказ) обе связи перекрестка одновременно, вероятность такого события $p_1 p_2$;
- C_6 — событие, когда обе связи исправны, вероятность такого события $(1 - p_1)(1 - p_2)$.

Возможны четыре состояния рассматриваемого ТП, определяемые тем, как происходят указанные события:

- S_1 — перекресток работает правильно, так как происходят события C_2 , C_4 и C_6 и, следовательно, выполняются все три работы W_1 , W_2 , W_3 ;
- S_2 — перекресток работает неправильно, так как происходят события C_1 и C_4 и, следовательно, выполняются только две работы W_1 , W_3 , а W_2 — нет;
- S_3 — перекресток работает неправильно, так как происходят события C_2 и C_3 и, следовательно, выполняются только две работы W_1 , W_2 , а W_3 — нет;

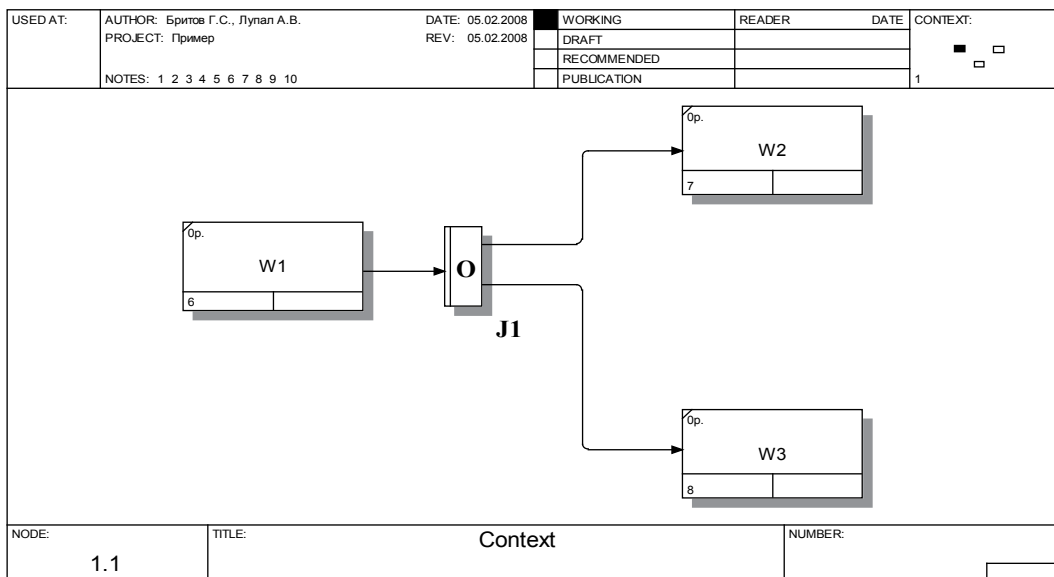
- S_4 — перекресток работает неправильно, так как происходит событие C_5 и, следовательно, выполняется только одна работа W_1 , а W_2 и W_3 — нет.

Состояния S_2 , S_3 и S_4 являются проблемными, так как характеризуют неполноценное выполнение ТП. OSTN-диаграмма процесса показана на рис. 2.

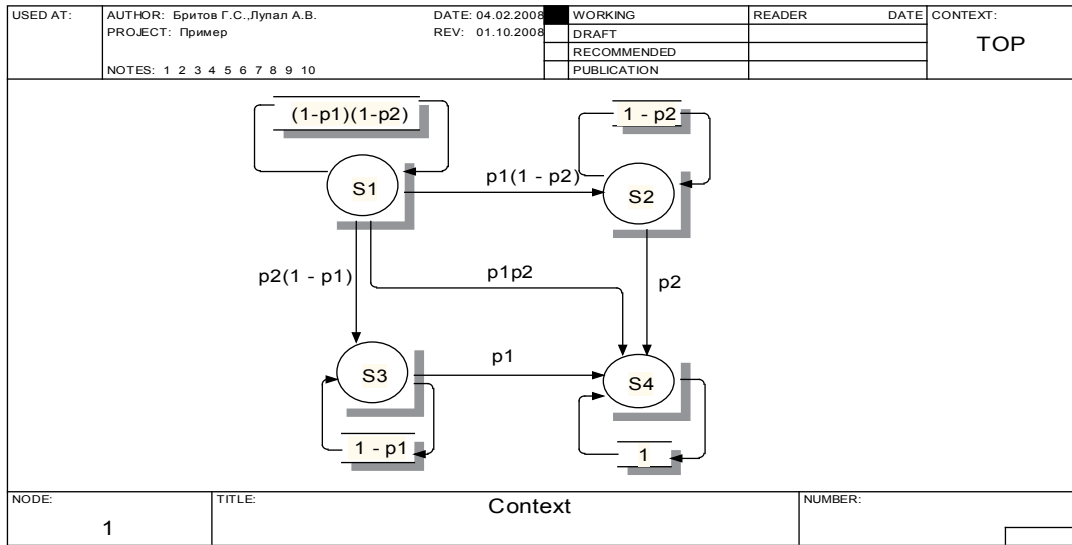
Переходы, зафиксированные в диаграмме, характеризуют появление одного из четырех независимых событий: неисправность верхней связи, неисправность нижней связи, неисправность обеих связей или отсутствие неисправностей.

Попадание ТП в определенное состояние зависит как от происходящих событий, так и от того, в каком состоянии процесс находился раньше. Например, в состояние S_4 можно попасть из состояния S_1 , если происходит событие C_5 , или из состояния S_2 , если происходит событие C_3 , или из состояния S_3 , если происходит событие C_1 . Граф возможных переходов из одного состояния в другое представляет собой OSTN-диаграмму (см. рис. 2). Ребра графа отмечены вероятностями событий или их совокупностей, которые вызывают соответствующий переход. Так, ТП будет постоянно находиться в работоспособном состоянии S_1 только тогда, когда происходит событие C_6 , причем вероятность этого равна $(1 - p_1)(1 - p_2)$. В то же время из состояния S_1 в состояние S_2 можно перейти, если произойдут события C_1 и C_4 . Вероятность такого перехода $p_1(1 - p_2)$.

Вероятности состояний $S_1 - S_4$ зависят от времени. Будем полагать время дискретным, когда $t = 0, 1, 2, \dots$, где единица времени зависит от вида ТП.



■ Рис. 1. Использование *O*-перекрестка



■ Рис. 2. OSTN-диаграмма

Вероятности состояний обозначим $P_i(t)$, $i = 1, 4$. Рассматриваемый процесс переходов состояний можно описать с помощью уравнений марковского процесса, который является одним из методов анализа надежности сложных систем.

Известно, что в марковском процессе каждое состояние системы в некоторый момент времени t не зависит от того, как процесс попал в предыдущие состояния. В соответствии с графом (см. рис. 1) рекуррентные уравнения марковского процесса будут иметь вид

$$\begin{aligned}
 P_1(t+1) &= P_1(t)(1-p_1)(1-p_2); \\
 P_2(t+1) &= P_1(t)(1-p_2)p_1 + P_2(t)(1-p_2); \\
 P_3(t+1) &= P_1(t)(1-p_1)p_2 + P_3(t)(1-p_1); \\
 P_4(t+1) &= P_1(t)p_1p_2 + P_2(t)p_2 + P_3(t)p_1 + P_4(t).
 \end{aligned}$$

Начальные условия целесообразно задать следующим образом:

$$P_1(0) = 1, P_2(0) = 0, P_3(0) = 0, P_4(0) = 0.$$

Матрица рассматриваемого марковского процесса

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1-p_1-p_2+p_1p_2 & 0 & 0 & 0 \\ p_1-p_1p_2 & 1-p_2 & 0 & 0 \\ p_2-p_1p_2 & 0 & 1-p_1 & 0 \\ p_1p_2 & p_2 & p_1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Она имеет единичное собственное число, так как по построению является стохастической. Значит, рекуррентные уравнения марковского процесса имеют нетривиальное стационарное решение. Оно может быть получено из рекуррент-

ных уравнений процесса, записанных для стационарного случая:

$$\begin{aligned}
 -P_1p_1 - P_1p_2 + P_1p_1p_2 &= 0; \\
 P_1(1-p_2)p_1 - P_2p_2 &= 0; \\
 P_1(1-p_1)p_2 - P_3p_1 &= 0; \\
 P_1p_1p_2 + P_2p_2 + P_3p_1 &= 0.
 \end{aligned}$$

Отсюда, учитывая условие полноты

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1,$$

получим

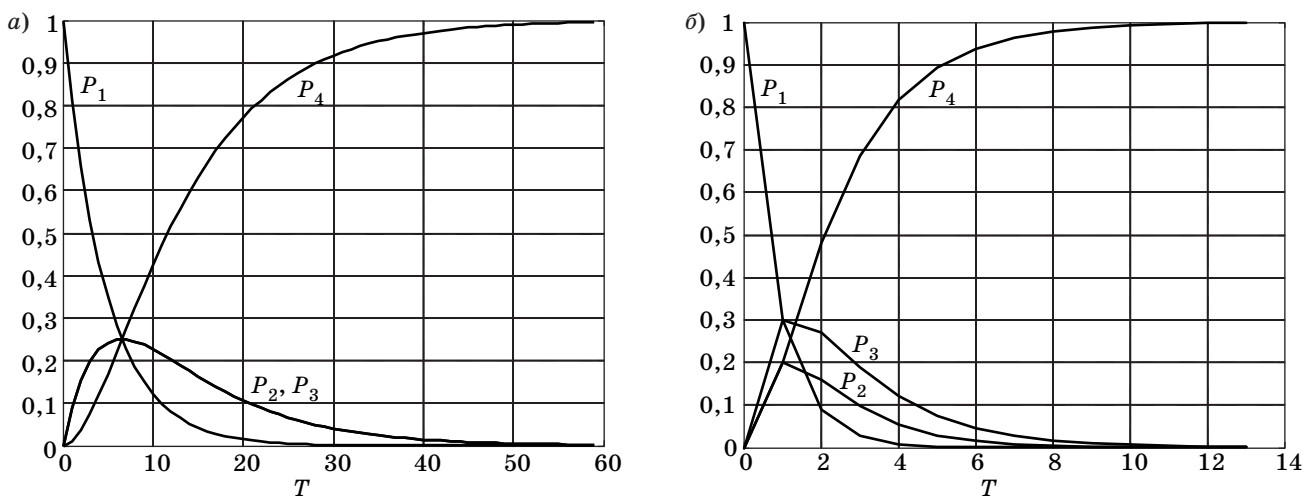
$$P_1 = P_2 = P_3 = 0, P_4 = 1.$$

Это значит, что через некоторое время ТП попадает в неисправное состояние S_4 и остается там навсегда. Момент времени, при котором устанавливается значение $P_4 = 1$, определяет время T исправной работы ТП, зависящее от вероятностей p_1 и p_2 .

Результаты расчетов вероятностей $P_i(t)$, $i = 1, \dots, 4$ показаны на рис. 3, а, б.

Хорошо видно, что в первом случае время исправной работы $T = 55$ тактам, а во втором — $T = 12$ тактам, т. е. произошло уменьшение времени исправной работы в 4,6 раза.

Аналогичный анализ справедлив и для &-перекрестка. Это объясняется тем, что расчеты выполняются для самого «тяжелого» случая, когда должны выполняться обе работы W_1, W_2 . Что касается X-перекрестка, то следует отметить, что обе работы здесь выполняться не могут, а может выполняться только или W_3 , или W_4 . Тем не ме-



■ Рис. 3. Результаты расчетов: а — при $p_1 = p_2 = 0,1$; б — при $p_1 = 0,4$ и $p_2 = 0,5$

нее, отказ обеих связей приводит к полной неисправности ТП и, таким образом, может рассматриваться аналогично «тяжелому» случаю О-перекрестка.

Следовательно, разветвленный ТП разрушается при отказах в связях между выполняемыми работами.

Можно усложнить анализ работы перекрестка, добавив три дополнительных события: C_7 — восстановление верхней связи с вероятностью q_1 , C_8 — восстановление нижней связи с вероятностью q_2 и C_9 — восстановление обеих связей одновременно с вероятностью q_1q_2 . Предложенный подход вероятностного анализа дает возможность рассчитать вероятности различных состояний ТП и вычислить время исправной работы и коэффициент готовности.

Итак, предложен вероятностный анализ ТП, имеющих зависимые работы, выполняемые параллельно или альтернативно, когда выходные

данные работы-источника преобразуются несколькими работами-приемниками или только одной из нескольких возможных работ-приемников соответственно.

Литература

1. Маклаков С. В. Создание информационных систем. — М.: ДИАЛОГ МИФИ, 2003. — 432 с.
2. Черемных С. В., Семенов И. О., Ручкин В. С. Структурный анализ систем: IDEF-технология. — М.: Финансы и статистика, 2001. — 208 с.
3. Райншке К., Ушаков И. А. Оценка надежности систем с использованием графов. — М.: Радио и связь, 1988. — 209 с.
4. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 704 с.

УДК 621.311.1:681.51

СОПРЯЖЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕД В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ГАЗОТУРБИНЫМИ УСТАНОВКАМИ

И. А. Шмидт,

канд. техн. наук, доцент

Б. В. Кавалеров,

канд. техн. наук, доцент

К. А. Один,

программист

Пермский государственный технический университет

А. А. Шигапов,

начальник отдела автоматизации ЗАО «Энергокомплект-Пермь»

Приводится решение задачи сопряжения программных сред для программной реализации разработанной математической модели газотурбинной мини-электростанции. Математическая модель предназначена для тестирования систем управления энергетическими газотурбинными установками.

Ключевые слова — электроэнергетическая система, газотурбинная установка, автоматическое управление.

Введение

Предприятия отечественного авиационного двигателестроения, решая задачи конверсии и диверсификации производства, уделяют значительное и возрастающее внимание разработке газотурбинных установок (ГТУ) наземного применения. В частности, только для нужд электроэнергетики на предприятиях Российской Федерации сегодня разрабатывается и эксплуатируется до 20 типоразмеров малых ГТУ мощностью от 1 до 25 МВт [1]. Новые, резко отличные от полетных, условия функционирования ГТУ предъявляют повышенные и специфические требования к их системам автоматического управления (САУ), которые, тем не менее, до настоящего времени в основном продолжают строиться на базе чисто авиационных прототипов без учета особенностей и характеристик электрической нагрузки. Как результат снижается эффективность принимаемых на этапах проектирования решений, что, в свою очередь, приводит к серьезным препятствиям в обеспечении удовлетворительных эксплуатационных характеристик конечных из-

делий. Основную причину следует искать в отсутствии адекватных программно-алгоритмических средств, обеспечивающих решение задач комплексной автоматизации проектирования и отладки САУ наземных энергетических ГТУ. В статье обсуждаются возможности решения данной проблемы на основе создания гибких компьютерных средств тестирования и наладки алгоритмов САУ ГТУ. С этой целью анализируется математическое описание и исследуется решение задачи сопряжения программных сред разработки алгоритмического аппарата.

Программно-моделирующие комплексы для тестирования и отладки алгоритмического обеспечения САУ ГТУ

Современные энергетические ГТУ представляют собой достаточно сложные для управления объекты. Во-первых, сегодня для наземного применения используются главным образом ГТУ, выполненные по двухвальтовой схеме, что в сравнении с одновальными ГТУ обеспечивает повышенную экономичность и позволяет свободно выби-

рять частоту вращения отдельных блоков [2]. Однако в то же время данная кинематическая схема не способствует улучшению динамических характеристик. Основными причинами затягивания переходных процессов по частоте, например при резких изменениях электрических нагрузок, являются наличие газовой связи между валами ГТУ и их малый момент инерции. Во-вторых, для обеспечения требуемого качества вырабатываемой электроэнергии, в значительной мере определяемого характером переходных процессов установки, требуется дальнейшее совершенствование систем и алгоритмов управления ГТУ. При решении этой задачи ГТУ должны рассматриваться во взаимодействии с другими подсистемами и узлами, для энергетических ГТУ — это, прежде всего, электрогенератор и электроэнергетическая система (ЭЭС) в целом. К сожалению, до настоящего времени разработка и проектирование САУ ГТУ, САУ синхронного генератора производятся в значительной степени независимо, и их объединение в рамках единой мини-электростанции происходит лишь на завершающих стадиях проектирования. При этом при проектировании и отладке САУ ГТУ не учитывается или учитывается крайне приближенно влияние ЭЭС на процессы регулирования ГТУ, то же самое следует сказать и о проектировании САУ генератора. В результате на практике часто возникают аварийные режимы по причине отсутствия согласования алгоритмов функционирования локальных САУ. Для решения указанной проблемы на самых ранних этапах проектирования разработчик должен иметь возможность исследовать поведение ГТУ в качестве модуля единой сложной взаимосвязанной системы. Подобный подход обеспечивает условия согласования характеристик подсистем и локальных САУ и прежде всего САУ ГТУ и САУ синхронного генератора. По этим же причинам разработка, тестирование и отладка алгоритмов САУ ГТУ должны выполняться на основе математического моделирования основных элементов и взаимодействующих подсистем для последующей поэтапной проверки правильности принимаемых решений.

Таким образом, для проектирования, тестирования и отладки алгоритмического обеспечения САУ ГТУ необходимо создать адекватную математическую модель, обеспечивающую моделирование ГТУ во взаимодействии с синхронным генератором и другими структурными элементами ЭЭС. Задачи моделирования ГТУ, структурных элементов ЭЭС, САУ, а также задачи настройки и коррекции алгоритмов САУ целесообразно объединять для совместного исполнения в рамках программного моделирующего комплекса [3]. Подобные гибкие программные моделирующие ком-

плексы являются многофункциональными, они предназначены для комплексного решения задач моделирования, проектирования, тестирования и отладки алгоритмического обеспечения САУ энергетических ГТУ при учете динамических процессов не только собственно в ГТУ, но и в электрогенераторах и прочих элементах ЭЭС. Предложенная концепция совместного моделирования ГТУ и ЭЭС в задачах тестирования и отладки алгоритмов САУ ГТУ хорошо согласуется с современными подходами к управлению энергетическими объектами, обуславливает возможность применения современных методов синтеза и оптимизации САУ [4, 5].

Особенности математического моделирования ГТУ в составе программно-вычислительного комплекса

В рамках программного моделирующего комплекса энергетические ГТУ моделируются совместно с разнообразными элементами ЭЭС. При этом имеют место следующие главные проблемы.

1. Необходимость моделирования различных конфигураций газотурбинных электростанций, различающихся по числу энергетических установок и вариантам возможных схем электроснабжения.

2. Необходимость сопряжения программных сред моделирования, что обусловлено объективными причинами. Математическая модель ГТУ является достаточно сложной, она учитывает геометрию основных сечений установки, вследствие чего ее реализация возможна только при связном воспроизведении всех выходных координат ГТУ, используемых в контурах регулирования. Модель, обеспечивающая такое связное воспроизведение всех координат, строится путем объединения моделей, описывающих различные узлы двигателя или различные процессы в нем. Именно такая модель применяется для доводки и отладки специализированного программного обеспечения САУ [6]. Указанные математические модели ГТУ достаточно давно разработаны и сертифицированы отечественными предприятиями авиационного двигателестроения, вследствие чего в настоящее время актуальна задача сопряжения программных сред создания и исполнения математических моделей ГТУ в составе гибких программно-вычислительных комплексов.

Для разрешения первой проблемы необходима универсальная методика построения сложной математической модели ЭЭС с возможностями ее реконфигурации. Математическая модель ЭЭС включает в себя большое количество взаимосвязанных линейных и нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений; она также

должна учитывать изменения в топологии, в направлении передачи энергии и отвечать ряду других разнообразных, зачастую противоречивых требований.

Сложная математическая модель состоит из моделей структурных элементов и модели их взаимодействия [7]. Для того чтобы представить математические модели всех структурных электрически-взаимодействующих элементов в единой обобщенной форме, представим математическую модель каждого структурного элемента в координатах Парка—Горева, а затем преобразуем математические модели элементов к единообразной векторно-матричной форме записи.

Математические модели всех структурных элементов ЭЭС представим в виде следующего векторно-матричного уравнения:

$$p\mathbf{I} = \pm \mathbf{A}\mathbf{U} - \mathbf{B}\mathbf{I} - \mathbf{H}, \quad (1)$$

где p — символ дифференцирования; \mathbf{I} , $p\mathbf{I}$ — вектор токов и вектор производных токов элемента; знак « \pm » означает, что структурный элемент является источником электрической мощности (генератором), знак « $+$ » — потребителем; \mathbf{U} — вектор напряжений, приложенных между внешними зажимами элемента; \mathbf{A} , \mathbf{B} — матрицы, размерность которых зависит от системы координат, в которых моделируется структурный элемент, а также от того, полные это уравнения или упрощенные; \mathbf{H} — вектор, определяющий воздействие на элемент со стороны средств регулирования электрических параметров. Компоненты вектора \mathbf{H} , связанные с внешним воздействием на элемент, для пассивных элементов электрической системы нулевые, для синхронных машин меняются на каждом шаге расчета.

При реализации динамической модели уравнения (1) решаются на каждом шаге расчета методом численного интегрирования относительно внешних токов структурного элемента. При этом следует отметить, что для пассивных элементов выражение (1) содержит всю систему дифференциальных уравнений элемента. Для электрических машин уравнения (1) следует интегрировать совместно с уравнениями роторных контуров; уравнениями, описывающими механическое состояние элемента, и уравнениями, описывающими действие систем автоматического регулирования. Знаки при слагаемых уравнения (1) соответствуют нормальному направлению токов в электрических машинах (от генератора к узлу). Математическую модель для расчета установившегося режима получаем из уравнений (1), принимая $p = 0$.

В качестве примера рассмотрим процесс получения уравнения вида (1) для наиболее ответ-

ственного элемента ЭСС — синхронного генератора. Система дифференциальных уравнений синхронного генератора представлена в относительных единицах в системе вращающихся координат Парка—Горева (в d -, q -осях) с учетом общепринятых допущений в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = -\Psi_q \omega - d\Psi_d / dt - I_d r \\ U_q = \Psi_d \omega - d\Psi_q / dt - I_q r \\ U_f = d\Psi_f / dt + I_f r_f \\ 0 = d\Psi_D / dt + I_D r_D \\ 0 = d\Psi_Q / dt + I_Q r_Q \\ d\omega / dt = \frac{1}{T_j} (M_T - M) \\ d\gamma / dt = \omega \\ d\delta / dt = \omega - \omega_0 \\ M = \Psi_d I_q - \Psi_q I_d \end{array} \right. , \quad (2)$$

где U_d , U_q — напряжение на обмотке статора по продольной и поперечной осям; Ψ_d , Ψ_q — потокосцепления статора по продольной и поперечной осям; ω — угловая частота вращения ротора; I_d , I_q — токи статора по продольной и поперечной осям; r — активное сопротивление обмотки статора; U_f — напряжение обмотки возбуждения; Ψ_f , I_f , r_f — потокосцепление, ток и сопротивление обмотки возбуждения; Ψ_D , Ψ_Q — потокосцепления демпферных контуров по продольной и поперечной осям; I_D , I_Q — токи демпферных контуров по продольной и поперечной осям; r_D , r_Q — активные сопротивления демпферных контуров по продольной и поперечной осям; T_j — постоянная времени механической инерции электрической машины; M_T — момент турбины; M — электромагнитный момент генератора; γ — угол поворота вращающихся осей d , q по отношению к неподвижным осям; δ — внутренний угол генератора (угол нагрузки); ω_0 — угловая частота вращения поля статора.

При переходе к относительным единицам в качестве базовых приняты номинальные значения соответствующих величин. Используя известные нелинейные соотношения между потокосцеплениями и токами, после ряда громоздких, но несложных преобразований получаем описание синхронного генератора в форме (1), где векторы формируются следующим образом:

$$p\mathbf{I} = \begin{pmatrix} dI_d / dt \\ dI_q / dt \end{pmatrix}$$

— вектор производных статорных токов;

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_D \\ I_Q \end{pmatrix} \text{ — вектор токов; } \mathbf{U} = \begin{pmatrix} U_d \\ U_q \end{pmatrix} \text{ — вектор статорных напряжений; } \mathbf{H} = \begin{pmatrix} x_D x_{ad} - x_{ad}^2 U_f \\ x_f x_D - x_{ad}^2 \\ 0 \end{pmatrix},$$

где x_f, x_{ad}, x_D — индуктивные сопротивления обмотки возбуждения, генератора по продольной оси и демпферной обмотки по продольной оси.

Вслед за математическими моделями отдельных элементов необходимо построить математическую модель их взаимодействия, которая должна отражать состав элементов и топологию ЭЭС. Математическая модель взаимодействия структурных элементов использует матрицу инцидентности, отражающую топологию рассматриваемой локальной системы электроснабжения. Представим взаимодействие элементов в виде следующего векторно-матричного уравнения для определения узловых напряжений на каждом шаге расчета:

$$\mathbf{MGM}^T \mathbf{U} = -\mathbf{M}\mathbf{W} - \mathbf{M}'\mathbf{I}, \quad (3)$$

где \mathbf{M} — клеточная матрица инцидентности, клетками матрицы являются единичные, нулевые матрицы или матрицы преобразований координат; \mathbf{G} — блочная матрица проводимостей ветвей (элементов), образующих систему; \mathbf{M}^T — транспонированная матрица инцидентности; \mathbf{U} — вектор искоемых напряжений узлов; \mathbf{W} — вектор, полученный из правых частей уравнений элементов в форме (1); \mathbf{M}' — матрица, элементами которой являются нулевые клетки или клетки производных элементов матриц преобразования координат.

Матрица \mathbf{G} составляется из матриц \mathbf{A}_i всех элементов моделируемой системы электроснабжения, записанных в форме (1), матрица \mathbf{W} составляется из правых частей уравнений элементов в форме (1):

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{A}_i \end{pmatrix}; \quad \mathbf{W} = \begin{pmatrix} -\mathbf{B}_1 \mathbf{I}_1 - \mathbf{H}_1 \\ -\mathbf{B}_2 \mathbf{I}_2 - \mathbf{H}_2 \\ \vdots \\ -\mathbf{B}_i \mathbf{I}_i - \mathbf{H}_i \end{pmatrix}.$$

Полученная математическая модель обеспечивает расчет всех узловых напряжений системы электроснабжения по векторно-матричному уравнению (3) на текущем шаге расчета. Вслед за этим вновь решаются дифференциальные уравнения элементов (1) и находятся мгновенные значения токов каждого элемента. Процесс повторяется

требуемое число шагов в течение всего расчета. В результате рассчитываются переходные процессы всех режимных параметров ЭЭС.

Рассмотрим функциональность представленной методики на примере топологически простой системы (рис. 1), где нет задающего узла и два генератора работают на общую линию связи. Положительное направление тока для каждой линии показано стрелками.

Уравнения элементов: генератор 1:

$$p\mathbf{I}_1 = -\mathbf{A}_1 \mathbf{U}_1 - \mathbf{B}_1 \mathbf{I}_1 - \mathbf{H}_1; \quad (4)$$

генератор 2:

$$p\mathbf{I}_2 = -\mathbf{A}_2 \mathbf{U}_2 - \mathbf{B}_2 \mathbf{I}_2 - \mathbf{H}_2; \quad (5)$$

линия связи:

$$p\mathbf{I}_л = \mathbf{A}_л \mathbf{U}_{12} - \mathbf{B}_л \mathbf{I}_л. \quad (6)$$

Уравнение (3) в этом случае будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & \mathbf{C}_{12} \\ 0 & -1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_л \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ \mathbf{C}_{21} & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} -1 & 0 & \mathbf{C}_{12} \\ 0 & -1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\mathbf{B}_1 \mathbf{I}_1 - \mathbf{H}_1 \\ -\mathbf{B}_2 \mathbf{I}_2 - \mathbf{H}_2 \\ -\mathbf{B}_л \mathbf{I}_л \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dot{\mathbf{C}}_{12} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_л \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $\mathbf{1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ — единичная матрица; $\mathbf{0} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ — нулевая матрица; матрица преобразования координат

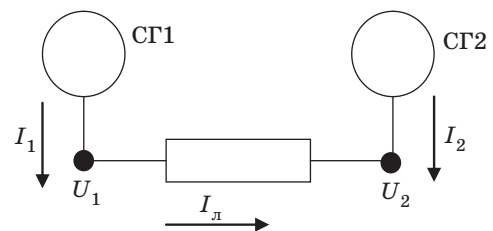
$\mathbf{C}_{12} = \begin{pmatrix} \cos \delta_{12} & -\sin \delta_{12} \\ \sin \delta_{12} & \cos \delta_{12} \end{pmatrix}$; $\dot{\mathbf{C}}_{ij}$ — матрица производных по времени элементов матрицы \mathbf{C}_{ij} :

$$\dot{\mathbf{C}}_{12} = \begin{pmatrix} -\dot{\delta}_{12} \sin \delta_{12} & -\dot{\delta}_{12} \cos \delta_{12} \\ \dot{\delta}_{12} \cos \delta_{12} & -\dot{\delta}_{12} \sin \delta_{12} \end{pmatrix}; \quad \delta_{12} \text{ — угол между } d\text{-, } q\text{-осями первого и второго генераторов.}$$

Алгоритм расчета для примера на рис. 1 следующий.

1. Задаются параметры и начальные значения переменных всех элементов системы — генераторов и линии связи.

1. Задаются параметры и начальные значения переменных всех элементов системы — генераторов и линии связи.



■ Рис. 1. Два генератора работают на общую линию: СГ — синхронный генератор

2. По выражению (7) за один шаг рассчитываются векторы U_1 и U_2 — напряжения первого и второго узлов ЭЭС.

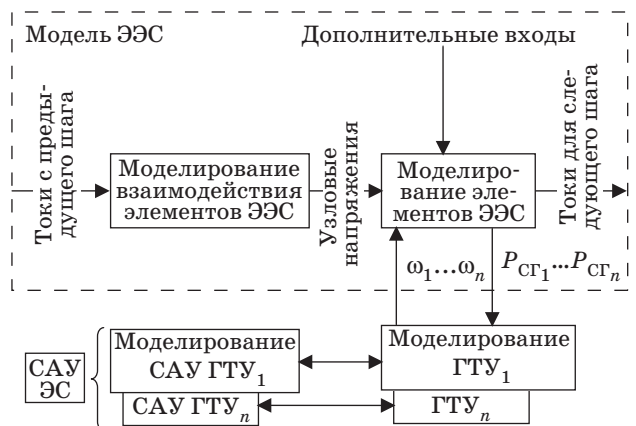
3. Решением дифференциальных уравнений элементов (4)–(6) определяются значения токов, угловых скоростей и других переменных на первом шаге расчета.

4. По вычисленным значениям токов по уравнению (7) рассчитываются новые значения векторов U_1 и U_2 для следующего шага расчета.

5. Процедура повторяется в течение заданного числа шагов.

Конфигурация моделируемой системы электроснабжения модифицируется за счет внесения изменений в матрицу инцидентности M уравнения (3), благодаря чему пользователь имеет возможность формировать различные конфигурации моделируемых ЭЭС.

Рассмотренный выше алгоритмический аппарат может быть проиллюстрирован структурной схемой (рис. 2). На схеме обозначено: САУ ЭС — система автоматического управления электростанцией; $P_{CG_1} \dots P_{CG_n}$ — механические мощности синхронных генераторов (входные переменные моделей ГТУ); $\omega_1 \dots \omega_n$ — угловые скорости свободных турбин (выходные переменные ГТУ). Математическая модель взаимодействия структурных элементов использует для вычисления узловых напряжений токи элементов, подсчитанные на предыдущем шаге расчета. Узловые напряжения являются входными переменными для математических моделей элементов ЭЭС (синхронные генераторы, трансформаторы, линии связи, статические нагрузки и т. п.), которые вычисляют токи для следующего шага расчета. Дополнительные входы представляют собой дополнительные входные переменные элементов ЭЭС, например, для синхронных генераторов — это напряжения возбуждения, вырабатываемые системами возбуж-



■ Рис. 2. Совместное математическое моделирование ГТУ и ЭЭС

дения и автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ). Поскольку электростанция может включать в себя несколько энергоблоков (несколько ГТУ), необходимо предусмотреть отдельную САУ ЭС, выполняющую общие координирующие и согласующие функции. Как следует из представленной схемы, математические модели ГТУ должны поддерживать непрерывный обмен данными с остальными компонентами системы моделирования. И здесь разработчик сталкивается с необходимостью разрешения второй проблемы — проблемы сопряжения программных сред моделирования.

Решение задачи сопряжения программных сред

Как правило, используемые в настоящее время многорежимные математические модели ГТУ различного класса сложности созданы с помощью языка программирования Fortran, что обусловлено ориентацией этого языка на вычисления. С другой стороны, программное обеспечение программно-вычислительного комплекса целесообразно разрабатывать на основе современных программных средств, например, используя Delphi. Необходимость включать модели ГТУ в состав программно-вычислительного комплекса потребовала разработать специальную методику сопряжения программных сред. Рассмотрим суть предлагаемой методики.

Использование модулей, написанных на языке Fortran, из приложения, написанного на Delphi, осуществляется в два шага. Каждый из этих шагов рассмотрим детально.

Первый шаг — правила оформления функции на языке Fortran в виде, допускающем их использование.

Рассмотрим вызов фортрановской функции SUBROUTINE GTD(INI)

Единственный способ вызывать функцию, написанную на языке Fortran, это оформить ее как DLL. Для совместимости с программной средой Delphi необходимо выполнить следующие действия.

1. Явно указать соглашение о вызовах и экспортировать имя функции
`cDEC$ ATTRIBUTES DLLEXPORT::GTD`

2. Для всех параметров и переменных указать их тип, совместимый с типами Delphi. Типы Integer совпадают в обоих языках, а типу Double в Delphi будет соответствовать REAL*8 в Fortran. Для того чтобы гарантировать правильный способ описания всех переменных, рекомендуется в начале модуля вставить строчку
`IMPLICIT NONE`

3. Принять меры для доступа к COMMON-блокам. Для этого необходимо, во-первых, сделать их имена доступными, т. е. экспортировать их имена так же, как имя функции:

```
cDEC$ ATTRIBUTES DLLEXPORT:: /D/
cDEC$ ATTRIBUTES DLLEXPORT:: /REZ1/
```

во-вторых, описать явно переменные, входящие в COMMON-блоки. Так, вместо описания

```
COMMON/D/ DG,DGF,DF,DH,DM,DP,DDP,DT,DDT,DFK,J1,J2
COMMON/REZ1/ CP1(16),CT1(16),CT2(16),FMH(60),REG(40),CA(100),
*CN1(16),CN2(16)
```

получим

```
COMMON/D/ DG,DGF,DF,DH,DM,DP,DDP,DT,DDT,DFK,J1,J2
COMMON/REZ1/ CP1,CT1,CT2,FMH,REG,CA,CN1,CN2
REAL*8 DG,DGF,DF,DH,DM,DP,DDP,DT,DDT,DFK
INTEGER J1,J2
REAL*8, DIMENSION(16) :: CP1,CT1,CT2
REAL*8, DIMENSION(60) :: FMH
REAL*8, DIMENSION(40) :: REG
REAL*8, DIMENSION(100) :: CA
REAL*8, DIMENSION(16) :: CN1,CN2
```

4. Те же самые правила нужно применить для всех функций и процедур, вызываемых из головной функции.

5. Особые преобразования нужно применять, если в исходном тексте использовалась встроенная функция, параметрами которой являются числа с плавающей точкой, отличной от REAL*8. Например, если в исходном тексте использовалась функция ALOG, параметром и результатом которой является REAL*4, необходимо проделать следующие преобразования. Пусть имеем исходный текст

```
I2=I2*ALOG(T2/T1),
переменные T2, T1 описываются по умолчанию.
После преобразования получаем следующий фрагмент:
REAL*8 T2, T1
REAL*4 TMP
TMP = T2/T1
I2=I2*ALOG(TMP)
```

После трансляции и построения библиотеки DLL ее нужно разместить в том же каталоге, что приложение на Delphi, которое будет ее использовать. В рассматриваемом случае имя библиотеки «_GTD.dll»

Второй шаг — вызов процедур и функций, написанных на языке Fortran из Delphi-программы.

Для выполнения функции, находящейся в DLL, нужно, во-первых, импортировать эту функцию, описав ее прототип:

```
procedure GTD(var INI: Integer); cdecl; external '_GTD.dll';
```

обратим внимание, что параметры необходимо описывать как параметры-переменные, что совпадает с соглашениями Fortran.

Второй этап более неочевиден — следует обеспечить доступ из программы к переменным,

описанным в общих блоках библиотек. Для этого требуется совершить следующие действия.

1. Импортировать имена общих блоков. Единственный способ импортировать такие имена — это описать их как функции, тем самым «обмануть» транслятор и получить фактически адрес общего блока внутри dll. Для общих блоков D и REZ1 получим описание

```
function D(i :Integer):Integer; cdecl; external '_GTD.dll';
function REZ1(i :Integer):Integer; cdecl; external '_GTD.dll'.
```

2. Для доступа к переменным, входящим в общий блок, нужно подготовить структуры, соответствующие общим блокам. Для этого опишем типы, соответствующие импортированным общим блокам (типы, соответствующие блокам D и REZ1, будут иметь названия T_D и T_REZ1):

```
type
T_D = record
    DG,DGF,DF,DH,DM,DP,DDP,DT,DDT,DFK : Double;
    J1,J2: Integer;
end;
T_REZ1 = record
    CP1,CT1,CT2:ARRAY [1..16] of Double;
    FMHA: ARRAY [1..60] of Double;
    REG:ARRAY [1..40] of Double;
    CA: ARRAY [1..100] of Double;
    CN1,CN2:ARRAY [1..16] of Double;
end;
```

3. Зарезервировать переменные, которые впоследствии будут использованы для доступа к переменным, располагающимся в общих блоках:

```
var
    PD : ^T_D;
    PREZ1 : ^T_REZ1;
```

4. Подготовить функцию для получения адреса общего блока, описанного как функция

```
type
TFnCOMMON = function (i :Integer) :Integer; cdecl;
function GetAdrCOMMON(fn :TFnCOMMON) : Pointer;
var
    Pn1,Pn2,Pn3 : Pointer;
begin
    Pn1 := Addr(fn); //адрес инструкции вызова fn
    Pn2 := Pointer(Pointer(Integer(Pn1) + 2)*); // адрес перехода
    Pn3 := Pointer(Pn2*);// адрес общего блока
    result := Pn3;
end;
```

Поясним, что именно помещается в адрес перехода Pn2, проиллюстрировав на примере. Инструкция вызова фиктивной функции D выглядит следующим образом (рис. 3).

```
FF25C0F74600 jmp dword ptr [$0046F7C0]
```

■ Рис. 3. Инструкция вызова фиктивной функции


```
function D(I :Integer):Integer; cdecl; external 'GTD.dll';
```

В результате вызова функции **GetAdrCOMMON** мы получаем адрес общего блока, фактически располагаемого в памяти, выделенной **dll**.

5. И последнее — при инициализации модуля получить указатели на описанные общие блоки:

```
PD := GetAdrCOMMON(D);
PREZ1 := GetAdrCOMMON(REZ1);
```

Теперь, чтобы получить доступ, например, к переменной **DT** внутри блока **D**, нужно воспользоваться следующим фрагментом:

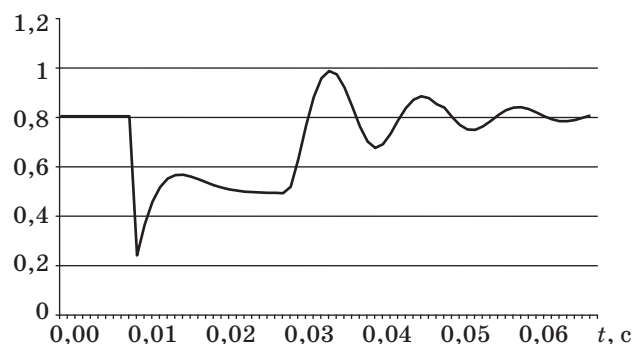
```
@(PD^.DDT);
```

Если переменная внутри блока является массивом, то для доступа к *J*-му элементу массива воспользуемся следующим фрагментом (показываем на примере массива **CP1** из **REZ1**):

```
@(PREZ1^.CP1)^[ J].
```

Вычислительная эффективность математической модели, построенной с использованием описанной методики сопряжения, была проверена экспериментально.

Для большинства существенных переходных процессов максимально допустимый шаг расчета для модели ГТУ составляет 1 мс, для ЭЭС — 10 мкс. Например, характерный переходный процесс продолжительностью 1 с для системы из 6 синхронных генераторов и распределенной комплексной электрической нагрузки рассчитывается с помощью одноточечного метода Рунге—Кутты четвертого порядка за время 14,6 мин на базе Pentium IV, 3 ГГц персонального компьютера. Применение многоточечных методов (Адамса—Башфорта, Адамса—Моултона) позволяет сократить время расчета, для чего можно применить так называемое «распределенное моделирование» на нескольких компьютерах [8]. Основа-



■ Рис. 4. Пример рассчитанного переходного процесса

нием для выбора метода и шага расчета является вид возмущения, налагаемого на энергосистему. Требования к вычислительным ресурсам для разработанных программно-вычислительных комплексов: Microsoft Windows XP, Windows Vista; Pentium IV, 3 ГГц; ОЗУ 512 МБ. График характерного переходного процесса представлен на рис. 4.

Переходный процесс отражает изменение напряжения на внешних зажимах генератора при удаленном коротком замыкании до и после ($t = 0,03$ с) включения в работу САУ. Напряжение измеряется в относительных единицах, время — в секундах. Время расчета на базе Pentium IV, 3 ГГц персонального компьютера составляет 0,6 мин.

Вывод

Предложенные методики математического моделирования и сопряжения программных сред обеспечивают непосредственное включение математических моделей энергетических ГТУ в состав программно-вычислительных комплексов, предназначенных для проектирования и тестирования САУ ГТУ.

Литература

1. Желокова М. З., Максимова И. Р. Прогноз мощностных показателей высокооборотных генераторов с предельной степенью использования для малой энергетики // Изв. РАН. Энергетика. 2008. № 6. С. 127–131.
2. Кириллов И. И. Автоматическое регулирование паровых и газовых турбин и газотурбинных установок. — Л.: Машиностроение, 1988. — 447 с.
3. Винокур В. М., Кавалеров Б. В., Петровичев А. Б. Программный комплекс для математического моделирования автономных мини-электростанций // Электричество. 2007. № 3. С. 2–7.
4. Leung J. S. Global power system control using generator excitation, PSS, FACTS devices and capacitor

- switching // International journal of electrical power & energy systems. 2005. Bd. 27. N 5–6. S. 448 – 464.
5. De Luca A. Power System Simulators for Design and Operations: Two Different Approaches? // ESA SP. 2002. Bd. 502. S. 201–208.
6. Ахмедзянов А. М., Дубравский Н. Г., Тунаков А. П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. — М.: Машиностроение, 1983. — 20 с.
7. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1978. — 440 с.
8. Distributed simulation. A new modeling technique is applied to a HALE UAV power system using detailed subsystem simulations of the turbine engine, generators, and loads // Aerospace engineering. 2004. Bd. 24. S. 24–27.

УДК 004.93

ОСОБЕННОСТИ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАПИСИ И ОБРАБОТКИ РЕЧИ В АВТОМАТАХ САМООБСЛУЖИВАНИЯ

А. Л. Ронжин,

канд. техн. наук, доцент

А. А. Карпов,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

И. А. Кагиров,

младший научный сотрудник

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Рассматривается ряд проблем, возникающих при дистанционной записи речи в зашумленных условиях. Повысить точность выделения границ полезного речевого сигнала предлагается за счет применения спектрально-пространственного анализа многоканального звукового сигнала.

Ключевые слова — дистанционное распознавание речи, пассивная локализация, корреляция взаимного спектра, речевой пользовательский интерфейс.

Введение

С развитием технологий «повсеместных вычислений» (ubiquitous computing) и разработкой так называемых «окружающих интеллектуальных пространств» (ambient intelligence space) к речевым технологиям предъявляются все более жесткие требования, в частности, система должна воспринимать речь диктора, свободно перемещающегося в помещении, т. е. самостоятельно определять местонахождение источника полезного сигнала. Подавляющее большинство существующих систем распознавания речи способно обрабатывать только речь диктора, записанную с помощью микрофона-гарнитуры, расположенного непосредственно перед ртом диктора, саму же запись рекомендуется проводить в тихом, звукоизолированном помещении. Однако очевидно, что далеко не каждый пользователь готов к таким ограничениям. Для развития и внедрения речевых технологий необходимо сделать процесс записи речи максимально удобным для пользователя, прежде всего, обеспечив дистанционную запись речи в условиях фонового шума и параллельных разговоров в помещении.

Следует признать, что технологии распознавания речи все еще на таком уровне, что основными областями, в которых они действительно востребованы, остаются индустрия развлечений и сфера обслуживания. Причиной тому является их

недостаточная устойчивость по отношению к вариативности речи, окружающей акустической обстановке и другим неблагоприятным факторам. Так, по сравнению с автоматической системой распознавания профессиональная стенографистка в несколько раз быстрее набирает текст, а в условиях перегрузок и сильных аудиошумов вместо голосовых команд по-прежнему проще использовать манипуляторы и джойстики, расположенные непосредственно в руках оператора (пилота самолета).

Таким образом, принципиальными для функционирования системы становятся, с одной стороны, фильтрация шумов и с другой — автоматическая локализация пользователя (объекта источника сигнала).

Именно поэтому одним из объектов самого пристального внимания в области автоматического распознавания речи стала проблема записи речи при помощи микрофонов, расположенных на значительном расстоянии от диктора, а не установленных в непосредственной близости от рта.

При обработке речевого сигнала посредством двух и более микрофонов (т. е. массива датчиков) используется способность бинаурального слуха оценивать пространственную акустическую обстановку [1]. Кроме непосредственной функции приема звуковых сигналов, массив микрофонов используется для пространственной локализа-

ции источников звука и фильтрации полезного сигнала за счет управления диаграммой направленности массива микрофонов. Благодаря этому система воспринимает и анализирует звуки, исходящие из узкой области рабочего пространства, и значительно ослабляет или даже совсем отсекает звуки, приходящие со всех остальных направлений.

В настоящей статье дается краткий обзор существующих методов пространственной обработки сигнала при помощи массива микрофонов и представлены результаты экспериментов, проведенных при использовании нескольких модификаций метода обобщенной функции взаимной корреляции и ряда пространственных моделей массива микрофонов.

Специфика дистанционной записи и распознавания речи

При переносе системы распознавания речи из лабораторных условий в обычные мы сталкиваемся с рядом новых проблем и особенностей речевого взаимодействия. Пожалуй, самым сложным случаем (и в то же время одним из самых распространенных) для автоматической системы будет ситуация *cocktail party*, когда в помещении находится большое число людей, свободно перемещающихся и разговаривающих. В такой обстановке система записывает многомерный звуковой сигнал, содержащий все звуки источников, находящихся в помещении, в котором проходит запись. При использовании методов спектрально-пространственной фильтрации необходимо разделить все звуковые сигналы, произвести идентификацию дикторов, определить их положение и, наконец, распознать их речь. Рассмотрим специфику этой задачи более подробно.

Из-за недостатка обучающих данных по спонтанной русской речи сегодня лишь немногие системы распознавания являются дикторонезависимыми, поэтому при обработке речевого сигнала, в котором содержится речь нескольких дикторов, требуется предварительная настройка на каждого диктора персонально (записывается некоторый обучающий набор фраз) или же производится адаптация моделей фонем по первым фразам конкретного диктора. Таким образом, для обработки речевого сигнала, содержащего фразы нескольких дикторов, либо требуется дикторонезависимый модуль обработки речи, модели фонем которого обучены на достаточно представительном корпусе фраз, наговоренных значительным числом дикторов, либо модуль идентификации речи диктора должен сегментировать входной сигнал на участки, принадлежащие разным дикторам, и адаптировать модели фонем персон-

ально для каждого диктора. Первый способ является более эффективным, поскольку в этом случае проводится обучение с «учителем».

Эксперименты показывают, что длительность «перекрывающейся» речи в условиях деловой встречи, конференции или совещания может достигать 70 % [1]. Эта проблема настолько серьезна, что вызывает сбой даже у систем распознавания, использующих персональные радиомикрофоны, расположенные непосредственно у рта диктора. Тем не менее, поскольку в одной точке пространства может находиться только один диктор, то именно пространственно-спектральная фильтрация многомерного аудиосигнала, записанного через массив микрофонов, позволит разделить сигналы, исходящие из разных точек и разных источников.

В процессе изложения своих идей докладчик иногда передвигается, сопровождая речь жестами. При перемещении диктора расстояние между ним и массивом микрофонов постоянно меняется, соответственно, будет меняться и уровень речевого сигнала (громкость). Для одновременной записи как удаленных, так и близкорасположенных источников необходимо применение аналого-цифровых преобразователей, обеспечивающих запись аудиосигнала в широком динамическом диапазоне.

Проблема вариативности уровня сигнала проявляется в первую очередь на этапе определения границ речевого сигнала. Большинство алгоритмов определения активности голоса выделяют речь в аудиосигнале, анализируя энергию сигнала или его спектра. Если энергия сегмента превышает некоторый заданный порог, то система считает, что начался речевой сигнал. В результате при фиксированном пороге получится, что границы одного и того же сигнала, проигранного с разного расстояния до микрофона, будут отличаться между собой. Фраза, произнесенная с близкого расстояния, будет записана целиком, а при увеличении расстояния часть фразы может пропасть, так как энергия сигнала уменьшится, и некоторые сегменты по энергии не будут превышать заданный порог. Наличие взрывных согласных в сигнале приводит к тому, что сигнал после смычки не записывается совсем. Дело в том, что при снижении уровня сигнала громкость участков в районе смычки становится незначительной, в результате чего длительность паузы значительно увеличивается и часто воспринимается как окончание фразы. Инвариантность данных алгоритмов по отношению к амплитуде сигнала можно повысить, приняв во внимание расстояние до источника сигнала.

При использовании массива микрофонов необходимо обеспечить синхронную запись сигнала

лов по каждому из датчиков. К сожалению, это не всегда удается реализовать технически. Наш собственный опыт показывает, что если подключать отдельные USB-микрофоны, то их синхронизация представляет собой сложную задачу, поскольку операционная система накладывает свои ограничения и выставляет различные приоритеты устройствам. Использование же специализированных аудиоплат, осуществляющих синхронизацию и управление потоками самостоятельно, хотя и позволяет частично решить данную проблему, но сопряжено с дополнительными трудностями технического (и финансового) характера.

В ряде экспериментов [1] для верификации результата распознавания используется комбинация массива микрофонов и близкостоящего микрофона. Массив микрофонов служит для определения положения диктора, а когда говорящий определен, его речь также записывается с помощью ближайшего к нему микрофона. Для распознавания используются сигналы, записанные как при помощи массива микрофонов, так и близкостоящего микрофона, и полученные результаты затем сопоставляются.

Методы спектрально-пространственной обработки звуковых сигналов

При разработке систем, анализирующих распространяющиеся в пространстве сигналы, в первую очередь возникают проблемы интерференции различных сигналов. Если полезный сигнал и помехи имеют одни и те же частотно-временные характеристики, то временная фильтрация сигнала не эффективна. Однако источники полезного сигнала и помех часто располагаются в различных точках пространства, в этом случае использование пространственного фильтра для ослабления уровня помех件возможно.

Применение временного фильтра требует обработки данных, собранных в некотором временном интервале (окне). Аналогично, пространственная фильтрация производится над данными, полученными в некотором пространственном окне [2]. Пространственная разрешающая способность зависит от размера окна — чем больше окно, тем лучше разрешение. Однако абсолютный размер окна не так важен, как его отношение к длинам принимаемых волн. На практике чаще используются высокочастотные сигналы, в том числе и потому, что для их приема требуются антенны с меньшими габаритными размерами.

Рассмотрим наиболее общие подходы к решению задачи локализации пользователя в пространстве. В настоящий момент до конца не опре-

делено, какой класс методов лучше всего использовать для решения задачи локализации источника речевого сигнала [3–5]. Прежде всего, это связано с тем, что методы были изначально ориентированы на локализацию узкополосных сигналов, а речь имеет относительно широкий частотный диапазон, и для ее обработки требуется некоторая модификация данных методов.

В большинстве подходов используются спектральные методы обработки звукового сигнала [6–8], а также параметрические методы для статистической оценки положения источника звука и фильтрации полезного сигнала [9]. Спектральные методы довольно привлекательны с точки зрения простоты вычислений, поэтому они применяются чаще. В связи с этим в данной работе за основу был выбран также спектральный подход.

Среди спектральных подходов следует выделить метод формирования луча (beam forming) — обработку сигнала, которая обеспечивает системе пространственную селективность [4]. Его назначение состоит в выделении компонент сигнала, распространяющегося из определенной точки пространства. Задача формирования луча или диаграммы направленности, т. е. избирательного приема излучения в пространстве с разных направлений, подобна полосовой фильтрации: сигналы, принадлежащие лучу, пропускаются, а сигналы, ему не принадлежащие, ослабляются.

Одна из простейших систем формирования луча основана на взвешенном суммировании сигналов с задержкой. Суммарный сигнал образуется усреднением взвешенных и задержанных копий сигнала, поступающих с микрофонов. Задержки выбираются таким образом, что центр полосы пропускания располагается вдоль определенного направления в пространстве. Например, если все микрофоны расположены в одной плоскости и мы хотим направить луч перпендикулярно этой плоскости, то задержки для всех микрофонов должны равняться нулю. Тогда плоские волны, идущие перпендикулярно, будут складываться по фазе, а волны, поступающие из других направлений, будут складываться с различными фазами и преимущественно ослабляться.

Для обработки узкополосных сигналов применяется метод формирования луча, который производит дискретизацию сигнала в пространстве. На выходе фильтра в момент времени t появляется некоторый сигнал $y(t)$, являющийся линейной комбинацией данных, поступивших с J датчиков в момент времени t :

$$y(t) = \sum_{l=1}^J \mathbf{w}_l^* \mathbf{x}_l(t),$$

где \mathbf{w} — вектор весов; $\mathbf{x}(t)$ — вектор входных данных, а $*$ представляет комплексное сопряжение,

что упрощенно соответствует перемножению данных с некоторыми весами. Тем не менее, предполагается, что данные и веса являются комплексными числами, поскольку во многих приложениях используются энергия и фаза сигналов.

Для широкополосных сигналов важно учитывать дискретизацию как в пространстве, так и во времени. Выход фильтра в этом случае может быть описан следующим выражением:

$$y(t) = \sum_{l=1}^J \sum_{p=0}^{t-1} \mathbf{w}_{l,p}^* \mathbf{x}_l(t-p),$$

где $t-1$ — число задержек на каждом из J каналов датчиков. Если сигнал на каждом датчике рассматривать как вход, то формирователь луча представляет собой систему с несколькими входами и одним выходом. Тогда для обоих методов формирования луча можно записать

$$y(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t),$$

где H — эрмитов оператор.

В зависимости от способа настройки весового вектора \mathbf{w} существуют различные методы формирования луча [10]. Наибольшее распространение получили формирователь луча Бартлетта [9] и формирователь луча Кэпона [11]. Первый метод использует постоянный набор весов и задержек для объединения сигналов, поступивших с микрофонов, преимущественно учитывая только информацию о расположении микрофонов в пространстве и направлении волны. Второй же метод, наоборот, анализирует эту информацию вместе со свойствами принятого сигнала, что позволяет уменьшить количество помех.

В задачах, где требуется только определение положения источника звука без пространственной фильтрации полезного сигнала, применяется измерение времени задержки между сигналами, записанными двумя или более микрофонами. В большинстве приложений используются методы обобщенной функции взаимной корреляции (General Cross Correlation — GCC) [6] или обработки фазы сигналов [7, 12] для оценивания задержки прихода звуковой волны. В таких методиках положение диктора определяется с помощью набора оценок задержек, вычисленных по разным микрофонам. Основным недостатком всех предложенных методов наблюдается в условиях высокой реверберации, когда происходит множественное отражение звуковых волн от стен помещения и основной сигнал перемешивается с его отраженными копиями. Также следует отметить, что проблема локализации нескольких источников звука стала исследоваться совсем недавно, хотя такая ситуация наиболее свойственна для реальных условий. Для повышения точности локали-

зации также эффективна интеграция методов аудио- и видеообработки [4]. За последние десятилетия в этой сфере были достигнуты большие успехи, однако интенсивность исследований по-прежнему высока. Наиболее актуальной проблемой все еще остается недостаточная устойчивость систем по отношению к шумовым помехам и реверберации.

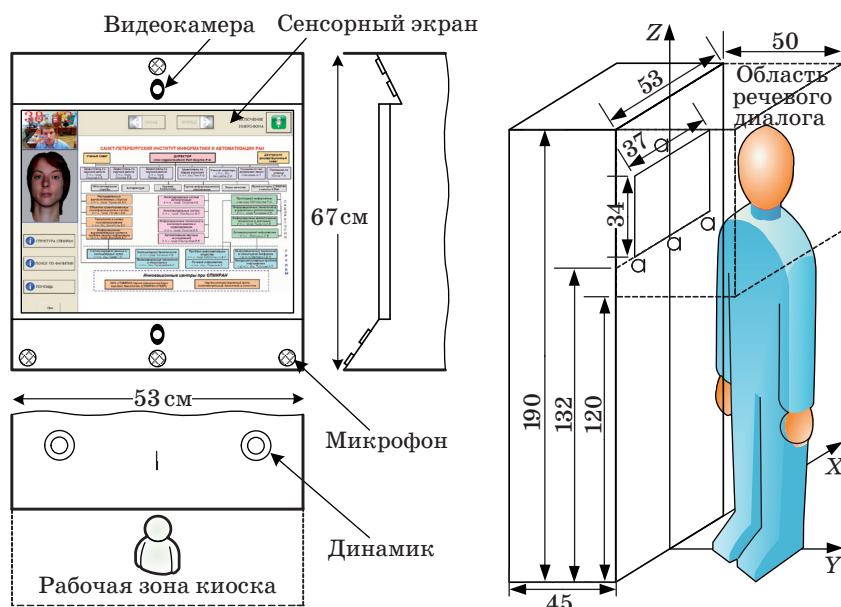
Тестирование разработанного метода локализации источника звуковых сигналов

При разработке системы для локализации диктора в пространстве перед киоском (автоматом) были применены три алгоритма: GCC-SCOT, GCC-PHAT и LMS, основанные на оценке времени задержки прихода сигнала к двум разным микрофонам [12]. При проведении экспериментов изменялись следующие параметры: 1) расстояние между микрофонами; 2) расстояние от источника звука до микрофона; 3) отклонение источника звука от линии массива микрофонов [13]. Звуковой сигнал записывался синхронно двумя микрофонами с частотой дискретизации 16 кГц. Комплексное преобразование Фурье вычислялось для сегмента сигнала размером 512 отсчетов с шагом 128 отсчетов.

При сравнении сигналов, записанных двумя разными микрофонами, определялся угол отклонения источника звука от линии массива микрофонов. Оценка данного угла производилась только для сегментов, максимальное значение функции взаимной корреляции которых превышало заданный порог. Длительность тестовой фразы составляла 2,3 с. Усредненная оценка угла вычислялась для сегментов записанного сигнала в диапазоне 0,5–1,8 с. Алгоритмы показали примерно одинаковые результаты, поэтому за основу был взят алгоритм GCC-PHAT, поскольку он требовал меньших вычислительных ресурсов.

С 2007 г. разрабатывается система МИДАС (многомодальный интерактивно-диалоговый автомат самообслуживания), распознающая присутствие клиента и вербально взаимодействующая с ним на естественном языке. Все эксперименты по дистанционной записи и распознаванию речи проводились с помощью разработанного многомодального киоска. В состав аппаратной части массива входят четыре микрофона «Октава» МК-012 и звуковая плата PreSonus Firepod.

Точность локализации источника полезного звука (речи клиента) и качество принимаемого аудиосигнала в сильной степени зависят от пространственного расположения микрофонов в массиве и самого массива в корпусе киоска. В киоске (рис. 1) используется массив микрофонов, три из которых расположены на одной линии под экра-



■ Рис. 1. Расположение устройств ввода-вывода интерфейсной части и общий вид киоска

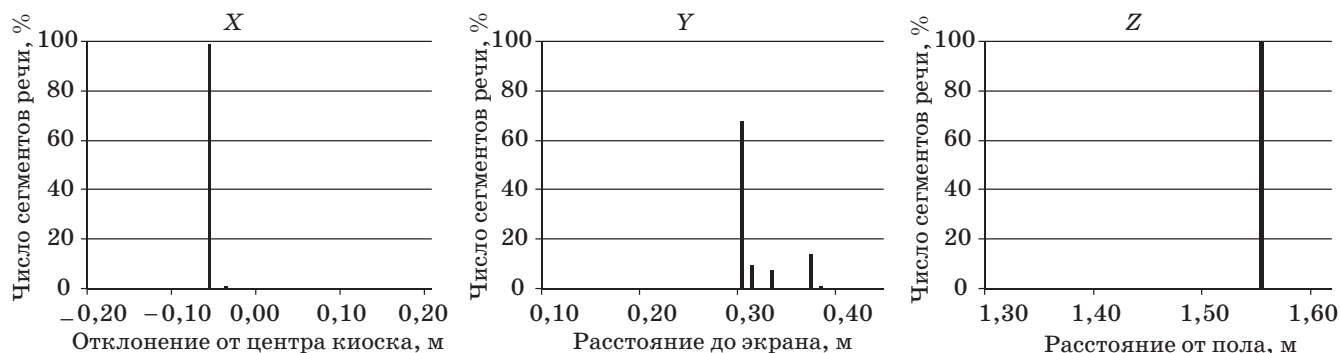
ном, а один находится над ним. Такое положение позволяет определять координаты источников звука в трехмерном пространстве. При этом один микрофон располагается по центру под монитором максимально близко ко рту пользователя, что обеспечивает уверенный прием аудиосигнала, кроме того, пользователь частично закрывает его от внешних шумов. Допустимая область речевого диалога на рисунке ограничена пунктирными линиями. В ней может находиться лицо (и рот) потенциального клиента во время общения с киоском.

В нашем киоске для определения положения источника звука в пространстве используется оценка времени задержки прихода сигнала по четырем парам микрофонов. Затем методом триангуляции рассчитываются координаты источника, а по длительности сигнала и энергии спектра принимается решение о наличии речи в записанном звуковом потоке.

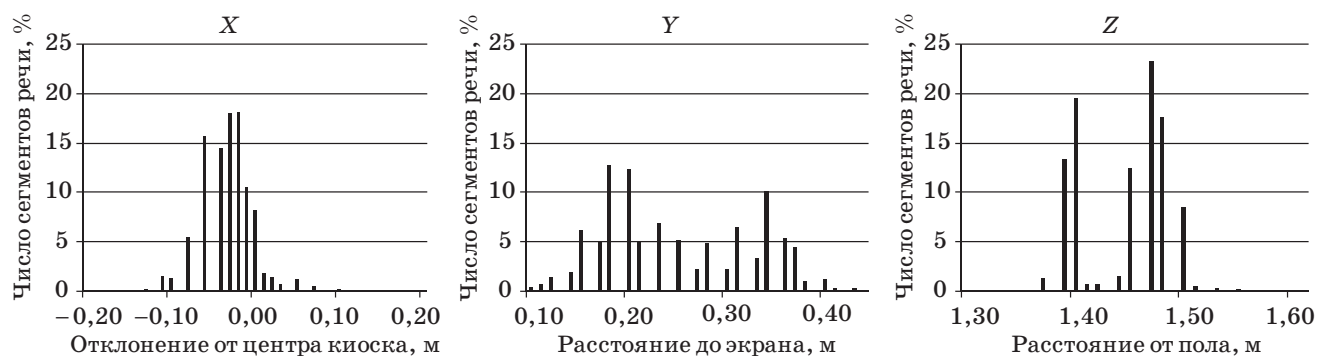
В первом эксперименте для определения точности работы алгоритма трехмерной локализации набор из 2500 фраз был проигран через динамик, располагавшийся перед киоском в течение всего процесса проигрывания. Разброс значений координат центра динамика, которые были определены в ходе записи речевого сигнала через массив микрофонов, показан на рис. 2.

Как можно видеть, большинство речевых сегментов было локализовано с одинаковыми значениями координат $(-0,06; 0,32; 1,55)$. Некоторый разброс параметров присутствует по оси Y . Тем не менее, используя методы сглаживания, можно добиться более устойчивого определения координат источника.

В ходе следующего эксперимента фразы говорили пользователи киоска (5 пользователей разного роста и пола, каждый из которых произнес по 500 фраз). Так как параметры системы локализации остались прежними, то увеличившийся



■ Рис. 2. Значения координат центра динамика, определенные автоматически



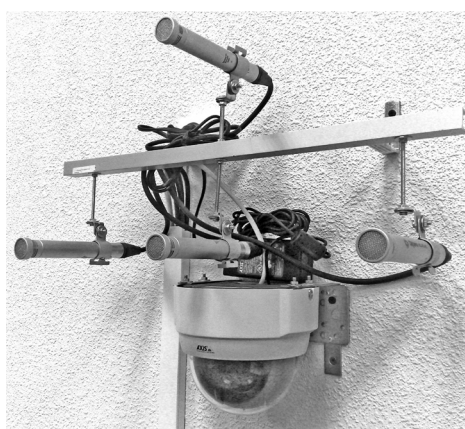
■ Рис. 3. Значения координат центра рта пользователя, определенные автоматически по голосу

разброс значений координат связан с естественными небольшими передвижениями пользователей в процессе взаимодействия с киоском. Разброс значений координат центра рта пользователей, которые были определены в ходе записи речевого сигнала через массив микрофонов, показан на рис. 3.

Для данной системы ось X проходила вдоль нижней границы передней панели киоска, ось Y — через центр киоска в сторону клиента, ось Z — вертикально по центру передней панели киоска. Таким образом, центр координат находился посередине нижней границы передней панели киоска, как показано на рис. 1. Приведенные графики показывают, что рабочая зона взаимодействия с киоском может быть ограничена по оси X шириной киоска (53 см), а по оси Y — 50 см, что достаточно для удобного управления сенсорным монитором, и, наконец, по оси Z допустимая область речевого диалога может быть ограничена от 120 до 180 см. Также было замечено, что при произнесении команды пользователь иногда наклонялся ближе к киоску, интуитивно стремясь повысить громкость речевого сигнала. В проведенном эксперименте не участвовали дети, однако при разработке многомодальных игровых/обучающих приложений следует учесть, что нижняя граница рабочей зоны по оси Z должна быть существенно снижена.

Разработанная модель дистанционной локализации источника звука и алгоритм спектрально-пространственного определения границ речи были успешно внедрены в многомодальные справочные системы СПИИРАН и карту Санкт-Петербурга.

Массив микрофонов, собранный по схеме «перевернутая Т», представлен на рис. 4. Соседние элементы массива расположены в 20 см друг от друга. При этом массив совмещен с видеочкамерой, вращающейся в горизонтальной и вертикальной плоскостях, что позволяет использовать его для бимодальной локализации и слежения за



■ Рис. 4. Прототип массива микрофонов для «интеллектуального зала» СПИИРАН

диктором. Эта модель массива микрофонов была использована при оснащении «интеллектуального зала» института.

В 2009 г. киоск был размещен в коридоре здания института и апробирован в реальных условиях эксплуатации. В конце работ планируется улучшенный прототип киоска выставить, например, в музеях или вокзалах для массового обслуживания клиентов.

Заключение

Предложенный метод предназначен для определения положения диктора в пространстве перед массивом микрофонов и дистанционной записи голосовых команд без использования гарнитуры-микрофона. Способность бинаурального слуха оценивать пространственную акустическую обстановку использована при разработке антропоморфных моделей записи и обработки речевого сигнала посредством двух или нескольких микрофонов. Кроме непосредственной функции приема звуковых сигналов, массив микрофонов и разработанный программный модуль используются для пространственной локализации источников звука и фильтрации полезного речевого сигнала. Благодаря этому массив микрофонов воспринимает и анализирует звуки, исходящие из определенной рабочей области пространства, и значительно ослабляет звуки, приходящие со всех остальных направлений. Модуль позволяет существенно повысить качество дистанционного распознавания речи в справочно-информационных системах, располагающихся в зашумленных местах массового использования.

Разработанная модель дистанционного распознавания русской речи проходит тестовую эксплуатацию в СПИИРАН в многомодальном справочном киоске, предлагающем в интерактивном режиме информацию о сотрудниках института, научных подразделениях и текущих мероприятиях. Также в киоске реализована многомодальная карта Санкт-Петербурга, где посредством голосового дистанционного запроса производится поиск улицы и вывод на экран сенсорного монитора интересующего участка карты. Кроме того, в «интеллектуальном зале» модуль дистанционного распознавания речи используется для голосового управления светом, шторами, телевизором и другими исполнительными устройствами. Внедрение систем дистанционного распознавания речи в системы массового обслуживания, банкоматы и справочные автоматы позволит обеспечить пользователю возможность интуитивного взаимодействия с системой за счет использования речевого интерфейса.

Данные исследования проводятся при финансовой поддержке Правительства Санкт-Петербурга и гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 07-07-00073-а.

Литература

1. **Stanford V., Rochet C., Michel M., Garofolo J.** Beyond Close-talk — Issues in Distant Speech Acquisition, Conditioning Classification, and Recognition// Proc. ICASSP 2004 Meeting Recognition Workshop. Montreal, Canada, 2004. P. 123–127.
2. **The Digital Signal Processing Handbook**/Ed. V. Madsen, D. Williams. — N. Y.: CRC Press, 1999. — 1776 p.
3. **Johnson D., Dugeon D.** Array Signal Processing: Concepts and Techniques. — NJ: Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, 1993. — 512 p.
4. **Brandstein M., Ward D.** Microphone Arrays Signal Processing Techniques and Applications. — Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer-Verlag, 2001. — 398 p.
5. **Trees H.** Optimum Array Processing. — N. Y.: John Wiley & Sons, 2002. — 1456 p.
6. **Knapp C. H., Carter G. C.** The generalized correlation method for estimation of time delay//IEEE Trans. Acoustics Speech Signal Proc. 1979. Vol. 24. P. 320–327.
7. **Lathoud G., McCowan I. A.** A Sector-Based Approach for Localization of Multiple Speakers with Microphone Arrays//Proc. of SAPA-2004. Korea, 2004. P. 93–105.
8. **Даджион Д., Мерсеро Р.** Цифровая обработка многомерных сигналов: Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. — 488 с.
9. **Krim H, Viberg M.** Two decades of array signal processing research: the parametric approach//Signal Proc. Magazine. Cambridge, MA. Jul. 1996. Vol. 13. N 4. P. 67–94.
10. **Van Veen B. D., Buckley K. M.** Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering//IEEE ASSP Magazine. April 1988. P. 4–24.
11. **Capon J.** High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis//Proc. IEEE. Aug. 1969. Vol. 57. N 8. P. 2408–2418.
12. **Omologo M., Svaizer P.** Acoustic event localization using a crosspower-spectrum phase based technique//Proc. of ICASSP. 1994. Vol. 2. P. 273–276.
13. **Ронжин А. Л., Карпов А. А.** Сравнение методов локализации пользователя многомодальной системы по его речи//Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 11. С. 41–47.

УДК 681.3

ПОСТРОЕНИЕ ШАБЛОНОВ КОДА ПО ТЕКСТАМ СПЕЦИФИКАЦИЙ

И. С. Лебедев,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник
Научно-исследовательский институт точной механики

Приведен подход к созданию шаблонов кода на основе анализа естественно-языковых структур текстов спецификаций. Рассматривается алгоритм преобразования естественно-языковых конструкций.

Ключевые слова — структуры естественного языка, генерация кода, вычисление структур шаблонов, кода.

Применение моделей естественного языка (ЕЯ) является одной из сложных проблем, стоящих на пути создания и использования комплексов программ обработки текстовой информации в интеллектуальных информационных системах.

Анализ естественно-языковых конструкций вызывает необходимость построения их модели, которая основывается на ряде предположений, оказывающихся основополагающими для ее применения. Любая создаваемая модель ЕЯ изначально содержит некоторые ограничения, так как описывается определенной совокупностью свойств. Одновременно с этим при повышении требований к точности модели резко возрастает объем учитываемых языковых факторов и затрат на получение адекватной структуры лингвистического описания. О выполнении этого условия говорится во многих работах как прикладного, так и теоретического характера Г. С. Цейтина, В. Ф. Хорошевского, Н. Н. Леонтьевой, П. А. Толпегина, В. А. Тузова и др.

В настоящее время для формализации естественного русского языка предлагаются решения, базирующиеся на словарях компаний АОТ, RCO [1, 2] и др. Однако в большинстве случаев полная информация о составе, структуре и организации этих словарей отсутствует ввиду их коммерческого применения, что затрудняет их использование в исследовательских работах. С другой стороны, существуют открытые модели, например семантическая модель ЕЯ профессора В. А. Тузова [3]. Данная модель была выбрана в силу ее проработанности в рамках научно-исследовательской работы «Разработка концептуальных основ проектирования информационных систем» [4], где одним из вопросов стоит ана-

лиз возможности автоматически обрабатывать предложения спецификаций на программное обеспечение на основе продукционных правил, например:

До исполнения Теста камеры Приложение должно предоставить пользователю описание этого Теста.

Во время исполнения Теста камеры Приложение должно выдать пользователю подсказку, чтобы он «поймал» изображение, а затем отобразить на экране то, что видит камера через видеоискатель.

У пользователя должна быть возможность подтвердить или отвергнуть результат Теста камеры в ответ на вопрос от Теста.

Целью таких спецификаций является помощь программисту в кодировании алгоритмов, в устранении неоднозначностей в понимании отдельных параметров [5]. На основе предложений строятся и уточняются схемы, по которым пишется код:

```
<Precond: if Тест на камеру не исполнен>
<User:: Param: Экран > <- <App:: Param: описание тестов>
<Action: Представить> <Param: Описание этого теста>
<Postcond: Экран = «описание этого теста»>
```

Предметная область исследуемых текстов спецификаций позволяет наложить на модель ЕЯ определенные ограничения, связанные, в частности, с уменьшением иерархии классов базовых понятий, что дает возможность избежать обработки значений слов, не используемых при описании программного обеспечения. По текстам спецификаций размером около 1,5 МБ, полученным от нескольких компаний-разработчиков программного обеспечения, на основе семантико-синтаксического словаря В. А. Тузова построен словарь, содержащий около 12 тыс. слов. Благо-

даря ограничениям предметной области удалось в нем упростить описание информации, что является существенным плюсом при пополнении и модификации. В силу этих причин построение структур предложения может основываться на системе приоритетов [6], что позволяет избежать экспоненциального роста количества переборных возможных связей слов от количества слов предложения.

Объекты текстовой информации в полученной адаптированной модели ЕЯ описываются существительными. Эта часть речи представлена как элемент, обладающий множеством характеристик, влияющих на связи с другими словоформами:

$$S^{(p1, p2, p3, p4)}$$

где $p1$ — падеж; $p2$ — число; $p3$ — род; $p4$ — одушевленность.

Связи существительного также можно представить в виде предиката:

$$S(Z1:Род, Z2:Дат, Z3:Вин, Z4:Тв, Z5:Пред).$$

В тексте существительные могут быть связаны между собой и составлять единый информационный объект [1, 7].

Каждое существительное обладает определенным набором признаков, которые позволяют идентифицировать его в тексте. Одной из частей речи, характеризующей существительное, является прилагательное. В отличие от существительного прилагательное характеризуется только множеством $\{p1, p2, p3\}$:

$$Pril^{(p1, p2, p3)}.$$

В адаптированной модели прилагательное зависит от характеристик существительного и уточняет обозначаемое им понятие. Его можно рассматривать как функцию над существительным:

$$Pril(S^{(p1, p2, p3, p4)}).$$

Числительные характеризуют количественно объекты предложения. Их синтаксическая роль состоит в уточнении или замене аргумента, подставляемого в функцию. В зависимости от вида эта часть речи может выступать в качестве самостоятельных объектов предложения или давать количественные характеристики существительных:

$$Chisl^{(p1, p2, p3)}.$$

Основой большинства предложений является глагол. Число аргументов глагольной функции конечно. Многие из них в значительной степени определяются семантикой других частей речи:

$$G(x1, \dots, xn).$$

Аргументы $x1, \dots, xn$ могут быть различными частями речи. В формальном языке глагол иден-

тифицирует собой действие. Формальное определение этого понятия имеет вид [1]

$$f(x1, x2, \dots, xn) = \{F; f1, f2, \dots, fm\},$$

где f — символ (идентификатор) действия; $x1, x2, \dots, xn$ — аргументы, являющиеся именами объектов и действий; F — последовательность суперпозиций базисных функций или уже описанных функций, выражающая сущность действия; fi — признаки этого действия [1].

В формализованных конструкциях ЕЯ роль глагольной функции заключается в связке аргументов. Общий шаблон глагольной функции можно представить в следующем виде:

$$G(Z1:Им, Z2:Род, Z3:Дат, Z4:Вин, Z5:Тв, Z6:Пред).$$

В любом глагольном предикате обязательно должно быть место для потенциального подлежащего — существительного или объекта на базе существительного в именительном падеже. В приведенном выше шаблоне — это аргумент $Z1$. Аргументы $Z2-Z6$ представляют собой объекты существительных предложения в различных падежах. Использование шаблонного описания глагола как основной функции предложения позволяет организовывать связи между словами внутри предложения.

Наречие — неизменяемая часть речи, которая в формализованном языке является функцией над глаголом или другими частями речи:

$$Nar(G(x1, \dots, xn)).$$

Аналогично прилагательным, большинство классов наречий также можно рассматривать как функции над глаголами. Поскольку любое действие (глагольная функция) характеризуется определенным набором признаков, то наречие соответствующего типа при взаимодействии с глаголом конкретизирует один из них.

Предлог — служебная часть речи, выражающая отношения между именем существительным, местоимением, числительным и словами других частей речи, а также между существительными. Предлоги, как и все служебные слова, не могут употребляться самостоятельно, они всегда относятся к какому-нибудь существительному (или слову, употребляемому в функции существительного). Они обслуживают управление как вид подчинительной связи, будучи связаны с управляющим компонентом словосочетания:

$$Predl(S^{(p1, p2, p3, p4)}).$$

Роль точки (.) однозначна: она всегда является знаком окончания конструкции. Аналогично точке на конец конструкции указывают восклицательный (!) и вопросительный (?) знаки. Двое-

точие (:) служит признаком того, что в конструкции участвуют несколько одинаковых аргументов, по типу соответствующих первому, стоящему до двоеточия. Более специфична роль запятой (,). С одной стороны, она служит признаком наличия в конструкции множества аргументов одного типа. С другой — уточняет и разделяет сложные аргументы. Вместо запятой может употребляться точка с запятой (;), играющая аналогичную роль в формализованном простом предложении.

Система приоритетов основывается на порядке взаимодействия конструкций, который в упрощенном виде состоит из последовательности шагов, приведенных ниже [6].

1. Присоединение подчиненных прилагательных к существительным. На этом шаге основная информация берется из морфологического описателя словоформы. При первом просмотре предложения слева направо ищутся ближайшие, согласующиеся по падежу, роду и числу, прилагательные и существительные. Так как прилагательное может находиться справа от существительного, то необходим аналогичный второй просмотр справа налево, во время которого осуществляется попытка присоединения оставшихся прилагательных, не вошедших в конструкцию.

2. Присоединение предлогов к конструкциям существительных и прилагательных. Особенностью шага является то, что предлог всегда находится слева от конструкции существительного. Основная информация для реализации свертки — это описатель предлога и морфологический описатель конструкции существительного. Информация по предлогу содержит падеж и семантический класс присоединяемого существительного, а также семантико-грамматический тип (например, *где?*, *куда?*), вырабатываемый при этом соединении.

3. Присоединение конструкций существительных к другим объектам проводится на основании анализа синтаксических и морфологических характеристик в предикатах левой и правой конструкций слева направо. Вне зависимости от описаний объекты существительных в родительном падеже присоединяются к конструкциям, стоящим слева.

4. Все созданные конструкции вставляются в предикат глагольной функции.

5. Наречия и собранные конструкции, не вошедшие в предикат глагола, приписываются к нему со своим семантико-грамматическим типом.

Следует отметить, что русский язык является довольно регулярным, и исключения из правил составляют не более 10 %.

Причастные, деепричастные обороты, подчиненные предложения, начинающиеся со слова *который*, отделяются перед анализом. Над ними

отдельно выполняются описанные выше шаги, а затем полученные конструкции присоединяются к основному предложению.

Составные конструкции типа *если ... то, ни ... ни*, вложенные предложения, начинающиеся с вопросительных союзов *что, где, когда, какой, который* и т. п., союзами *чтобы, хотя* и т. п., анализируются абсолютно так же, как соответствующие конструкции в языках программирования. Например, при анализе конструкций типа *если ... то* слово *если* управляет сборкой сначала первой части предложения, потом присоединяет ее в качестве своего первого аргумента, после чего повторяет то же самое со второй частью предложения, сохраняя в качестве разделителя союз *то* [1].

Полученный анализатор позволяет адекватно вычислять около 85 % структур конструкций.

Обработка информации таким анализатором осуществляется на трех уровнях: морфологическом, синтаксическом, семантическом. Причем для текстов спецификаций семантический уровень представлен 18 классами, необходимыми для вычисления семантико-грамматического типа (СГТ). Ниже приведен вид получаемой структуры.

До исполнения Теста камеры Приложение должно предоставить пользователю описание этого Теста.

<i>N слова</i>	<i>Разбор</i>	<i>СГТ</i>
007	<i>должно предоставить</i>	[Глагол]
002	<i>До исполнения</i>	[доКогда]
003	<i>Теста</i>	[Чего]
004	<i>камеры</i>	[наЧто]
005	<i>Приложение</i>	[Что]
008	<i>пользователю</i>	[Кому]
009	<i>описание</i>	[Что]
011	<i>Теста</i>	[Чего]
010	<i>этого</i>	[Какого]

Анализируя полученные структуры на базе спецификаций, описывающих продукционные правила, можно выделить следующие составляющие [4]: *условие — объект — действие*.

Объект спецификации — это подлежащие предложения спецификации. Внутри структуры спецификации объектом является любое существительное.

Действие — это глагол со своей группой. Группа глагола определяется структурой графа предложения.

Условие выделяется на основе слов-идентификаторов и семантико-грамматических связей (*если, то, когда* и т. д.).

Используя систему описаний можно автоматически преобразовать предложения спецификации в следующий вид:

<УСЛОВИЕ: До исполнения Теста на камеру >

<ДЕЙСТВИЕ: должно предоставить <<Приложение>>

пользователю описание Теста этого
<ОБЪЕКТ: <<Приложение>> >

Рассмотрим выделенный объект предложения спецификации. <<Приложение>> обладает своими свойствами и методами. С одной стороны, свойства и методы можно рассматривать как модульные процедуры, для которых имеются стандартные наборы параметров в различных инструментальных средах программирования (например, VC++, VC++ Builder). С другой стороны, возможно построение этого объекта в ходе «чтения» спецификаций. Причем в этом случае можно выделить взаимосвязанные параметры. Например, анализ объекта <<Приложение>> в перечисленных спецификациях позволяет получить следующее описание:

<ОБЪЕКТ: << Приложение >>
ПАРАМЕТР-УСЛОВИЕ1: До исполнения Теста камеры;
ПАРАМЕТР-УСЛОВИЕ2: Во время исполнения Теста камеры;
< ДЕЙСТВИЕ1: должно предоставить пользователю описание Теста этого >
< ДЕЙСТВИЕ2: должно выдать пользователю подсказку > >

Обозначив действия как процедуры, а параметры — в виде булевых переменных, можно автоматически генерировать псевдообъект:

```
class App
{ bool par1;//ПАРАМЕТР-УСЛОВИЕ1:До исполнения Теста камеры
  bool par2;//ПАРАМЕТР-УСЛОВИЕ2:Во время исполнения Теста
  камеры;
  obj action1();//<ДЕЙСТВИЕ1: должно предоставить
                // пользователю описание Теста этого>
  obj action2();//<ДЕЙСТВИЕ2: должно выдать пользователю
                //подсказку>
};
```

Объекты, заданные условиями, определяют внешние связи между объектами спецификаций. Состояние параметров, идентифицирующих условия, могут быть использованы для выбора действия спецификации:

```
IF(Тест.выполняется == true)
{
  par2=true;
  App_.action2(par2);
}
```

Предложение спецификации в виде продукционного правила задает некоторую функцию со

своими входными и выходными параметрами в виде объектов и их свойств и условием выполнения этой функции.

Если упорядочить последовательность спецификаций и считать, что каждое предложение описывает одну логически законченную функцию, то возможен вариант автоматически создаваемого кода каркаса приложения:

```
App_.initialization();
While(App_.param_n== true)
  Switch(App_.condition)
{
  case 1: App_.action1(par1); break;
  case 2: App_.action2(par2); break;
  ...
  case N: App_.actionN(parN); break;
  default :
}
```

В приведенном примере вначале выполняется блок инициализации приложения. Затем приложение входит в цикл анализа текущего состояния, где в зависимости от текущих условий выполняются функции.

Детализацию анализа предложений спецификаций можно продолжать и дальше, идентифицируя объекты с помощью словарей линейки синонимичных понятий, которым ставится в соответствие нужный кодовый шаблон.

В заключение необходимо отметить, что в статье приведен подход к автоматическому преобразованию текстовой информации спецификаций, разработанный в рамках НИР [4]. Однако даже на таких примерах можно убедиться, что с помощью автоматического анализа текстовой информации реально не только вычислять объекты и их связи, но и создавать правила обработки, основанные на использовании системы морфологических, синтаксических и семантических характеристик естественно-языковых конструкций. Рассмотренные примеры преобразования спецификаций в шаблоны кода требуют ограничений на представление естественно-языковых предложений, но показывают возможность организации управляющих правил для преобразования получаемых структур текстовой информации.

Литература

1. Сокирко А. В. Первичный семантический анализ // АОТ. Технологии. Первичный семантический анализ. <http://www.aot.ru/docs/seman.html>
2. Плешко В. В., Ермаков А. Е., Голенков В. П. RCO на РОМИП 2004 // Тр. Второго российского семинара РОМИП'2004. Пущино, 1 октября 2004 г. / НИИ химии СПбГУ. СПб., 2004. С. 43–61.
3. Тузов В. А. Компьютерная семантика русского языка. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. — 400 с.
4. Разработка концептуальных основ проектирования информационных систем: отчет о НИР (промежуточ.) / СПбГУ; рук. Г. А. Ботвин. — СПб., 2008. — 211 с.
5. Котляров В. П., Юсупов Ю. В., Швецов В. В. Метод предсказания количества регрессионных тестов с учетом изменений исходного кода // XXXII неделя науки СПбГПУ: Материалы межвуз. науч.-техн. конф., 24–29 ноября 2003 г. Ч. V. СПб., 2004. С. 19–20.
6. Лебедев И. С. Построение семантически связанных информационных объектов текста // Прикладная информатика. 2007. № 5 (11). С. 83–89.
7. Лебедев И. С. Способ формализации связей в конструкциях текста при создании естественно-языковых интерфейсов // Информационно-управляющие системы. 2007. № 3. С. 23–26.

УДК 004.05

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

В. В. Бураков,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Описывается система управления качеством программ. Перечислены и кратко описаны формальные модели, образующие основу системы, обоснована их значимость на каждом этапе цикла управления качеством. Приведен алгоритм работы системы, обеспечивающий мониторинг показателей качества и улучшение этих показателей путем изменения структуры программы.

Ключевые слова — качество программ, управление качеством программ.

Введение

Среди типов программ бортовые программные средства (ПС) выделяются особыми требованиями к гарантии заданной степени качества. Для проектов по созданию бортовых ПС особую важность имеет задача мониторинга на всех этапах жизненного цикла показателей качества разрабатываемого программного продукта. Таким образом, для подобных проектов особую актуальность приобретает задача разработки системы управления качеством, в основу работы которой необходимо положить набор формальных моделей и алгоритмов. В настоящий момент существует несколько стандартов разного уровня, регламентирующих работу с качеством ПС (например, [1]), тем не менее отсутствует формальная система для управления качеством, детально задающая этапы работ по обеспечению качества, а также виды и способы обработки данных, которые имеют значение на каждом этапе.

В предлагаемой статье дано описание разработанной формальной системы управления качеством ПС, цель которой состоит в обеспечении оценки и улучшения качества ПС в соответствии с заданной моделью качества.

Структура системы управления качеством программных средств

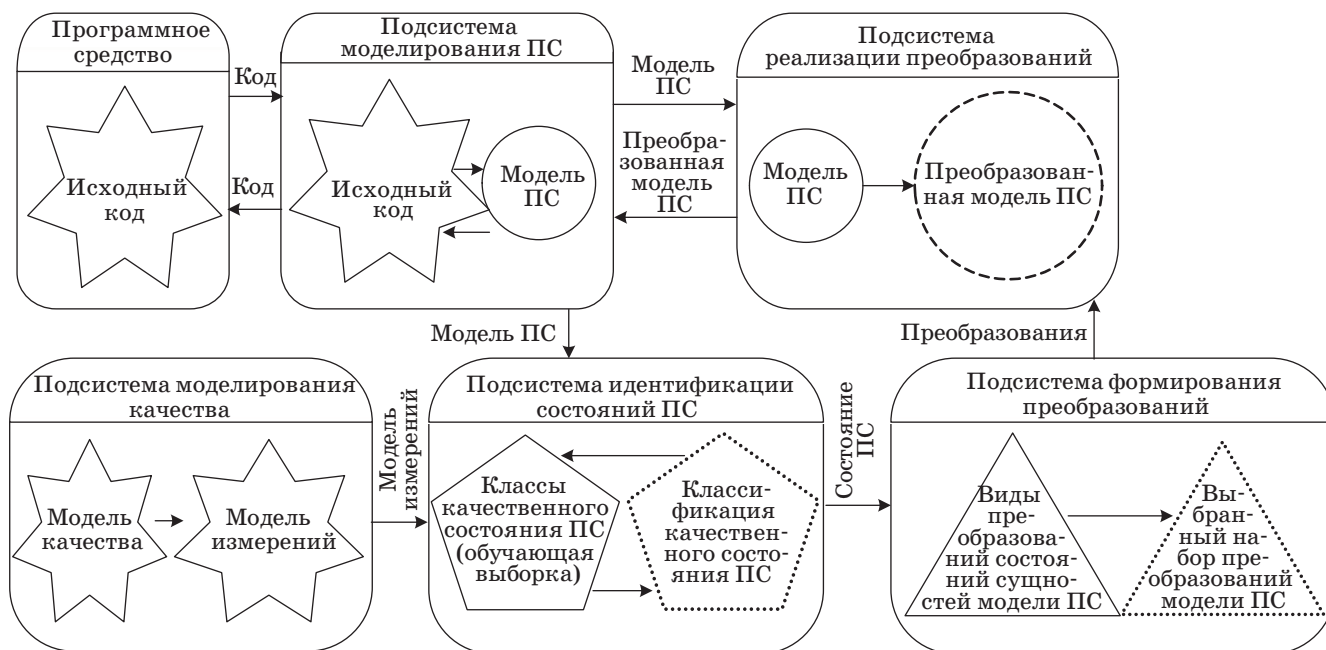
Объектом управления системы является модель ПС, модель качества формирует внешнюю среду. В общем виде компоненты системы управления качеством и их взаимодействие показаны на рис. 1.

Согласно принципам описываемой технологии, исходный код является основой ПС, и имен-

но путем анализа исходного кода, выявления его дефектов и генерации нового кода обеспечивается улучшение качества ПС.

Исходный код поступает на вход подсистемы моделирования ПС, в которой происходит генерация модели ПС. В этой модели для представления кода ПС используется теория графов в силу наглядности и простоты описательных механизмов и потенциально неограниченных возможностей по адаптации моделей к задачам описания (изменение уровня детализации) и к описываемым сущностям ПС (моделирование сущностей и связей с помощью введения типов вершин и ребер) [2]. Базовые понятия теории графов расширяются для моделирования ПС с помощью введения меток для идентификации вершин и ребер и ролей для задания прецедентов использования сущностей ПС. Для адекватного соотнесения вершин и ребер графа с моделируемыми сущностями ПС вводится специальный тип метаграфов — типовые графы. Стадию моделирования предваряет стадия адаптации. Для адаптации графовой модели к задачам описания и предметной области необходимо типизировать вершины и ребра, построить множества типовых графов.

Подсистема моделирования качества предназначена для создания модели качества и модели измерений ПС. Для моделирования качества используется теория категорий, в качестве объектов разработанной категории качества используются характеристики, подхарактеристики качества ПС и принципы проектирования ПС [2]. В качестве морфизмов — строгие и нестрогие иерархические морфизмы для определения связей между разноуровневыми элементами модели и одноуровневые морфизмы для моделирования



■ Рис. 1. Общая структура системы управления качеством ПС

взаимовлияний элементов одного уровня иерархии. Категория качества ПС не задает конкретную интерпретацию объектов качества, а предоставляет инструменты для определения и последующего использования любых понятий, имеющих отношение к качеству ПС. Категория качества ПС содержит все возможные объекты качества со всеми возможными связями между ними. Для создания модели качества, соответствующей определенному стандарту или проекту, определяется подкатегория, в которую выбираются нужные подмножества объектов и морфизмов качества. Модель измерений предназначена для формализации сущностей, участвующих в измерении понятий, которые выражены в модели качества [3]. Ключевыми артефактами измерений в модели служат метрики. Метрики качества ПС бывают двух видов: базовые, не зависящие ни от каких других метрик, и производные, являющиеся выражением функциональной зависимости от других базовых и производных метрик. Вместе с графовыми моделями, представляющими множество моделей ПС, которые обладают одинаковой функциональностью, но отличаются структурой, базовые и производные метрики образуют множество метрических пространств. Для отражения зависимости одних производных метрик от других производных или базовых на метрических пространствах, сформированных моделями ПС и метриками качества ПС, вводится множество операторов комплексирования. Категория измерений ПС представляется в виде малой категории, объектами которой являются метриче-

ские пространства, образованные моделями ПС и метриками качества ПС, а морфизмами — операторы комплексирования. Для отображения объектов категории качества (характеристик, подхарактеристик, принципов проектирования) на метрические пространства категории измерений (базовые и производные) вводится контравариантный одноместный функтор. Задачей такого отображения является генерация модели измерений, соответствующей по своей структуре модели качества и представляющей основу для ее количественной оценки.

К задачам подсистемы идентификации состояний ПС относятся определение значений метрик на основе модели метрик и модели ПС и определение состояния ПС и его компонент на основе значений метрик с использованием методов классификации и теории принятия решений.

Задачей подсистемы формирования преобразований является определение оптимального набора преобразований на основе состояния ПС с использованием методов классификации и теории принятия решений.

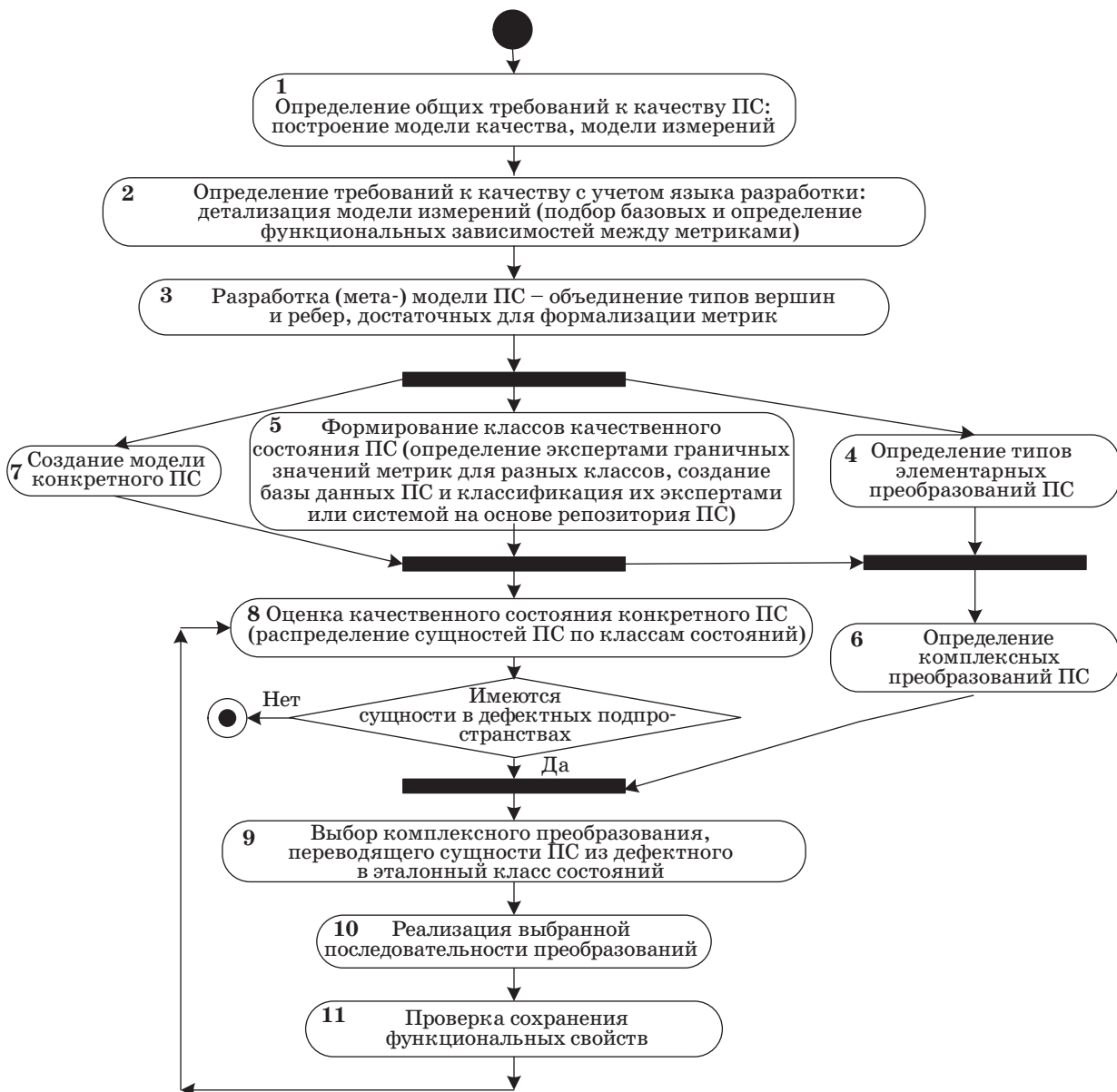
В подсистемах идентификации состояния и формирования преобразований применяются алгоритмы классификации и принятия решений. Идентификация состояния ПС представляет собой принятие решения о принадлежности этого состояния к определенной классификационной категории. Формирование преобразований представляет собой принятие решения, состоящее в выборе набора преобразований ПС, оптимального по определенному критерию.

Задачей подсистемы реализации преобразований является выполнение преобразований над графовой моделью ПС [4]. Преобразование ПС описывается в виде графовой продукции, в левой части которой находятся те вершины и ребра, которые должны иметься в исходном графе, а в правой части — то, как эта часть графа будет выглядеть после применения продукции, частичный морфизм описывает отношения объектов левой части к правой, детализируя процесс применения правила. На базовых метрических пространствах из модели измерений вводятся базовые операторы преобразований. Назначение базовых операторов состоит в изменении значений базовых метрик путем преобразования графовой мо-

дели ПС. Во множество таких операторов входят операторы добавления и удаления вершины (ребра) для всех типов вершин и ребер. На производных метрических пространствах вводятся производные операторы преобразований, которые изменяют значения производных метрик. Производные операторы соответствуют составным преобразованиям.

Алгоритм функционирования системы управления качеством программных средств

Рассмотрим этапы алгоритма управления качеством ПС (рис. 2) более подробно.



■ Рис. 2. Алгоритм управления качеством ПС

Шаг 1. На шаге 1 происходит детализация понятия качества ПС. Выбираются характеристики качества, определяются принципы проектирования. Строится модель качества, включающая характеристики и принципы проектирования как объекты. С помощью морфизмов модели качества отражаются иерархические и одноуровневые отношения между характеристиками и принципами проектирования. С помощью контравариантного функтора из модели качества формируется модель измерений, в которой каждой характеристике, подхарактеристике, принципу проектирования модели качества соответствует производная метрика. Все эти работы реализуются обобщенно, без учета конкретной специфики проекта.

Шаг 2. На основе анализа конструкций языка программирования или моделирования экспертами определяются базовые метрики, подходящие для оценки производных метрик. В дальнейшем использованные для определения базовых метрик языковые конструкции ложатся в основу типов вершин и ребер графовой модели ПС. Объекты модели метрик дополняются этими базовыми метриками. Экспертами детализируются морфизмы модели измерений для задания функциональных зависимостей между объектами модели метрик.

Шаг 3. На основе анализа модели качества выбираются значимые сущности и отношения ПС, которые становятся типами вершин и ребер. Важно отметить, что отсутствует необходимость моделировать все конструкции языка, модель ПС должна описывать только те из них, которые соответствуют оценке качества в соответствии с определенной моделью качества. Решение о составе множества языковых конструкций, подлежащих моделированию, принимается на основе модели метрик при определении набора базовых метрик для оценки производных.

Шаг 4. Формируется перечень элементарных преобразований, базис которых представляет собой удаление и добавление вершины или ребра каждого типа. Дополнительно могут определяться такие операции, как переименование, изменение типа и другие преобразования ПС.

Шаг 5. Информация о модели метрик, ПС и элементарных преобразованиях поступает на вход подсистемы обучения с учителем. Экспертами сообщаются системе диапазоны значений метрик для всех типов программных сущностей. Выбираются шкалы оценки состояний (например, «эталонное», «дефектное»). На вход системы также могут быть поданы ПС, состояние качества которых заранее известно, таким образом формируется репозиторий ПС. Система анализирует значения метрик программных сущностей этих ПС.

Эксперты анализируют и корректируют результаты анализа ПС системой. Таким образом формируется обучающая выборка, которая обрабатывается обучающим алгоритмом, на основе чего формируются решающие правила (классы состояний ПС, отражающие весь спектр будущих возможных состояний).

Шаг 6. На основе метамодели на шаге 4 формируются элементарные преобразования, которые здесь комбинируются в комплексные. Каждое комплексное преобразование соответствует приведению сущности ПС из одного класса состояний в другое.

Шаг 7. На основании определенных типов вершин и ребер строится модель ПС, качество которой подлежит оценке.

Шаг 8. Осуществляется применение решающих правил, выработанных на шаге 5.

Шаг 9. Из сформированных на шаге 6 типов преобразований выбирается комплексное преобразование или их композиция, которая сможет перевести сущности ПС, находящиеся в классе состояний, который был оценен как дефектный, в класс эталонного состояния. Комплексное преобразование ищется на основе операторов того метрического пространства, метрика которого ниже эталонной. Это комплексное преобразование проходит процедуру оптимизации, состоящую в выборе за счет операторов комплексирования и процедуры нормализации минимально ресурсоемкой, потенциально менее опасной композиции элементарных преобразований.

Шаг 10. На данном шаге происходит реализация выбранного на шаге 9 комплексного преобразования или их композиции.

Шаг 11. Осуществляется путем запуска пакета тестов, состав которого позволяет сделать вывод о том, что осуществленные преобразования не повлияли на функциональные свойства ПС.

Шаг 12. Повтор шагов 7–11 до тех пор, пока качественное состояние ПС не будет соответствовать эталонному.

Шаг N. Верификация решающих правил.

Верификация решающих правил основана на использовании внутреннего критерия качества алгоритма классификации и может быть выполнена в любой момент, например по требованию экспертов, в обязательном порядке — после каждой адаптации к изменению модели качества. Для выполнения данной функции обучающая выборка копируется в классифицируемую, осуществляется ее автоматическая классификация, ее результаты сравниваются с независимой экспертной классификацией, на основе чего рассчитываются показатели качества решающих правил.

Программная реализация разработанных в системе принципов была испытана в реальном проекте по созданию ПС. Коллективом экспертов после анализа результатов работы системы был отмечен положительный эффект от ее использования, в частности:

1) увеличилась полнота реализации принципов проектирования за счет инструментов разработки производных метрик, соответствующих тому или иному принципу проектирования, с последующим мониторингом значений этих метрик;

2) повысилась оперативность работ по управлению качеством программных средств за счет автоматизации процессов поиска дефектов и выполнения преобразований программ;

3) уменьшились совокупные затраты на разработку за счет контроля соответствующей группы метрик (например, подхарактеристик показателя «удобство сопровождения»).

Выводы

Разработанная система управления качеством служит для мониторинга показателей качества и улучшения этих показателей путем изменения структуры ПС. Система управления качеством базируется на строгих математических моделях, формально определяет процессы обеспечения качества, виды и способы обработки данных, которые имеют значение на каждом этапе.

Литература

1. ISO/IEC, ISO/IEC 25000: Software Engineering — Software Product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Guide to SQuaRE. Geneva: International Organization for Standardization, 2005. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=35683
2. Бураков В. В. Концептуальное моделирование качества программных средств // Авиакосмическое приборостроение. 2008. № 7. С. 54–60.
3. Бураков В. В. Методика оценки качества программных средств // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 1. С. 35–41.
4. Бураков В. В. Формальный базис преобразований программных средств // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2008. Вып. 2. С. 22–30.

УДК 621.38

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ АНТИКОЛЛИЗИИ ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НА ПАВ

А. С. Койгеров,
аспирант

С. А. Забузов,

канд. техн. наук

В. Ф. Дмитриев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматривается корреляционный метод решения задачи антиколлизии для радиомаркеров на поверхностных акустических волнах. Предлагается алгоритм поиска оптимальных кодовых последовательностей маркеров. Приводятся результаты анализа автокорреляционных и взаимно корреляционных функций модифицированных последовательностей максимальной вероятности. Определено максимально возможное число кодов для 16-значных последовательностей с заданными корреляционными свойствами.

Ключевые слова — радиочастотная идентификация, радиомаркеры на ПАВ, коллизия, корреляционный метод, согласованный фильтр, последовательности максимальной вероятности, автокорреляционная функция, взаимно корреляционная функция.

Введение

В последние годы одним из перспективных и бурно развивающихся направлений радиоэлектроники стала радиочастотная идентификация (**Radio Frequency Identification — RFID**). Области ее применения являются маркировка грузов и багажа, прослеживание маршрутов разных грузов и объектов, скрытая маркировка контейнеров и автомобилей, инвентаризация товаров на складах и т. д.

Радиомаркеры (транспондеры, радиометки) на поверхностных акустических волнах (ПАВ) обладают рядом преимуществ перед другими технологиями бесконтактной идентификации и хорошо известны: это работа по радиоканалу при отсутствии встроенных источников питания у маркеров; большая дальность действия, высокое быстродействие, малые масса и габариты, высокая радиационная стойкость, широкий диапазон рабочих температур, практически неограниченный срок службы маркеров [1, 2].

Применения систем **RFID** с маркерами «только чтение» [3] вполне достаточно для систем кон-

троля и учета объектов хранения. Однако возникает необходимость избирательного взаимодействия считывателя с маркерами, находящимися одновременно в зоне опроса считывателя. Каждый из маркеров, попавших в зону опроса, будет отвечать, и модулированные сигналы от них одновременно появятся на входе считывателя, искажая друг друга. Это явление называется коллизией [3]. При коллизии данных на входе считывателя последний не получит от радиометок достоверной информации. Поэтому считыватель и маркеры должны быть спроектированы таким образом, чтобы была возможность применить антиколлизии процедуры [3].

Антиколлизии алгоритмы, используемые в системах **RFID**, сходны со способами разрешения конфликтных ситуаций множественного коммуникационного доступа [4]. Наиболее общими классификационными признаками для антиколлизии методов являются пространство, частота и время [4].

В случае пространственных алгоритмов метки обычно локализуются в пространстве таким образом, чтобы обеспечивалось их последователь-

ное считывание. Это достигается изменением зоны считывания или, в случае пассивных меток, вариацией мощности, излучаемой считывателем. Основной проблемой пространственных методов является сложность достижения высокой точности определения дальности. Требования к точности определения дальности еще более возрастают с увеличением числа меток в зоне действия считывателя и, соответственно, уменьшением расстояния между ними [4].

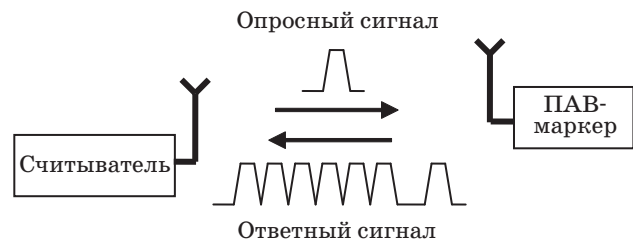
Такие антиколлизийные алгоритмы как в системах FDMA (Frequency Domain Multiple Access), TDMA (Time Division Multiple Access), CDMA (Code Division Multiple Access) можно реализовать в системах RFID с чиповыми метками [4]. В случае использования систем радиочастотной идентификации на ПАВ возникают трудности, обусловленные топологией и конструкцией ПАВ-радиомаркеров. Отметим, что поскольку ПАВ-радиомаркер имеет уникальный код, который закладывается внутри топологии ПАВ-устройства при его изготовлении, то метод временного разделения, при котором используется различная начальная задержка сигнала и который можно применить для частного случая, будет обеспечивать решение проблемы только при общем числе маркеров в несколько десятков. Это ограничение связано с увеличением габаритов подложки, что вызывает технологические трудности при изготовлении и ведет к удорожанию маркеров. Использование частотного разделения потребует высокостабильных генераторов и селективных полосовых фильтров.

Для выделения и идентификации отдельного маркера можно применить модифицированный множественный доступ с кодовым разделением, использующий метод корреляционной обработки сигналов. Работа ПАВ-маркера рассматривается на примере работы согласованного фильтра, который выполняет сжатие входного опросного сигнала. Общий принцип применения согласованной фильтрации в системах RFID был предложен в работе [1].

В данной работе решена задача определения уникальных кодовых последовательностей маркеров, обладающих заданными корреляционными свойствами. При этом число уникальных кодовых комбинаций должно быть максимально возможным.

Принцип работы маркера в составе системы радиочастотной идентификации

В последнее время ПАВ-устройства используются как идентификаторы и датчики, не требующие источников питания и работающие по радиоканалу.

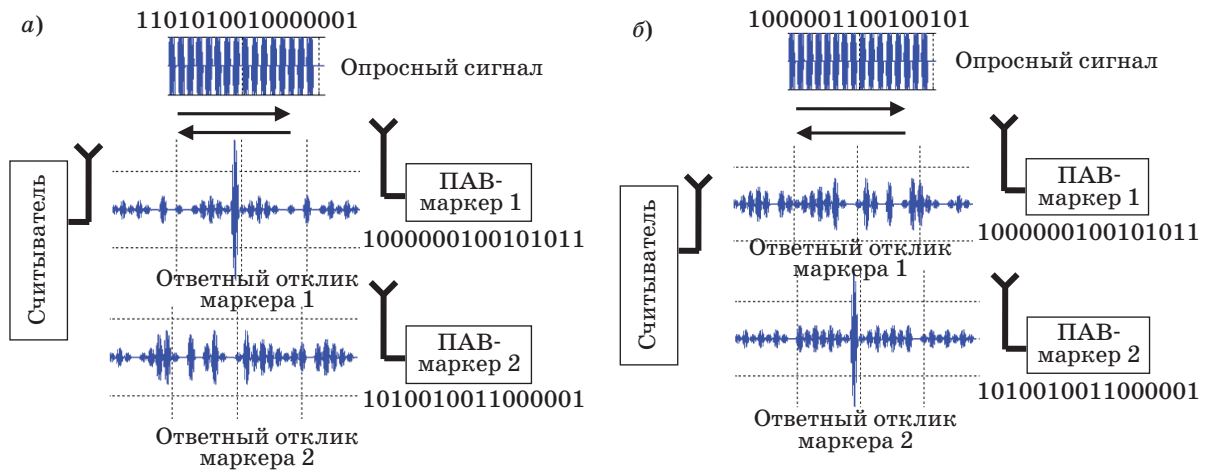


■ Рис. 1. Традиционная система радиочастотной идентификации на ПАВ

Традиционная система радиочастотной идентификации на ПАВ (рис. 1) состоит из считывателя (передатчик/приемник), антенны считывателя и ПАВ-маркеров. Высокочастотный радиоимпульс опроса, периодически генерируемый считывателем, излучается антенной считывателя. Если маркер расположен в зоне опроса считывателя, часть излучаемой энергии принимается антенной маркера и поступает на входной встречно-штыревой преобразователь (ВШП). ВШП преобразует электромагнитный сигнал в поверхностную акустическую волну, которая распространяется по поверхности пьезокристаллического звукопровода. Для преобразования большего количества принятой маркером электромагнитной энергии в акустическую необходимо, чтобы частота излучения считывателя соответствовала частоте колебаний поверхностной волны, генерируемой ВШП [1]. Если ПАВ-устройство маркера построено по схеме с отражающими структурами, то часть энергии поверхностной волны отражается от каждого рефлектора и движется обратно к входному ВШП. Таким образом, из одного импульса опроса формируется несколько ответных импульсов, причем каждый рефлектор создает в ответном сигнале маркера свой импульс [3]. Эта последовательность импульсов, полученная входным ВШП и преобразованная в высокочастотную последовательность электромагнитных импульсов, переизлучается антенной маркера и может быть принята считывателем. Число принимаемых импульсов соответствует числу рефлекторов на звукопроводе [3].

Решение задачи антиколлизии в составе системы RFID с использованием корреляционной обработки

Рассматриваемая RFID-система основана на корреляционном методе. В данном случае ПАВ-радиомаркер будет состоять из антенны и подсоединенного к ней согласованного фильтра, выполняющего сжатие входного сигнала. Импульсный сигнал опроса представляет собой «зеркальный» во времени код маркера, идентифицировать кото-



■ Рис. 2. Принцип построения и работа системы RFID с использованием корреляционной обработки: а — опросный сигнал «зеркален» коду маркера 1; б — опросный сигнал «зеркален» коду маркера 2

рый необходимо. Для получения уникальных кодовых последовательностей используется бифазное кодирование. Считыватель последовательно опрашивает группу пассивных маркеров, находящихся в зоне считывания.

При этом отвечают все маркеры, попавшие в зону опроса. Ответный сигнал представляет собой импульс, образующийся при отражении опросного сигнала от маркера. После приема ответных сигналов производится их детектирование по амплитуде и сравнение их уровней с заранее выбранным пороговым уровнем. При выявлении сигнала, превышающего пороговый уровень, делается вывод о наличии разыскиваемого маркера в группе, идентификационный код которого зеркален с кодом, содержащимся в сигнале опроса. Другими словами, считыватель получает сигналы, которые представляют собой множество взаимно корреляционных функций (ВКФ), и лишь один из них будет являться автокорреляционной функцией (АКФ) искомого сигнала. В результате обработки принятой информации считыватель «принимает решение» об идентификации данного маркера по превышению заданного порогового уровня сигнала. Последовательно повторяют эти операции для всех маркеров, содержащихся в данной группе [1].

В опросном сигнале кодируется начальная фаза импульсов кодовой последовательности. Как видно из рис. 2, а считыватель посылает опросный импульс, который является «зеркальным» во времени кодом ПАВ-маркера 1. Первый маркер отвечает корреляционным пиком, в то время как второй маркер отвечает псевдослучайным сигналом. Для другого случая (рис. 2, б) картина обратная, поскольку опросным сигналом является «зеркальный» во времени код ПАВ-маркера 2.

Маркер как согласованный фильтр

Принцип работы маркера можно рассмотреть на примере согласованного фильтра фазоманипулированного (ФКМ) сигнала [5] (рис. 3). Входной ВПП является однородным. Выходной ВПП состоит из идентичных отводов, которые подключены к суммирующим шинам таким образом, чтобы кодировать данные транспондера. Кодирование осуществляется с помощью начальных фаз импульсов, которые принимают только два состояния — «0» и «π», таким образом осуществляется работа с фазоманипулированными сигналами [6]. От фазоманипулированных сигналов можно перейти к кодовым последовательностям с символами «1» и «0».

Сигнал опроса $S1(t)$ (рис. 4) представляет собой «зеркальный» код маркера, он же — сигнал на входном ВПП.

Импульсная характеристика входного ВПП $h1(t)$ показана на рис. 5.

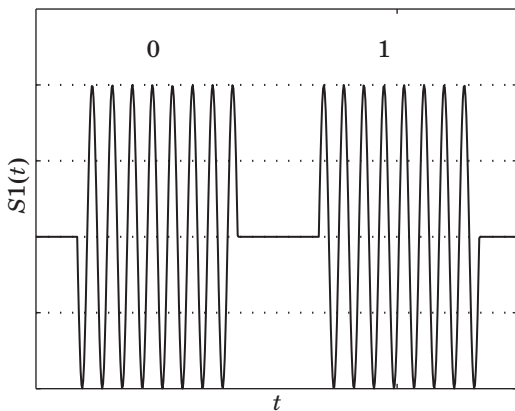
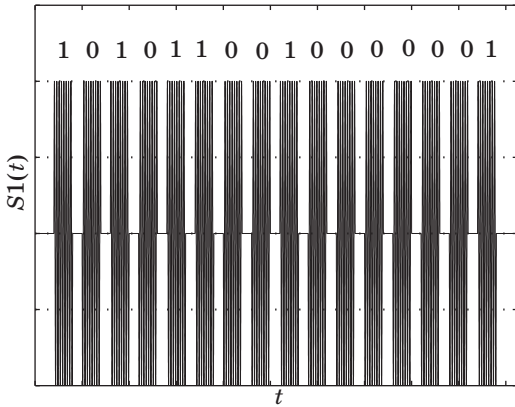
Сигнал $S2(t)$ после прохождения через входной ВПП можно описать как [7]

$$S2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S1(\tau)h1(t - \tau) d\tau.$$

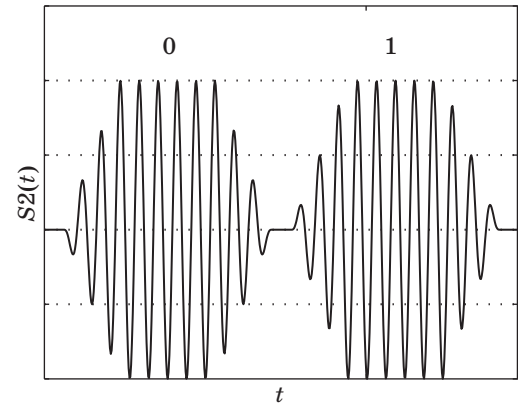
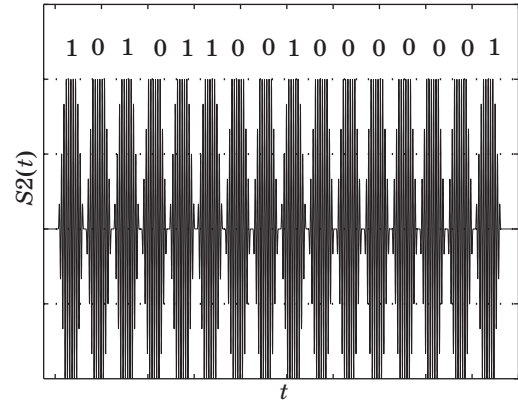
У сигнала $S2(t)$ (рис. 6) наблюдается затяжка фронтов импульсов, что обусловлено конечной длиной входного преобразователя.



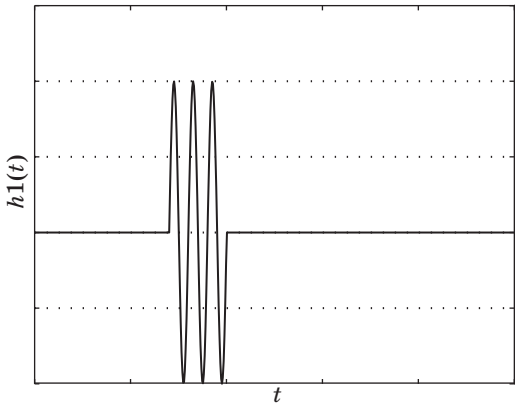
■ Рис. 3. Согласованный фильтр ФКМ-сигнала



■ Рис. 4. Сигнал $S1(t)$ на входном ВПП



■ Рис. 6. Сигнал $S2(t)$ после прохождения через входной ВПП



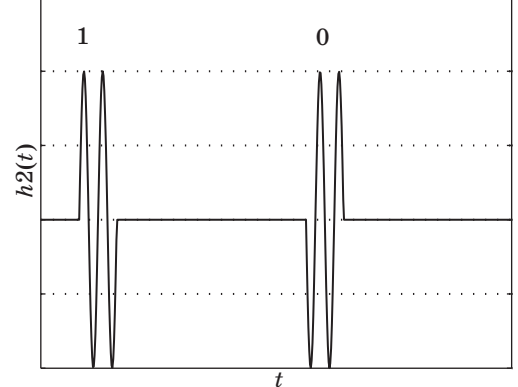
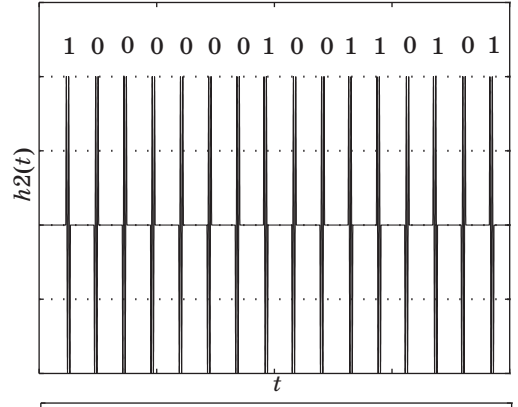
■ Рис. 5. Импульсная характеристика входного ВПП $h1(t)$

Импульсная характеристика выходного ВПП $h2(t)$ показана на рис. 7.

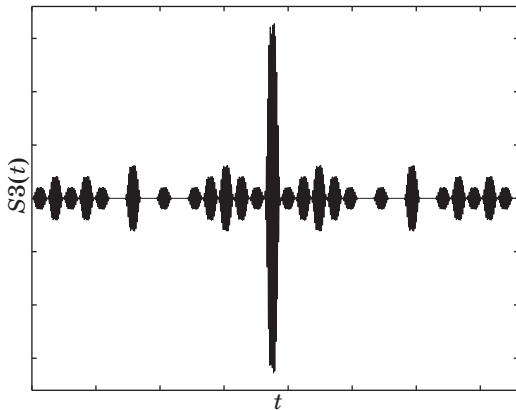
Выходной сигнал $S3(t)$ можно описать следующим образом [7]:

$$S3(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S2(\tau)h2(t - \tau)d\tau.$$

Выходной сигнал $S3(t)$ (рис. 8) представляет собой сжатый по времени импульс, в данном слу-



■ Рис. 7. Импульсная характеристика выходного ВПП $h2(t)$



■ Рис. 8. Выходной сигнал $S3(t)$

чае он близок к АКФ входного сигнала. Таким образом, если на вход согласованного фильтра ФКМ-сигнала подать кодированный ФКМ-сигнал, который представляет собой «зеркальный» во времени код фильтра, то выходной сигнал фильтра будет сжат приблизительно в 16 раз (в данном случае используется 16-значный код), и амплитуда выходного сигнала будет больше амплитуды входного в ~16 раз (без учета потерь). Используя такие фильтры в качестве радиомаркеров, можно распознавать устройства с любым нужным кодом среди множества устройств с другими кодами даже в присутствии значительного шума.

Концепция кодирования

Для работы системы RFID с использованием корреляционной обработки требуется, чтобы маркеры имели уникальные коды, обладающие «хорошими» корреляционными свойствами [6]. Таким образом, необходимо решить задачу — найти алгоритм определения идентификационных кодов, присваиваемых маркерам, из числа тех, которые имеют заданные корреляционные свойства.

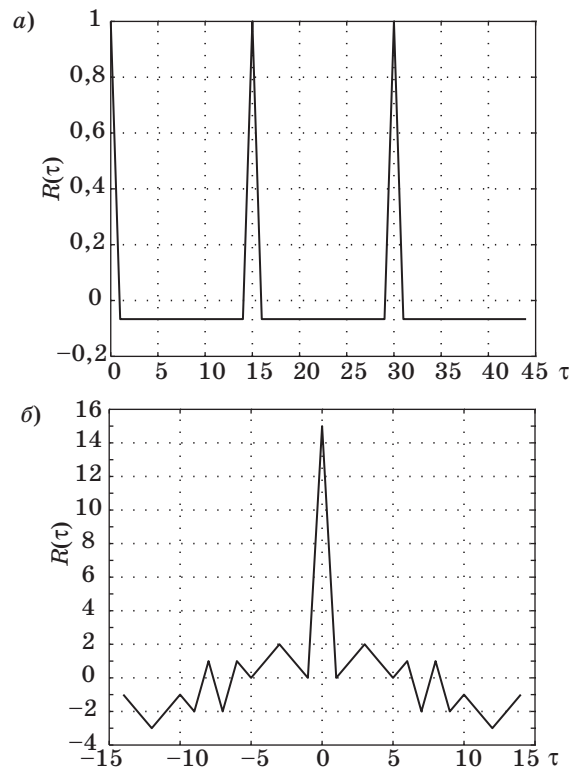
Автокорреляционные функции кодовых последовательностей должны иметь ярко выраженные пики (максимумы). Уровни боковых лепестков АКФ должны быть минимальными. Максимальная величина пика ВКФ не должна превышать некоторого порогового значения, что гарантирует минимальный уровень взаимных помех. Причем для конкретных задач (например, задач складирования) важно наличие большого числа маркеров, а значит и числа кодов.

Наилучшие автокорреляционные свойства имеют коды Баркера. Однако этими свойствами обладают только коды Баркера с числом символов в коде 3, 4, 5, 7, 11 и 13. Кодовые последова-

тельности, обладающие этими свойствами, для числа символов, больше 13, не найдены [6]. Максимум пика автокорреляции прямо пропорционален длине последовательности. Поэтому важно иметь максимально возможную длину кода.

Также следует заметить, что особое место занимают сигналы, кодовые последовательности которых являются последовательностями максимальной длины, или М-последовательностями [6]. В качестве примера рассмотрим АКФ М-последовательности $\langle 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0 \rangle$ (рис. 9, а, б).

М-последовательности обладают пиками автокорреляции, но число последовательностей ограничено, и их ВКФ не являются оптимальными. Из М-последовательностей можно получить последовательности Голда и Касами, но их количество тоже ограничено. Например, если рассмотреть М-последовательности, формируемые с помощью линейных переключательных схем на основе сдвигающих регистров [6], то даже для числа знаков $N = 63$ существует всего 6 различных последовательностей. А для этих М-последовательностей с периодом $N = 63$ можно найти 65 последовательностей Голда и 520 последовательностей Касами (в данном случае рассматривается большая система Касами [6]). Однако при рассмотрении их взаимно корреляционных свойств оказывается, что не все последователь-



■ Рис. 9. АКФ М-последовательности: а — периодическая; б — аperiodическая

ности будут удовлетворять ранее сформулированным требованиям.

Наиболее подходящими кодовыми последовательностями являются последовательности максимальной вероятности (ПМВ) [6], состоящие из блоков (рис. 10).

Каждый блок — это последовательность символов одного знака. Параметр N в данном случае — число бит (или знаков). У последовательностей с оптимальным числом блоков [6] M_0 боковые лепестки АКФ минимальны по сравнению с другими последовательностями. Для нечетного N [6]

$$M_0 = (N + 1)/2;$$

для четного N [6]

$$M_0 = N/2.$$

Блоки могут быть единичными (состоять из одного символа), двойными (состоять из двух символов) и т. д. Обозначим число блоков одинаковой длины k через y_k , причем длина блока равна числу символов в нем. Например, y_1 — число единичных блоков. На рис. 10 показаны блоки $k = 2$ и $k = 5$. Для последовательности длиной N , состоящей из M блоков, имеют место два равенства [6]:

$$N = \sum_{k=1}^{k_{\max}} k y_k; \quad (1)$$

$$M = \sum_{k=1}^{k_{\max}} y_k, \quad (2)$$

где k_{\max} — длина максимального блока.

Если последовательность имеет оптимальное число блоков M_0 , то среднее значение числа блоков длиной k может быть найдено как [6]

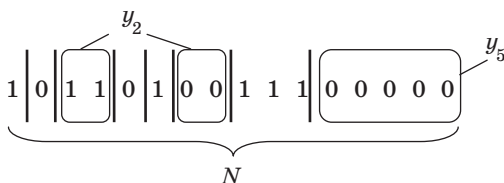
$$\bar{y}_k = M_0 2^{-k}. \quad (3)$$

Длина максимального блока [6]

$$k_{\max} = N - \sum_{k=1}^{k_0} k y_k,$$

где k_0 — длина блока, для которого $\bar{y}_k = 1$:

$$k_0 = \log_2 M_0.$$



■ Рис. 10. Структура кодовой последовательности длиной 16 бит

Результаты

В ходе исследования выполнен расчетный анализ АКФ и ВКФ последовательностей максимальной вероятности. Анализ производился, в основном, для 16-значных последовательностей. Структура последовательностей при оптимальном числе блоков представлена в табл. 1, откуда видно, что единичные блоки должны составлять примерно половину от общего числа блоков, двойные — четвертую часть, тройные — восьмую часть и т. д. Следует отметить, что число символов последовательности определяет равенство (1), число блоков — равенство (2), а число блоков длины k — равенство (3). При этом блоки чередуются. Число таких последовательностей определяется полиномиальным законом [6]:

$$L = \frac{M_0!}{\prod_{k=1}^{k_{\max}} y_k!}.$$

Для $N = 16$ число последовательностей $L = 840$.

Результаты анализа АКФ и ВКФ последовательностей максимальной вероятности представлены в табл. 2 в нормированном виде. В этой таблице показана зависимость числа кодов ПМВ от значения порогов боковых лепестков АКФ ($|R_{\max}|_{\text{АКФ}}/N$) и пиков ВКФ ($|R_{\max}|_{\text{ВКФ}}/N$). Рассматриваются последовательности, сформированные по двум правилам. Первая группа последовательностей имеет структуру с оптимальным числом блоков, значение которых удовлетворяет (3). Вторая группа последовательностей не удовлетворяет равенству (3), но в то же время равенства (1) и (2) выполняются. Существенные отличия лишь в простоте формирования.

Для примера рассмотрим три различные кодовые последовательности, сформированные на основе табл. 2:

A: 1 0 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0
 B: 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 0 0
 C: 1 0 0 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 1 1 0

Как видно, каждая последовательность состоит из 16 знаков (N) и имеет по 8 блоков (M_0): $y_1 = 4, y_2 = 2, y_3 = 1, y_5 = 1$.

■ Таблица 1

N	M_0	k_0	k_{\max}	Число блоков последовательностей
16	8	3	5	$y_1=4, y_2=2, y_3=1, y_5=1$
32	16	4	6	$y_1=8, y_2=4, y_3=2, y_4=1, y_6=1$
64	32	5	7	$y_1=16, y_2=8, y_3=4, y_4=2, y_5=1, y_7=1$

■ Таблица 2

Структура кодовой последовательности*	Порог АКФ $ R_{\max} _{\text{АКФ}}/N$	Число кодов с учетом порога АКФ	Порог ВКФ $ R_{\max} _{\text{ВКФ}}/N$	Число кодов с учетом порога ВКФ
$y_1 = 4$ $y_2 = 2$ $y_3 = 1$ $y_5 = 1$	0,25	353	0,375	4
			0,5	13
			0,625	42
			0,75	113
	0,375	741	0,375	5
			0,5	16
			0,625	51
			0,75	174
	0,5	837	0,375	5
			0,5	17
			0,625	50
			0,75	184
$y_1 = 4$ $y_2 = 1$ $y_3 = 2$ $y_4 = 1$	0,25	229	0,375	4
			0,5	13
			0,625	35
			0,75	89
	0,375	653	0,375	6
			0,5	15
			0,625	50
			0,75	180
	0,5	829	0,375	6
			0,5	17
			0,625	54
			0,75	187

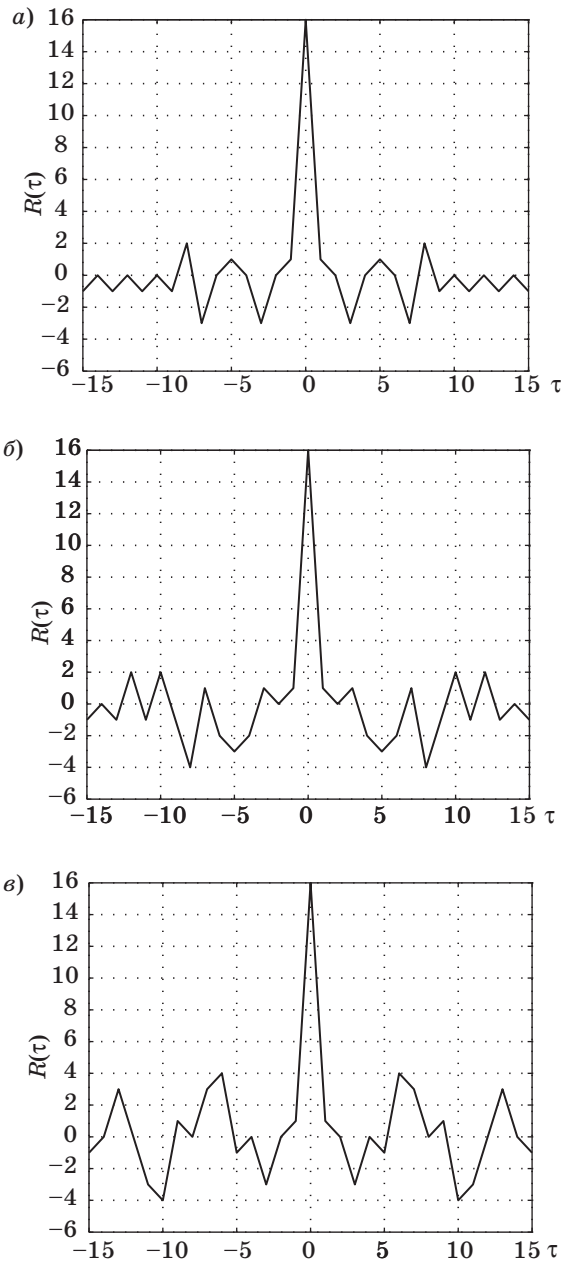
* Число кодов для каждой структуры кодовой последовательности — 840.

Автокорреляционные и взаимно корреляционные функции представлены в ненормированном виде (рис. 11, 12). АКФ имеют пики автокорреляции, пики ВКФ сравнимы с боковыми лепестками автокорреляционных функций. Малый уровень боковых лепестков говорит о решении проблемы коллизии между кодами.

Анализ 16-значных последовательностей показал, что статистическая характеристика модуля бокового пика АКФ

$$\left((R_{\max}|_{\text{АКФ}})_{\text{норм}} \sqrt{N} = \left(\frac{|R_{\max}|_{\text{АКФ}}}{N} \right) \sqrt{N} \right)$$

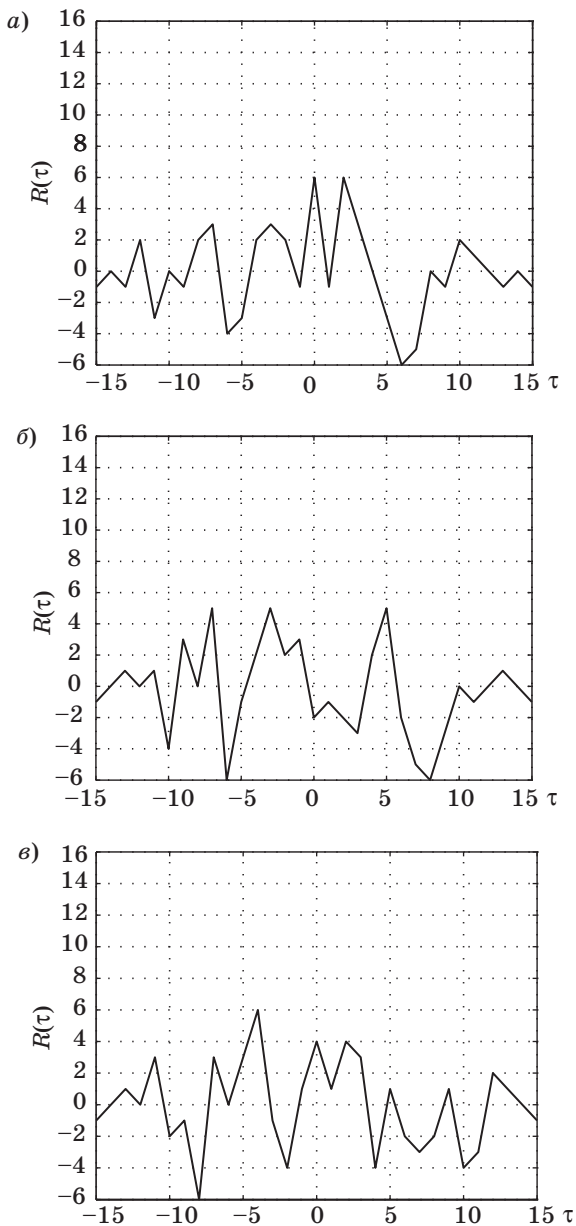
составляет 0,75–2. В результате эти цифры характеризуют превышение $|R_{\max}|_{\text{АКФ}}$ уровня $1/\sqrt{N}$, т. е. в данном случае максимальный боковой пик превысит уровень $1/\sqrt{N}$ в 2 раза и составит значе-



■ Рис. 11. АКФ последовательности: а — А; б — В; в — С

ние, равное 8. Эта характеристика очень близка к характеристикам наилучших последовательностей, а именно М-последовательностей, для которых $\left((R_{\max}|_{\text{АКФ}})_{\text{норм}} \sqrt{N} \right)$ составляет 0,7–1,25

[4]. В то же время число последовательностей максимальной вероятности существенно больше числа М-последовательностей. Для ВКФ последовательностей максимальной вероятности $\left((R_{\max}|_{\text{ВКФ}})_{\text{норм}} \sqrt{N} \right)$ в данном случае составляет 1,5–3. Значения $\left((R_{\max}|_{\text{АКФ}})_{\text{норм}} \sqrt{N} \right)$



■ Рис. 12. ВКФ последовательностей: а — А и В; б — А и С; в — В и С

и $\left(\left(R_{\max|ВКФ} \right)_{\text{норм}} \sqrt{N} \right)$ могут быть достаточно просто заложены в алгоритм формирования кодов для получения последовательностей с нужными статистическими характеристиками.

Подобный анализ был выполнен также для всех групп 16-значных кодовых последовательностей из табл. 2, максимальное число кодов в которых достигает 187, и подтвердил сделанные выше выводы.

Заключение

Решение проблемы коллизии для системы радиочастотной идентификации на ПАВ может быть найдено через применение корреляционного метода. В данном случае работа маркера рассматривается на примере согласованного фильтра, в котором происходит сжатие опросного сигнала. Для работы системы RFID с использованием корреляционной обработки требуется, чтобы маркеры имели уникальные коды, обладающие «хорошими» корреляционными свойствами. Наиболее подходящими кодовыми последовательностями являются последовательности максимальной вероятности. АКФ и ВКФ трех возможных ПМВ при $N = 16$ представлены на рис. 11, 12. Ограниченное число ПМВ обусловлено требованиями к статистическим характеристикам АКФ и ВКФ.

Рассмотренный корреляционный метод решения задачи антиколлизии для систем радиочастотной идентификации на ПАВ может применяться в задачах логистики, охраны и учета объектов.

Литература

1. Brocato R. W. Passive Microwave Tags. — Sandia National Laboratories, 2004. — 29 p. <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2004/044924.pdf>
2. Забузов С. А. Маркеры на поверхностных акустических волнах для систем радиочастотной идентификации // Будущее сильной России — в высоких технологиях: Сб. тр. Всерос. науч. чтений. — СПб.: Логос, 2007. С. 137–143.
3. Дшхунян В. Л., Шаньгин В. Ф. Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты. — М.: НТ Пресс, 2004. — 696 с.
4. Шарфельд Т. Системы RFID низкой стоимости / Под ред. С. Корнеева. — М., 2006. 197 с. http://www.alpha1.ru/recomend/rfid_lowcost.pdf
5. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. — М.: Радио и связь, 1990. — 415 с.
6. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. — М.: Радио и связь, 1985. — 384 с.
7. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Высш. шк., 2000. — 459 с.

УДК 621.391

КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕОТРАЖЕНИЙ ОТ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АВТОСОПРОВОЖДЕНИИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ ПОД КРУТЫМИ УГЛАМИ ВИЗИРОВАНИЯ

О. В. Свешников,

канд. техн. наук, доцент

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Рассматриваются особенности пеленгации кораблей и других объектов, в том числе выполненных по глубокой технологии «Stealth», пеленгуемых под большими углами места. За счет переотражений от морской поверхности отраженный радиолокационный сигнал объекта подвергается дополнительной амплитудно-фазовой модуляции, значительно увеличивая дисперсию флуктуаций эхо-сигнала. Предложен алгоритм компенсации влияния переотражения для улучшения точности автосопровождения надводного объекта по угловым координатам и дистанции.

Ключевые слова — глубокая технология «Stealth», угловой шум, низкочастотная модуляция, локальный отражатель, фантомные рассеиватели, автокаталитическая реакция.

Архитектура современных объектов, выполненных по глубокой технологии «Stealth», формируется с учетом минимизации энергии эхо-сигнала на всем множестве углов видимости объекта в верхней полусфере [1–3]. В этих условиях необходимо учитывать более слабые поля, формируемые за счет взаимодействия пространственно удаленных вторичных рассеивателей. Вторичные поля этих рассеивателей могут оказаться корреляционно связанными, а эхо-сигнал может подвергаться дополнительной трансформации, аналогичной автокаталитической (АК) реакции. Реакции подобного типа лежат в основе структурно неустойчивых систем в химии и биологии, например реакция Белоусова. В результате эхо-сигнал подвергается дополнительной низкочастотной модуляции. Параметры модуляции зависят как от архитектуры, так и от условий облучения объекта.

Главной особенностью пеленгования объекта под большим углом места является резкое увеличение числа N фантомных рассеивателей, отраженных от морской поверхности, например [1, 4] $N_{|0,3^\circ} = 50$ и $N_{|30^\circ} = 365$, и размеров «светящейся» дорожки длиной $L_{x|0,3^\circ} = 800$ м и $L_{x|30^\circ} = 300$ м и шириной $L_{z|0,3^\circ} = 50$ м и $L_{z|30^\circ} = 125$ м при волнении моря $v = 3$ балла. Морская поверхность

представляется множеством фацет, расположенных на гребнях волн в соответствии с характером волнения. Фацеты вращаются и поступательно перемещаются. В каждый момент времени для определенной группы фацет выполняются условия отражения, формирующие вторичное поле. Профиль волны представим

$$h(t) = A(t)\sin(\omega(t)t + \varphi(t)),$$

где A , ω , φ — медленно меняющиеся функции времени [1]. Наклон фацеты определяется положением местной нормали φ и связан с глубиной погружения h фантома-антипода. В формировании сигнала принимает участие группа волн с разными высотами. Фаза отраженного сигнала определяется высотой волны и движением фацеты в вертикальной плоскости $L = \Delta L + h't = \Delta L + \varphi t$.

При малых наклонах фацеты $\varphi = 0$ начальная фаза фантомных сигналов в основном формируется за счет распределения высот волн. При определении смещения расстояния ΔL распространения эхо-сигнала необходимо учесть воздействие на него трех случайных факторов:

1) флуктуаций ординаты волнения по пространству

$$L_1 = N(h, D_h); \quad (1)$$

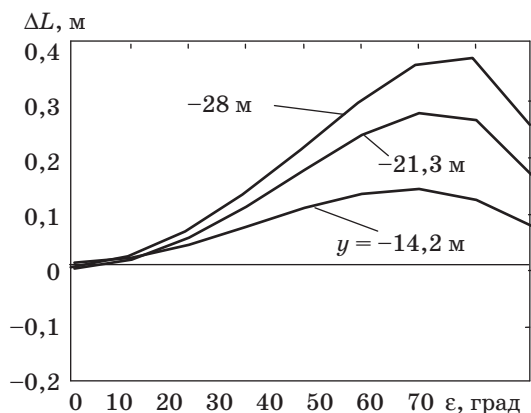
2) изменения ординаты волнения на наклонно-ориентированных фацетах L_2 ;

3) изменения фазы сигнала за счет движения наклонно-ориентированных фацет L_3 .

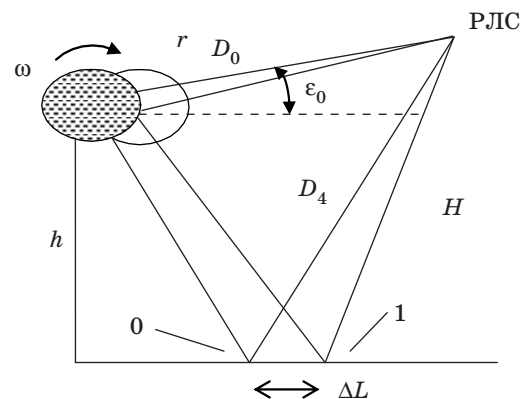
Относительное увеличение дистанции распространения радиоволн, однократно отраженных от морской поверхности, из-за перемещений фацет, при разных углах визирования (места) ε и глубине погружения антипода Y (отражатель расположен на высоте $h = 15$ м) показано на рис. 1. Например, если объект наблюдается под углом 40° и фантомный отражатель находится на глубине 28 м, то при перемещении фацеты на 1 м длина трассы увеличивается на 0,2 м.

Влияние этих процессов на изменение фазы сигнала различно, например: флуктуации L_1 зависят от размеров «светящейся» дорожки, L_2 и L_3 — от угла места и наклона фацеты φ .

В качестве примера отражения от локального отражателя (ЛЮ) рассмотрим отражение от шара, находящегося на высоте h над поверхностью моря (рис. 2). Радиолокационная станция РЛС находится на высоте H . Истинное расстояние шара до РЛС равно D_0 . За счет отражения от морской поверхности измеряемая дистанция



■ Рис. 1. Относительное увеличение длины трассы ΔL как функции угла ε и координат фантома y



■ Рис. 2. Отражение от шара

$$D_4 = D_0 + 2hH/D_0 + \Delta L,$$

где $2hH/D_0$ — увеличение расстояния из-за глубины погружения фантома; ΔL — увеличение расстояния из-за движения морской волны.

В момент времени t точка отражения находится на расстоянии $D_1^{(0)}$, за время $t + \tau$ (τ — доли секунды) фацет сместится в точку $D_1^{(1)}$, и в ней будут выполнены условия отражения. Анализ геометрических соотношений рис. 2 позволяет найти расстояние L_2 как функцию перемещения фацеты:

$$\varepsilon_0 < 45^\circ : L_2 = v_1 \varepsilon_0 \varphi \tau = v_1 \varepsilon_0^2 \tau h / H; \quad (2a)$$

$$\varepsilon_0 > 45^\circ : L_2 = v_1 \varepsilon_0^{-2} \varphi \tau = v_1 \varepsilon_0^{-1} \tau h / H. \quad (2б)$$

Движение фацет в вертикальной плоскости определяет

$$L_3 = 2v_b \varepsilon_0 \tau = 2\varphi \varepsilon_0 \tau = 2\varepsilon_0^2 \tau h / H. \quad (3)$$

Анализ формул показывает сильную зависимость приращения ΔL от положения наблюдателя. При малых углах места влияние движущейся поверхности моря на характеристики сигнала ослаблено из-за малости угла ε_0 и тем фактом, что отраженный от объекта сигнал в основном формируется горизонтально ориентированными фацетами.

За время τ расстояние D_0 изменится на $h\omega\tau$ (ω — угловая скорость вращения шара), а фаза сигнала изменится на $\frac{2\pi}{\lambda}h\omega\tau$. Скорость движе-

ния волны определяет набег фазы морской компоненты сигнала. Этот же набег фазы будет иметь ЛЮ, если объект дополнительно будет вращаться с угловой скоростью $\omega_\varphi = \frac{v_1 \varepsilon_0^2}{H}$, где v_1 — скорость

волны, а море является неподвижным. Также необходимо учитывать кратность рассеяния радиоволн от моря [1]. При определении временных характеристик важно учитывать линейную зависимость ω и скорость изменения v_r расстояния ЛЮ—РЛС, а также то, что v_1 является случайной величиной, что определяет случайный характер L_i .

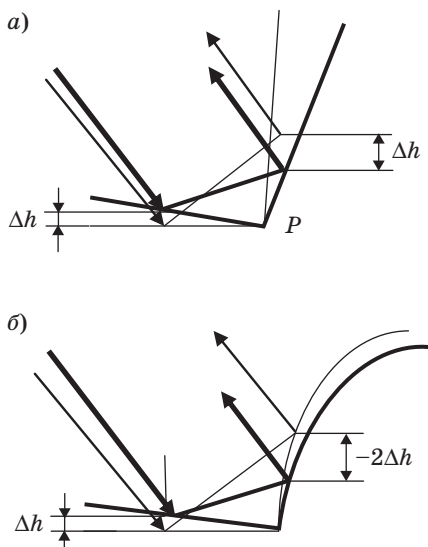
Отражение от протяженного объекта является суперпозицией сигналов групп ЛЮ [5]. В этом случае возможно когерентное суммирование полей источников с разными координатами. Пространственные координаты ЛЮ определяют временную частоту ω_i :

$$\omega_i = \omega + k\varphi_i \eta_{\varphi_i},$$

где k — коэффициент пропорциональности; φ_i — средний наклон фацет (2), (3); η_{φ_i} — координаты

фантома. В общем случае частоты ω_i разных фантомов близки, поэтому при сложении их полей происходят биения с низкой разностной частотой. Дополнительная модуляция фазы морской компоненты эхо-сигнала происходит на фацетах, находящихся на краях «светящейся» дорожки. При положительных значениях угла качки объекта когерентно взаимодействуют эхо-сигналы на одном краю дорожки, а при отрицательных — на другом. В результате резко увеличивается флуктуация углового шума.

Подобные низкочастотные модуляции эхо-сигнала наблюдаются и при пеленговании объекта, выполненного по глубокой технологии «S». При ее реализации используется компромиссное решение — часть поверхностей объекта первого рода заменяется на поверхности второго рода [2, 3]. Этим достигается эффект уменьшения эффективной площади рассеяния (ЭПР) на всем множестве углов видимости. В результате замены поверхностей формируются пространственные образования, фазовый центр отражения (используется метод стационарной фазы) движется в противоположном направлении, чем центр исходной поверхности. Отражение от подобных образований отличается от отражения углового отражателя. Эквивалентом уголка является эквивалентная плоскость, а эквивалентом нового образования — изотропный рассеиватель (эллипсоид). В этом случае когерентно взаимодействуют пространственно удаленные ЛО и появляется фантомный ЛО вблизи центра объекта. При отражении от углового отражателя центр отражения смещен на Δh (рис. 3, а); отражение от сложной поверхности смещено на $-\Delta h$ (рис. 3, б). Такое же смещение имеет и противоположно располо-



■ Рис. 3. Отражение от уголка (а) и составного уголка плоскость — эллипсоид (б)

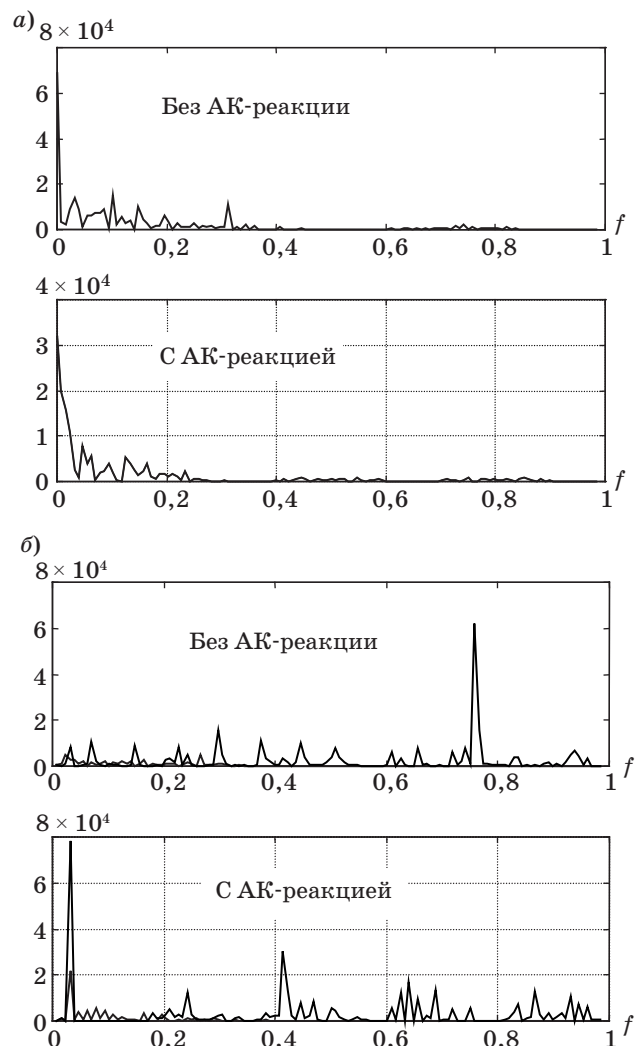
женный ЛО. Как результат их взаимодействия наблюдается дополнительная амплитудно-фазовая модуляция поля рассеяния.

Формально эти типы рассеяния доминируют при замираниях эхо-сигнала, однако уровень сигнала не является достаточным признаком при пеленгации объектов, выполненных по глубокой технологии «S». В этом случае необходимо разработать алгоритм выделения и подавления участков со сложным типом модуляции.

Спектральные характеристики эхо-сигнала получены на математической модели [6, 7] (рис. 4, а, б). Угловая скорость вращения объекта $\omega = 2\pi$ рад/с.

Спектры флуктуаций углового шума (УШ) практически неразличимы. Спектры флуктуаций ЭПР объекта узкополосные, но положение максимума ЭПР априорно неизвестно, что делает невозможным различение процессов.

Поскольку эффект проявляется в дополнительной низкочастотной амплитудной модуля-



■ Рис. 4. Спектр флуктуаций УШ (а) и ЭПР (б)

ции эхо-сигнала, оценим флуктуации амплитуды углового шума $x(t) = A(t)\cos(\varphi(t))$.

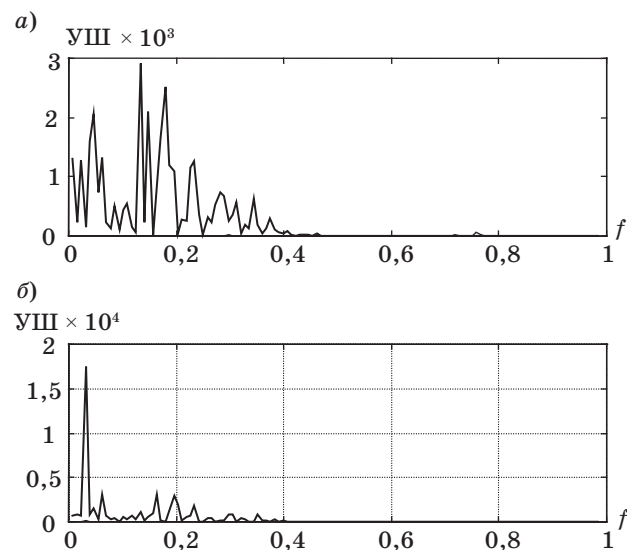
Используя свойство независимости случайного процесса и его производной, выделяем значения координат УШ в точках, где производная процесса равна нулю. Спектр последовательности амплитуд $x(t_i) = A(t_i)$ в отсутствие АК-реакции и при АК-реакции показан на рис. 5.

Спектр флуктуаций УШ в отсутствие АК-реакции широкополосный из-за амплитудно-фазовой модуляции вторичного поля рассеяния независимыми случайными процессами [8].

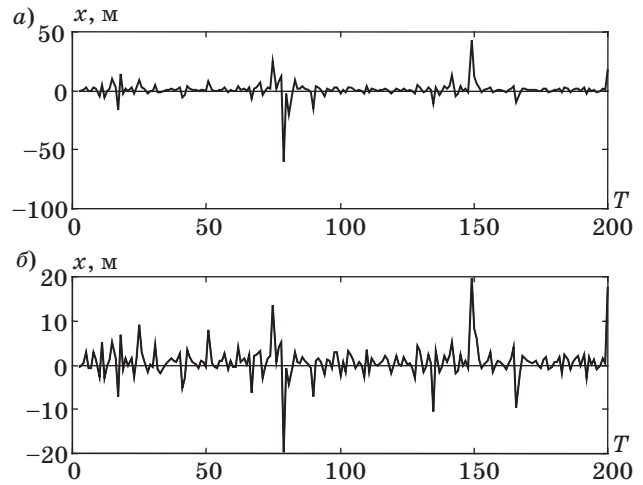
Спектр флуктуаций УШ при АК-реакции узкополосный из-за когерентного взаимодействия ЛО с близкими доплеровскими частотами.

Производится обработка текущего спектра окном длительностью $T_{ок}$. Определяются квантили K порядка 0,1 и 0,5. Так как положение максимума спектра неизвестно, используется относительная оценка интегральной суммы $x = (K_{0,5} - K_{0,1}) / K_{0,5}$. Значение x существует в пределах от 0 до 1. Предлагается установить пороговое значение $x_{пор} = 0,5$. При этом если $x < x_{пор} = 0,5$, АК-реакция есть, иначе ($0,5 < x < 1$) АК-реакция отсутствует.

Подавление АК-реакции производится путем умножения исходного процесса на нестационарный множитель. Параметр α определяется максимальным значением $A(t_i)$: $\alpha = \ln(A(t_i))$, значения $\cos(\omega_0 t)$ определяются отношением переменной части флуктуаций ЭПР к текущему среднему значению. Дополнительно учитывается, что резкое увеличение флуктуаций УШ происходит при замираниях сигнала, поэтому подавление осуществляется при значениях сигнала, меньших среднего. Результат подавления АК-реакции показан на рис. 6, а, б.



■ Рис. 5. Спектры амплитуд УШ в отсутствие (а) и с АК-реакцией (б)

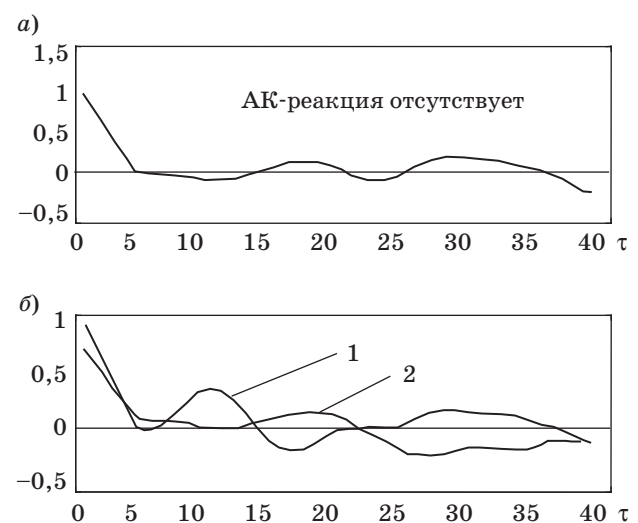


■ Рис. 6. Компенсация дополнительной амплитудной модуляции УШ: а — есть АК-реакция; б — АК-реакция подавлена

Эффективность алгоритма подавления оценивается изменением автокорреляционной функции. Автокорреляционная функция флуктуаций УШ в отсутствие АК-реакции показана на рис. 7, а. Влияние АК-реакции приводит к дополнительной модуляции (рис. 7, б, кривая 1), результат подавления — кривая 2. Автокорреляционные функции в отсутствие АК-реакции и с учетом ее подавления практически совпадают.

В результате подавления АК-реакции точность измерения повышается, так как традиционный измеритель становится оптимальным для данного типа отражений [8].

Таким образом, расширение видов объектов радиолокационного наблюдения и условий наблюдения за ними (мониторинг при крутых углах



■ Рис. 7. Функции автокорреляции случайных процессов: а — АК-реакция отсутствует; б — АК-реакция подавлена

визирования) приводит к необходимости учитывать дополнительные особенности формирования эхо-сигналов. В результате подавления паразитной модуляции эхо-сигнала, вызванной переот-

ражением фона, традиционная структура контура сопровождения объекта по угловым координатам и дистанции не изменяется и точность автосопровождения объекта не ухудшается.

Литература

1. Штагер Е. А. Отражение радиоволн от кораблей и других морских объектов. — СПб.: СПбГУ, 2004. — 418 с.
2. Свешников О. В. Особенности радиолокационного пеленгования кораблей, построенных по технологии «Stealth»: Юбилейный сб. СПб.: БГТУ, 2007. С. 46–52.
3. Жаркой М. Ф., Свешников О. В. Кризис технологии «Stealth» и возможные пути его преодоления: Сб. науч. тр. / НИЦ. РВиА. СПб., 2008. С. 67–70.
4. Свешников О. В. Повышение точности автосопровождения морских объектов, наблюдаемых под большими углами визирования // НТК, посвященная Дню радио: Тез. докл. / СПбЭУ «ЛЭТИ». СПб., 1997. С. 64.
5. Свешников О. В., Свешников В. В. Оценка нестационарной составляющей эхо-сигнала протяженного объекта сложной формы // Радиолокационное исследование природных сред: Тез. докл. XXIV Всерос. симп. СПб., 2006. С. 294.
6. Свешников О. В. Особенности пеленгования объектов, выполненных по глубокой технологии «Stealth» // Вестник БГТУ. 2008. Вып. 2. С. 60–64.
7. Смирнов В. В., Николаев С. В. Пассивные помехи. — СПб.: БГТУ, 2008. — 400 с.
8. Шелухин О. И. Радиосистемы ближнего действия. — М.: Радио и связь, 1987. — 240 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 несет рекламодатели.

УДК 519.682

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРЫ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

В. А. Мочалов¹,

аспирант

Московский технический университет связи и информатики

Предлагаются алгоритмы оценки надежности структуры сенсорной сети, которые можно использовать в системах поддержки проектирования отказоустойчивых сенсорных сетей большой размерности и высокой степени связности. Рассматриваются алгоритмы вычисления нижней оценки вероятности связности двух узлов сенсорной сети на основе сжатия графа, описывающего сеть, а также оценка по количеству независимых путей.

Ключевые слова — сенсорная сеть, отказоустойчивость, оценка структуры сети, надежность, граф.

Введение

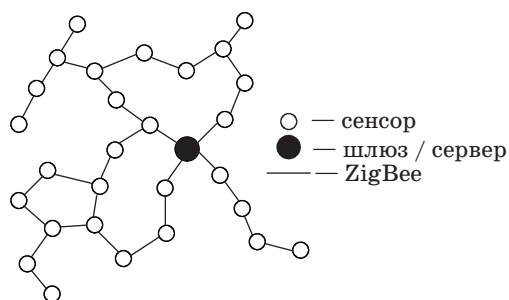
Сенсорная сеть (СС) — это распределенная сеть необслуживаемых миниатюрных электронных устройств (узлов сети), обменивающихся информацией по беспроводной связи и способных регистрировать данные о параметрах внешней среды и передавать их на базовую станцию (сервер) с помощью ретрансляции от узла к узлу [1] (рис. 1).

На основе стандарта ZigBee создаются самоорганизующиеся и самовосстанавливающиеся сети: ZigBee-устройства благодаря встроенному программному обеспечению обладают способностью при включении питания сами находить друг друга и формировать сеть, а в случае выхода из строя какого-либо из узлов — устанавливать новые маршруты для передачи сообщений. Скорость передачи данных вместе со служебной информации

ей в сетях ZigBee равна 250 Кбит/с, расстояние между узлами на открытом пространстве в среднем составляет сотни, а в помещении — десятки метров [1].

Узел сети, называемый *сенсором*, содержит датчик, воспринимающий данные от внешней среды (собственно сенсор), микроконтроллер, память, радиопередатчик, автономный источник питания. Такой узел будем называть *элементарным узлом* (ЭУ). Сенсорная сеть содержит узлы двух видов: *функциональные узлы* (Ф-узлы), осуществляющие сбор информации в некоторой окрестности каждой точки, и *транзитные узлы* (Т-узлы), выполняющие только передачу информации. Как правило, СС размещается на некотором объекте, распределенном в пространстве, причем заданы точки этого объекта, в которых обязательно должны быть размещены Ф-узлы. Ф-узел передает собранную информацию одному из Т-узлов, которые находятся в зоне передачи радиосигнала Ф-узла. Ф-узлы не осуществляют ретрансляцию сообщений от других узлов СС. Т-узлы, в отличие от Ф-узлов, не осуществляют сбор информации от внешней среды и предназначены только для ретрансляции сообщений. Размещение Т-узлов определяется на основе требований, предъявляемых к конкретной СС, важнейшим из которых является надежность.

Считаем, что в процессе функционирования СС возможны отказы как узлов сети, так и радиоканалов связи. Под отказом узла понимаем событие, приводящее к невозможности передачи через него информации с входящих каналов на исходящие. Отказ канала рассматривается как его



■ Рис. 1. Структура сенсорной сети

¹ Научный руководитель — профессор кафедры математической кибернетики и информационных технологий МТУСИ, доктор техн. наук *Е. Н. Турута*.

«разрыв», т. е. как полное нарушение способности передавать сигнал. В качестве показателя надежности как узла, так и канала связи примем вероятность их безотказной работы, полагая, что узлы и каналы являются невосстанавливаемыми, а их отказы независимы. Примем, что заданы значения этих показателей, а также радиусы передачи радиосигнала и стоимости узлов.

Требуется для заданного размещения Ф-узлов построить такую структуру СС, которая обеспечит передачу информации, полученной Ф-узлами, в центральный узел сети (сервер) с требуемой степенью надежности при заданных ограничениях на стоимость СС.

Искомая структура СС представляется графом, вершинам которого соответствуют функциональные и транзитные узлы СС, размещенные в определенных точках объекта, причем точки размещения Ф-узлов фиксированы, а точки размещения Т-узлов должны быть найдены. При этом Т-узлы могут быть как элементарными узлами, так и отказоустойчивыми структурами, включающими некоторое количество ЭУ (которое должно быть найдено, исходя из требуемой степени надежности передачи информации от Ф-узлов к серверу). Ребрам графа соответствуют радиоканалы между узлами сети.

В работах [2, 3] предложен алгоритм построения отказоустойчивой структуры СС, который осуществляет размещение Т-узлов сети (с учетом возможности построения отказоустойчивых структур Т-узлов), используя функцию приспособленности СС, характеризующую как степень надежности сети, так и затраты, требуемые для достижения необходимого уровня ее отказоустойчивости. Одним из возможных подходов к определению функции приспособленности является умножение значения показателя, характеризующего надежность СС, на значения функции F_{st} , которая характеризует степень (в процентах) удовлетворения потребности проектировщика в стоимости проекта СС.

Надежность структуры СС при заданном множестве ее Ф-узлов $\{D_f\}$, $f = 1, \dots, k$, определяется набором значений вероятностей связности P_{fs} каждого из узлов заданного множества $\{D_f\}$ с сервером. В качестве показателя надежности структуры СС примем минимальное из этих значений $P_{FS} = \min\{P_{fs}, f = 1, \dots, k\}$ [3].

Вероятность связности двух узлов P_{fs} может быть оценена методами, исключающими полный перебор (методы минимальных путей и сечений, оценки Эзари—Прошана и Литвака—Ушакова) [4]. Поскольку вычислительная сложность этих методов полиномиально возрастает с увеличением количества ребер графа, они могут применяться только при малой исходной размерности

и небольшой связности СС. Далее предлагаются алгоритмы оценки надежности структуры СС, характеризующей вышеприведенным показателем, которые обладают меньшей вычислительной сложностью.

Алгоритмы оценки надежности СС

Вычисление нижней оценки вероятности связности двух узлов сенсорной сети на основе сжатия графа

Рассмотрим метод вычисления нижней оценки вероятности связности P_{fs} двух узлов сенсорной сети, обладающий линейной вычислительной сложностью. Он основан на уменьшении размерности графа, описывающего СС, до такого размера, при котором два рассматриваемых узла СС становятся соседями, после чего методом прямого перебора вычисляется вероятность связности этих узлов в небольшой окрестности. Уменьшение размерности осуществляется с помощью итерационной процедуры путем последовательного сжатия графа в 4 раза на каждой итерации.

Представим всю сеть в виде двумерной сетки $[N \times M]$, «покрывающей» объект размещения СС, где N — число рядов (строк), а M — число столбцов. Размер $h \times w$ ячейки этой сетки, от которого зависит значения N и M (при заданной площади объекта), определяется заданным радиусом R передачи радиосигнала сенсора. Для упрощения описания процедуры используем квадратную двумерную сетку (КДС), содержащую $[n \times n]$ ячеек. Пусть задано некоторое размещение узлов СС, полученное с помощью одного из алгоритмов базового или отказоустойчивого размещения. Назовем эти размещенные узлы реальными узлами СС (или узлами первого уровня). Полагаем, что

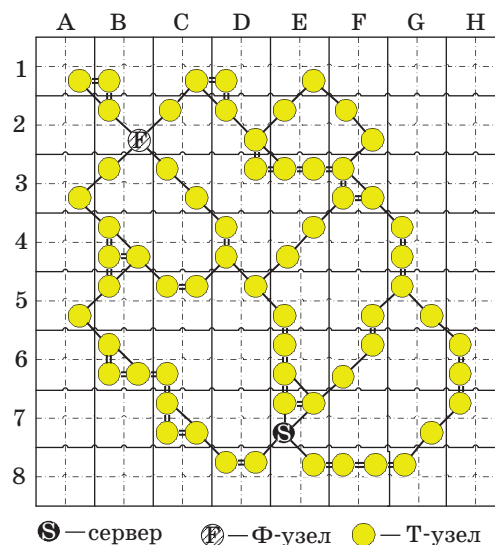


Рис. 2. Размещение реальных узлов исходной СС

в каждой ячейке можно разместить не более одного реального узла СС и что радиус R передачи радиосигнала сенсора таков, что узел, размещенный в некоторой ячейке, например нижний узел блока А1 (рис. 2), может осуществить непосредственную связь (т. е. без использования промежуточных узлов) только с узлами, размещенными в любой из восьми соседних ячеек (узлом блока В1 и верхним узлом блока В2). Такие пары реальных узлов назовем непосредственно связанными узлами. Вероятность связности двух таких узлов определяется значениями вероятности безотказной работы узла p_y и канала p_k : $P_{н.с} = p_y^2 p_k$. Предлагаемую процедуру рассмотрим на примере СС, размещение реальных узлов которой показано на рис. 2.

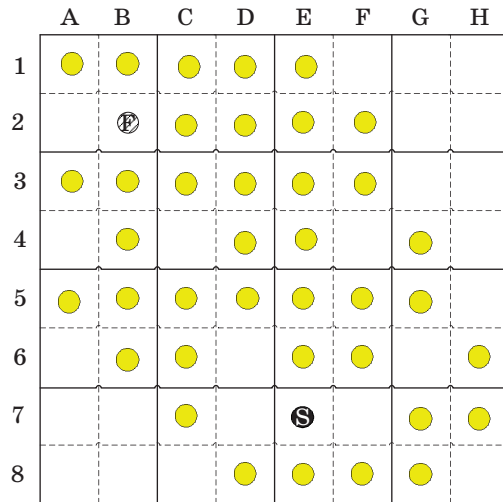
Алгоритм вычисления нижней оценки вероятности связности заданного функционального узла СС с сервером

Данный алгоритм состоит из следующих шагов. Задана КДС, содержащая $[n \times n]$ ячеек и некоторое размещение узлов СС в ней. Известны вероятности безотказной работы узлов сети и каналов связи.

Шаг 1. Построить сжатую сетку первого уровня: разбить заданную начальную КДС на квадратные блоки размерностью 2×2 ячейки, называемые блоками первого уровня (см. рис. 2: 8×8 блоков или 16×16 ячеек). Каждый блок первого уровня содержит некоторое множество реальных узлов СС, число k которых может быть от 0 до 4. Если $k > 1$, то все эти узлы блока попарно непосредственно связаны.

Шаг 2. Создать пустую сжатую сетку второго уровня, т. е. КДС размерностью $[n/2 \times n/2]$. Каждый блок второго уровня состоит из 2×2 блоков первого уровня (созданных на шаге 1).

Шаг 3. В пустую сжатую сетку второго уровня, созданную на шаге 2, ввести узлы, называемые далее эквивалентными узлами (Э-узлами) второго уровня, следующим образом (рис. 3: 4×4 блоков второго уровня или 8×8 блоков первого уровня): в каждый блок первого уровня данной пустой сжатой сетки вводится один Э-узел, если соответствующий блок первого уровня, полученный из начальной КДС на шаге 1, содержит хотя бы один реальный узел (Ф-узел, Т-узел или сервер). Каждый Э-узел V_i второго уровня соответствует непустому множеству W_i реальных узлов v_k^i , которые размещены в одном блоке первого уровня и попарно непосредственно связаны. Вероятность безотказной работы этого эквивалентного узла принимается равной $P_y = \max P_s$, где P_s — вероятность безотказной работы произвольного узла k_s , $k_s \in \Omega^1$, Ω^1 — множество узлов, содержащихся в исходном блоке первого уровня.



■ Рис. 3. Размещение эквивалентных узлов второго уровня (сжатая сетка второго уровня)

Шаг 4. Последовательно вычислить вероятности связей Э-узлов второго уровня с соседними Э-узлами, учитывая количество реальных узлов, входящих в подмножества, сопоставленные с эквивалентными узлами, и непосредственные связи этих реальных узлов внутри данных подмножеств. Рекурсивные вычисления вероятностей связей начинать с блока первого уровня, который содержит серверный узел (блок Е7 на рис. 2). Для этого выполнить процедуру вычисления вероятностей связей между соседними Э-узлами (ВВСГЭУ) в графе j -го уровня. Входными данными для процедуры ВВСГЭУ являются КДС Э-узлов j -го уровня, для которых необходимо вычислить вероятности связей, а также КДС блоков $(j - 1)$ -го уровня с уже известными вероятностями связей.

Описание процедуры ВВСГЭУ.

А. Создать пустое множество «входных узлов» $M_{вх}$. Каждый элемент этого множества для текущей итерации алгоритма будет содержать массив узлов блока $(j - 1)$ -го уровня, относительно которых необходимо вычислить вероятности связи с ближайшими узлами соседних блоков $(j - 1)$ -го уровня без учета узлов других блоков $(j - 1)$ -го уровня, т. е. вероятности прямой связи между блоками. При невозможности связаться напрямую с соседним блоком $(j - 1)$ -го уровня вычислить вероятность связи двух соседних блоков $(j - 1)$ -го уровня с использованием не более одного узла третьего блока $(j - 1)$ -го уровня, являющегося соседним к двум рассматриваемым (связь Е5-Д4 осуществляется через блок Д5, см. рис. 2). На первой итерации инициализировать множество $M_{вх}$, добавив в него один серверный узел блока $(j - 1)$ -го уровня, относительно которого будет производиться вычисление вероятностей связи

Э-узла j -го уровня, содержащего серверный узел, с соседними Э-узла j -го уровня (связи на первой итерации: E7-E6, E7-D8, E7-F6, E7-E8 на рис. 3).

В. Создать пустое множество обработанных блоков $(j - 1)$ -го уровня $\Omega_{o,6}$. Каждый элемент этого множества будет содержать блок $(j - 1)$ -го уровня и «входные узлы» внутри этого блока, с которыми удалось связаться одному из соседних блоков. На первой итерации инициализируем множество $\Omega_{o,6}$, добавив в него серверный блок $(j - 1)$ -го уровня и серверный узел, находящийся внутри этого блока.

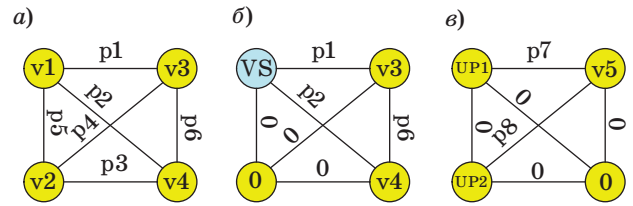
С. Создать временный массив «входных узлов» $T_{вх}$ для текущей итерации. Для каждого элемента множества $M_{вх}$ вычислить вероятности связи с ближайшими узлами соседних блоков $(j - 1)$ -го уровня. Для вычисления вероятности связи с соседним блоком необходимо, чтобы выполнялось одно из двух условий:

1) соседний блок $(j - 1)$ -го уровня не находится во множестве $\Omega_{o,6}$;

2) соседний блок находится во множестве $\Omega_{o,6}$, и в то же время имеется возможность прямой связи с его «входными ячейками». В этом случае вероятность связи вычисляется от элемента множества $M_{вх}$ к «входным узлам» соседнего блока.

Непосредственная связь между двумя соседними Э-узлами B_i и B_j j -го уровня (т. е. без использования других Э-узлов) существует в том и только в том случае, когда существует хотя бы одна пара непосредственно связанных реальных узлов (или Э-узлов $(j - 1)$ -го уровня) v_k^i и v_m^j , принадлежащих различным множествам W_i и W_j (т. е. $v_k^i \in W_i$ и $v_m^j \in W_j$), где W_i, W_j — множества реальных непосредственно связанных узлов, соответствующие Э-узлам B_i и B_j .

Вероятность связи между двумя соседними Э-узлами j -го уровня B_i и B_j рассчитывается методом простого перебора с учетом вероятности безотказной работы реальных узлов (или Э-узлов $(j - 1)$ -го уровня) и связей между ними [4]. Таким образом, вычисленное значение вероятности связи между двумя соседними Э-узлами j -го уровня учитывает вероятности несовместимых событий, каждое из которых соответствует связности Э-узлов B_i и B_j относительно выбранных реальных узлов (или Э-узлов $(j - 1)$ -го уровня). Общая схема вычисления вероятности связи между соседними узлами показана на рис. 4, а ($v1-v4$ — вероятности безотказной работы узлов; $p1-p6$ — вероятности безотказной работы каналов). Процесс вычисления вероятности связности рассмотрим на примере Э-узлов E7 и E6. **Вычисление вероятности связи между Э-узлами E7 и E6** осуществляется относительно серверного узла, который находится в блоке первого уровня E7 (см. рис. 2). Связь серверного узла с ближайшим



■ Рис. 4. Схемы вычисления вероятности связи: а — базовая схема; б — связь сервера с верхними узлами внутри блока E7; в — связь верхних узлов блока E7 с блоком E6

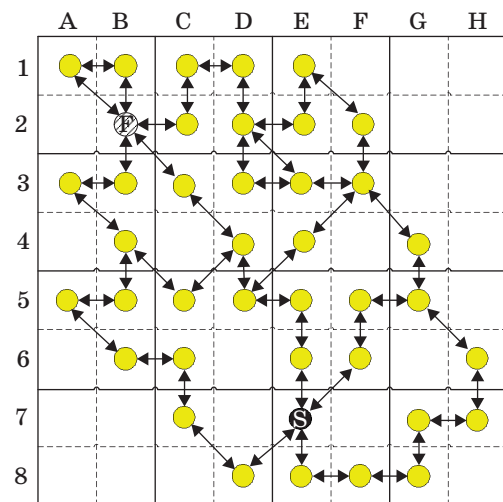
узлом соседнего блока первого уровня E6 (нижний узел блока E6 на рис. 2) осуществляется через верхние узлы блока первого уровня E7. Поэтому вначале вычисляются вероятности связи серверного узла с верхними узлами блока первого уровня E7 P_{UP1} и P_{UP2} (рис. 4, б), после чего вычисляется вероятность связи верхних узлов блока первого уровня E7 с ближайшим узлом блока первого уровня E6 P_{E7-E6} (рис. 4, в).

Узлы соседних блоков добавить во временный массив $T_{вх}$. Все соседние блоки и узлы $(j - 1)$ -го уровня, с которыми удалось связаться напрямую, добавить во множество $\Omega_{o,6}$. После этого очистить множество $M_{вх}$ и скопировать в него элементы $T_{вх}$.

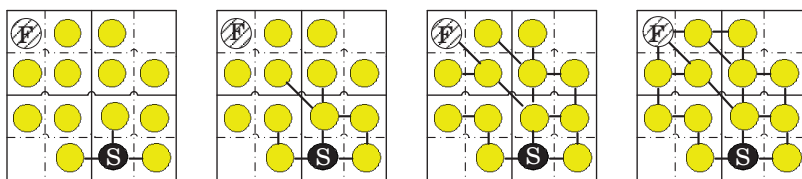
Д. Повторять шаг С до тех пор, пока множество $M_{вх}$ не станет пустым.

В результате работы процедуры ВВСГЭУ получится граф, вершины B_i которого соответствуют Э-узлам второго уровня, а ребра — непосредственным связям между этими узлами (рис. 5).

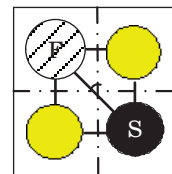
Шаг 5. Создать пустую сжатую сетку третьего уровня, т. е. КДС размерностью $[n/4 \times n/4]$ блоков третьего уровня, каждый из которых состоит из



■ Рис. 5. Пример графа непосредственных связей между эквивалентными узлами второго уровня (первый сжатый граф)



■ **Рис. 6.** Пример последовательного вычисления вероятностей связи с соседними узлами второго сжатого графа размерностью $[n/4 \times n/4]$



■ **Рис. 7.** Пример сжатого графа размерностью $[n/8 \times n/8]$ в конечном состоянии

2×2 блоков второго уровня (созданных на шаге 2), и ввести в нее Э-узлы третьего уровня следующим образом: в каждый блок второго уровня данной пустой сжатой сетки вводится один Э-узел третьего уровня аналогично шагу 3. Каждый Э-узел третьего уровня C_r соответствует непустому множеству Z_r Э-узлов второго уровня B_k , которые размещены в одном блоке второго уровня.

Шаг 6. Последовательно вычислить вероятности связей Э-узлов третьего уровня с соседними Э-узлами с помощью процедуры ВВСГЭУ аналогично шагу 4.

В результате получим граф, вершины которого соответствуют Э-узлам третьего уровня, а ребра — непосредственным связям между этими узлами (рис. 6).

Шаг 7. Повторять по аналогии шаги 5–6 для текущего сжатого графа до тех пор, пока функциональный узел и сервер не окажутся в соседних блоках. После чего вычислить нижнюю оценку вероятности связности P_{fs} Ф-узла с сервером в небольшой окрестности двух блоков методом прямого перебора.

На основе конечного состояния сжатого графа (рис. 7) и вычисляется нижняя оценка вероятности связности P_{fs} Ф-узла с сервером.

Алгоритм вычисления нижней оценки вероятности связности двух узлов сенсорной сети на основе сжатия графа обладает линейной вычислительной сложностью. Рассмотрим более простой алгоритм.

Вычисление нижней оценки вероятности связности по количеству независимых путей

Процедура поиска независимых путей (ПНП) находит все независимые пути (НП) от Ф-узла к серверу. Для этого двунаправленный связный граф (ДСГ), представляющий СС, преобразуется в ориентированный связный граф (ОСГ) для вычисления НП с помощью упрощенного алгоритма Форда—Фалкерсона (Ф-Ф). Алгоритм Ф-Ф [5, 6] осуществляет вычисление максимального потока от истока к стоку во взвешенном ориентированном графе. Для использования алгоритма Ф-Ф необходимо преобразовать ДСГ в ОСГ, заме-

няя все пары Т-узлов, связанных двунаправленным ребром, на четыре Т-узла, циклически связанных однонаправленными ребрами. Таким образом, один Т-узел преобразуется в два Т-узла, причем все входящие связи с других узлов поступают на первый Т-узел, исходящие же связи идут от второго Т-узла (рис. 8). Необходимо подчеркнуть, что имеется только одно преобразование из ДСГ в ОСГ, которое не зависит от способа обхода ДСГ.

Для того чтобы использовать одно ребро не более чем в одном пути, установим поток через каждое ребро в единицу. Упрощенный алгоритм Ф-Ф для поиска максимального потока и НП между двумя узлами (Ф-узлом и сервером) работает следующим образом.

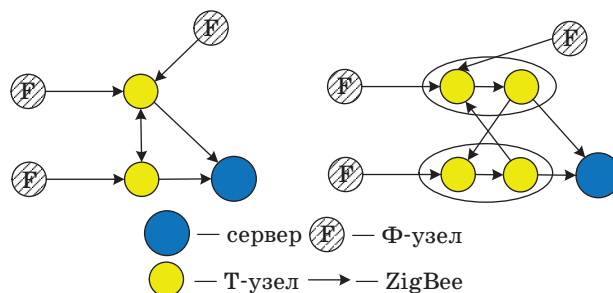
Шаг 1. Найти возможный путь в графе между заданным Ф-узлом и сервером с использованием как незадействованных, так и уже задействованных ребер, но направленных в противоположном направлении.

Шаг 2. Ребра найденного пути пометить как задействованные. Ребра же, направленные в противоположном направлении найденного пути, пометить незадействованными.

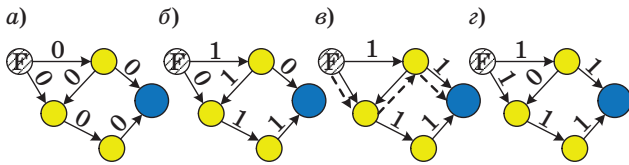
Шаг 3. Повторять шаги 1 и 2 до тех пор, пока находятся новые пути.

Шаг 4. Максимальный поток от Ф-узла к серверу равен количеству независимых путей от Ф-узла к серверу.

Рассмотрим пример нахождения НП между Ф-узлом и сервером (рис. 9). Исходный граф с незадействованными ребрами показан на рис. 9, а.



■ **Рис. 8.** Пример преобразования двунаправленного графа в ориентированный граф



■ Рис. 9. Пример поиска независимых путей: а — граф без потока; б — один путь используется; в — новый путь с одним ребром противоположного направления; г — итоговый результат (максимальный поток = 2)

Вначале находится путь с использованием незадействованных ребер с потоком 1, которые помечаются как задействованные [4] (рис. 9, б). Затем находится новый путь с использованием одного задействованного ребра, но направленного в противоположном направлении (рис. 9, в). После этого ребра найденного пути отмечаются как задействованные, вес ребра, направленного в противоположном направлении, устанавливается в 0 (рис. 9, г). Таким образом, суммарное количество НП равняется двум.

После нахождения всех НП от Ф-узла к серверу может быть вычислена вероятность связности P_{fs} от Ф-узла к серверу.

Очевидно, $P_{fs} = 1 - Q_{fs}$, где Q_{fs} — вероятность того, что все НП Ф-узла D_f неработоспособны:

$$Q_{fs} = \prod_{\mu_{fs}^k \in M_{fs}} q_{fs}^k,$$

где q_{fs}^k — вероятность того, что данный k -й НП μ_{fs}^k между Ф-узлом D_f и сервером неработоспособен:

$$q_{fs}^k = 1 - p_{fs}^k,$$

где p_{fs}^k — вероятность того, что k -й путь μ_{fs}^k между Ф-узлом D_f и сервером работоспособен, определяемая как вероятность работоспособного состояния всех каналов и всех узлов, образующих этот путь, т. е.

$$p_{fs}^k = \prod_{c_{ij} \in C_{fs}^k} p_{ij} \prod_{b_m \in B_{fs}^k} p_m,$$

где p_m, p_{ij} — вероятности работоспособного состояния (т. е. отсутствия отказа) соответственно узла b_m и канала c_{ij} (между некоторыми узлами b_i и b_j); C_{fs}^k — множество всех каналов, входящих в путь μ_{fs}^k ; B_{fs}^k — множество всех узлов, входящих в путь μ_{fs}^k [2, 4].

Заключение

В статье рассмотрены алгоритмы вычисления нижней оценки вероятности связности Ф-узла с сервером СС. Эта оценка используется при построении отказоустойчивой структуры СС. С практической точки зрения, применение рассмотренных алгоритмов ведет к повышению эффективности процесса проектирования реальных СС достаточно большой размерности. Применение того или иного алгоритма определяется размерностью СС и ограничениями на время и стоимость его реализации. Предложенные алгоритмы можно использовать в системах поддержки проектирования отказоустойчивых сенсорных сетей.

Литература

1. Турута Е. Н., Мочалов В. А. Проблемы проектирования отказоустойчивых сенсорных сетей // Тр. Московского технического университета связи и информатики. М.: ИД Медиа Паблицер, 2008. Т. 1. С. 128–132.
2. Мочалов В. А., Турута Е. Н. Интеллектуальная процедура выбора отказоустойчивой топологии и компонентов сенсорной сети // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Интеллектуальные системы» (AIS'08) и «Интеллектуальные САПР» (CAD-2008). М.: Физматлит, 2008. Т. 1. С. 385–392.
3. Мочалов В. А., Турута Е. Н. Метод построения отказоустойчивой структуры сенсорной сети, осно-

4. Райншике К., Ушаков И. А. Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988. С. 15–39.
5. Goodrich M-T., Tamassia R. Algorithm Design: Foundations, Analysis, and Internet Examples. — N. Y.: John Wiley & Sons, 2002. — Pt. 8.2.2.
6. Форд Л., Фалкерсон Д. Потoki в сетях: Пер. с англ. — М.: Мир, 1966. — 276 с.

УДК 621.396

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО АНАЛИЗА

Г. В. Безмен,

ведущий инженер

Н. В. Колесов,

доктор техн. наук, профессор

ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»

Предлагается метод диагностирования линейных динамических систем, основанный на предположении об отсутствии четкой границы между работоспособным и неработоспособным техническими состояниями как системы, так и ее элементов и использующий банк взаимодействующих наблюдателей.

Ключевые слова — функциональное диагностирование, динамическая система, банк наблюдателей.

Введение

Вопросам диагностирования линейных динамических систем посвящено достаточно много публикаций, среди которых, в частности, [1–5]. Тем не менее, исследования в данной области продолжают, несмотря даже на то, что реальные системы, как правило, нелинейные. Можно назвать ряд причин сохраняющегося интереса к вопросам диагностирования динамических систем в целом и линейных динамических систем в частности, но, прежде всего, это принципиальная возможность декомпозиции любой технической системы на совокупность динамических. Это означает возможность соответствующей декомпозиции задачи диагностирования, которую далее приемами линеаризации можно свести к задаче диагностирования линейных систем. При этом обращаем внимание на существующие возможности линеаризации также в рамках обсуждаемого ниже нечеткого подхода с использованием модели Такаги—Сугено [6].

Данная работа посвящена проблеме функционального диагностирования, т. е. диагностирования на рабочих воздействиях при функционировании системы по прямому назначению. В настоящее время в рамках этой проблемы одним из наиболее разрабатываемых направлений является учет различного рода неопределенностей, сопровождаемых решением конкретных практических задач. Источниками неопределенности мо-

гут быть различные причины. Обычно это неадекватность используемой при диагностировании модели исходной системы, модели возмущений ее динамики и выхода. Неадекватность может возникнуть либо из-за недостаточной информированности разработчика, либо из-за произведенной в целях упрощения редукции используемой модели системы. Кроме неадекватности модели как на источники неопределенности можно указать на шумы измерения, а также на нечеткость в трактовке технического состояния системы и ее элементов. Последнему фактору ниже будет уделено наибольшее внимание. В литературе описаны подходы, позволяющие в той или иной степени решить эти проблемы. Следует отметить, что различные подходы зачастую используют различные типы модели системы, среди которых детерминированные [1–5], интервальные [7], стохастические [8], нечеткие [9–11]. Возможны и смешанные, в частности, интервально-стохастические подходы с использованием, например, результатов работы [12]. Выбор того или иного подхода, как правило, определяется содержанием имеющейся в распоряжении разработчика средств диагностирования априорной информации о свойствах системы и возникающих в ней отказах. Так, если разработчик располагает вероятностной информацией о поведении системы и ее отказах, то может быть применен стохастический подход. Если такой информации нет, но есть эмпирическое представление разработчика

о сопровождающих задачу неопределенностях, можно воспользоваться нечетким подходом, отразив это представление в соответствующих функциях принадлежности. Наконец, если и такой путь вызывает затруднения, то можно прибегнуть к услугам детерминированного подхода, где информация о неопределенностях сведена к минимуму.

В настоящей статье в рамках нечеткого подхода предлагается метод диагностирования линейных динамических систем, отличающийся от многих известных методов двумя основными особенностями. Во-первых, предположением об отсутствии четкой границы между работоспособным и неработоспособным техническими состояниями как системы, так и ее элементов. Это позволяет уточнить правило принятия решения при диагностировании отказов, опираясь лишь на эмпирическое представление разработчика о работоспособном и неработоспособном технических состояниях элементов диагностируемой системы. Вторая особенность данного метода состоит в том, что в отличие от других известных методов, предложенных в рамках нечеткого подхода и использующих банк независимых наблюдателей, здесь применяется банк взаимодействующих наблюдателей.

Постановка задачи

Коротко постановка задачи может быть сформулирована следующим образом. Пусть задана линейная стационарная динамическая система

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}\mathbf{u}(t); \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{H}\mathbf{x}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{x} — n -мерный вектор состояния; \mathbf{u} — m -мерный вектор входа; \mathbf{y} — p -мерный вектор выхода; \mathbf{F} — $n \times n$ -матрица динамики; \mathbf{G} — входная $n \times m$ -матрица; \mathbf{H} — выходная $p \times n$ -матрица. Задача состоит в синтезе средств функционального диагностирования в пространстве сигналов системы (1) при использовании модели нечеткого технического состояния и с включением в состав средств банка наблюдателей.

Прокомментируем рассматриваемую постановку задачи. По классификации, приведенной в работе [2], различают две основные обобщенные постановки задачи при синтезе средств функционального диагностирования для поиска отказов, обозначаемых как диагностирование в пространстве сигналов и диагностирование в пространстве параметров. Постановки задачи различаются, прежде всего, используемой моделью отказа.

В первом случае отказ моделируется как дополнительное слагаемое δ в уравнении динамики:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}\mathbf{u}(t) + \delta; \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{H}\mathbf{x}(t). \end{aligned} \quad (2)$$

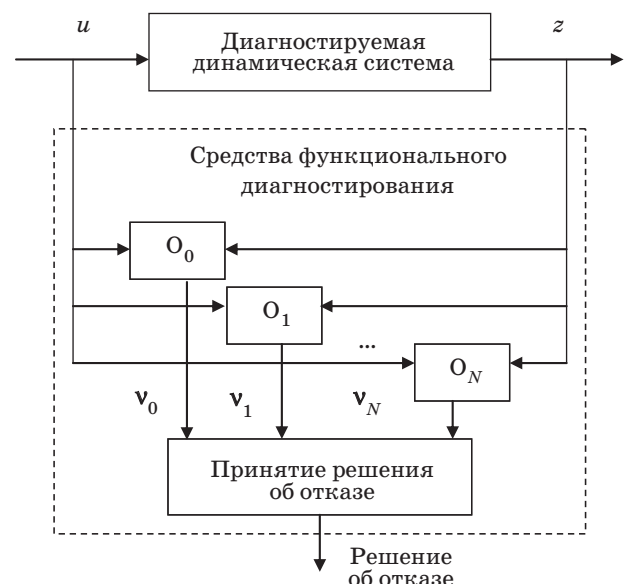
При этом число типов N однократных отказов равно размерности n вектора состояния диагностируемой системы. Первый тип моделируется дополнительным слагаемым в первом уравнении динамики, второй тип — во втором уравнении и т. д.; отказы внутри типа различаются уровнем слагаемого δ .

Во втором случае отказ моделируется как отклонение значений элементов системных матриц от номинала:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= (\mathbf{F} + \Delta\mathbf{F})\mathbf{x}(t) + (\mathbf{G} + \Delta\mathbf{G})\mathbf{u}(t); \\ \mathbf{y}(t) &= (\mathbf{H} + \Delta\mathbf{H})\mathbf{x}(t). \end{aligned}$$

При этом число типов N однократных отказов равно числу элементов системных матриц \mathbf{F} , \mathbf{G} , \mathbf{H} .

Далее при построении средств диагностирования будет использована известная структура [4, 7–10], упрощенно представленная на рис. 1, которая основана на банке наблюдателей (банке фильтров Калмана в стохастическом случае). Каждый наблюдатель O_i настроен на одну из модифициций диагностируемой системы (исправную — O_0 , неисправную с 1-м отказом — O_1 , неисправную со 2-м отказом — O_2 и т. д.). Формируются в общем случае векторные невязки $\mathbf{v}_0, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_N$ между наблюдаемым выходом динамической системы и выходом каждого из наблюдателей. По результатам их анализа принимается решение о техническом состоянии диагностируемой системы.



■ Рис. 1. Структура системы диагностирования

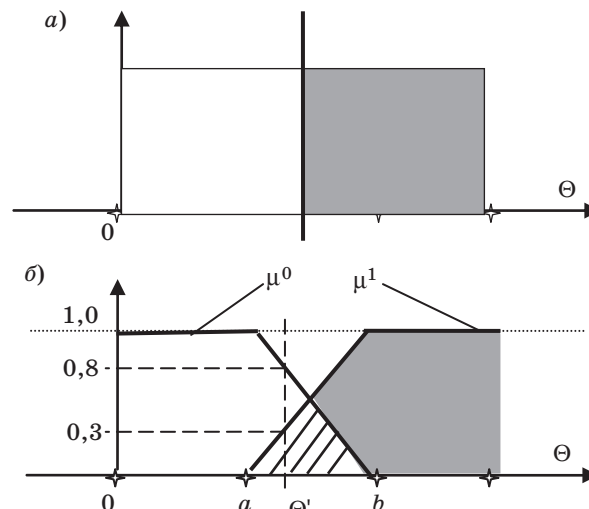
Можно считать, что для модели «четкого» технического состояния процедуры синтеза средств диагностирования с использованием банка наблюдателей достаточно хорошо изучены, однако для нечеткой модели технического состояния требуются дополнительные уточнения. Заметим также, что при любой трактовке понятия «техническое состояние» реализация средств диагностирования с банком наблюдателей может быть различной. В частности, могут использоваться как взаимодействующие при обработке информации наблюдатели [9], так и независимые наблюдатели [7, 8, 10].

Обсудим понятие технического состояния и, как следствие, отказа, которые далее определяются несколько иначе, нежели это обычно принято. Главное отличие состоит в предположении отсутствия четкой границы между работоспособным и неработоспособным техническими состояниями как системы, так и ее элементов. Представляется, что используемое ниже понятие нечеткого технического состояния достаточно хорошо отражает сложившийся на практике инженерный подход. Действительно, инженер, руководствуясь значением параметра, который определяет техническое состояние объекта, может считать, что объект работоспособен, если значение этого параметра находится в некотором диапазоне. Причем в зависимости от конкретного значения этого параметра инженер может считать, что объект работоспособен и соответственно неработоспособен в разной степени.

Определим *нечеткое техническое состояние объекта* по параметру Θ как лингвистическую переменную, характеризующуюся, например, двумя термами (нечеткими множествами) — работоспособное и неработоспособное технические состояния, которые описываются соответствующими функциями принадлежности μ^0 и μ^1 .

В случае «четкого» технического состояния объекта (рис. 2, а) области значений определяющего параметра Θ , соответствующие работоспособному и неработоспособному техническим состояниям объекта (на рисунке они обозначены прямоугольниками разной окраски), разделены четкой границей. В другом случае (рис. 2, б) эти области пересекаются (область пересечения отмечена штриховкой) и описываются соответствующими функциями принадлежности с параметрами a и b . В результате при любом значении определяющего параметра $\Theta = \Theta'$ техническое состояние объекта может быть соотносено с нечетким множеством как работоспособных ($\mu^0 = 0,8$), так и неработоспособных ($\mu^1 = 0,3$) состояний.

В дальнейшем при рассмотрении вопросов диагностирования в пространстве сигналов будем опираться на две группы параметров, определяю-



■ Рис. 2. Иллюстрация понятий «четкого» (а) и «нечеткого» (б) технических состояний

щих техническое состояние динамической системы: невязки v_i , $i = 0, N$, формируемые при сопоставлении выходов системы с выходами наблюдателей, а также оценки δ_i , $i = 0, N$ дополнительных слагаемых в правой части уравнений (2), вычисляемые в соответствующих наблюдателях.

Будем предполагать, что невязка v_i , $i = 0, N$, формируемая при сопоставлении выходов системы и i -го наблюдателя, может быть представлена лингвистической переменной с двумя термами — «малая» и «большая», для которых заданы функции принадлежности $\mu_{v_i}^0$ и $\mu_{v_i}^1$, $i = 0, N$. Терм «малая» соответствует ситуации, когда модель, использованная при синтезе наблюдателя, адекватна текущему техническому состоянию диагностируемой системы. Появление хотя и малого, но не нулевого значения этой невязки объясняется переходными процессами, сопровождающими оценивание, отсутствием на практике полной адекватности используемой при синтезе наблюдателя модели диагностируемой системы, неучтенными возмущениями ее динамики или выхода. Терм «большая» соответствует ситуации, когда модель, использованная при синтезе наблюдателя, существенно неадекватна текущему техническому состоянию диагностируемой системы. Так бывает, если, например, диагностируемая система находится в i -м техническом состоянии, а наблюдатель настроен на j -е техническое состояние. При этом параметры $\{a_i, b_i | i = 0, N\}$ функций принадлежности определяются равенствами

$$a_i = \min_i \{v_i | S_j, j \neq i\};$$

$$b_i = \max_i \{v_i | S_j, j = i\}.$$

В отношении слагаемого, моделирующего отказ, будем также предполагать, что оно описывается лингвистической переменной с двумя термами — «работоспособно» и «неработоспособно», для которых заданы соответствующие функции принадлежности $\mu_{\delta_i}^0$ и $\mu_{\delta_i}^1$, $i = \overline{1, N}$.

Синтез средств диагностирования с независимыми наблюдателями

Банк наблюдателей

Как следует из рис. 1, в данном случае в задаче синтеза средств диагностирования можно выделить две части — синтез наблюдателей и формирование правила принятия решений.

Наблюдатели могут быть синтезированы по разным правилам, вытекающим из различий в постановке задачи. При диагностировании в пространстве сигналов эта процедура достаточно проста, однако для полноты изложения приведем ее основные моменты. Отличительной особенностью структуры наблюдателя в этом случае является наличие обратной связи по невязке $\mathbf{v} = \mathbf{y} - \mathbf{y}^*$ [9, 13]:

$$\dot{\mathbf{x}}_i^*(t) = \mathbf{F}_i^* \mathbf{x}_i^*(t) + \mathbf{G}_i^* \mathbf{u}(t) + \mathbf{L}_i (\mathbf{y} - \mathbf{y}_i^*);$$

$$\mathbf{y}_i^*(t) = \mathbf{H}_i^* \mathbf{x}_i^*(t).$$

При этом вектор \mathbf{x}_i^* состояния наблюдателя O_i , $i = \overline{0, N}$ образуется путем добавления в вектор \mathbf{x} состояния диагностируемой системы переменной δ_i , моделирующей отказ, т. е. $\mathbf{x}_i^{*T} = [\mathbf{x}^T \ \delta_i^T]$. Причем с учетом предположения о постоянстве значения δ_i уравнение для нее имеет вид $\dot{\delta}_i = 0$.

В результате матрицы диагностируемой системы при наличии в ней i -го отказа принимают вид

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ & \mathbf{F}_0 & & & & \\ & \dots & & & & \\ & \mathbf{1} & & & & \\ & \dots & & & & \\ & \dots & & & & \\ \mathbf{0} \dots \mathbf{0} & \mathbf{0} & & & & \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ \mathbf{0} \dots \mathbf{0} & & & & & \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ & \mathbf{H}_0 & & & & \\ & \dots & & & & \\ & \dots & & & & \\ & \dots & & & & \\ & \dots & & & & \\ \mathbf{0} \dots \mathbf{0} & & & & & \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где в матрице динамики единица последнего столбца размещается в i -й строке. Для единообразия номинальные матрицы диагностируемой системы также можно записать как образованные из исходных матриц путем добавления нулевых строк или столбцов. Основные матрицы наблюдателей будут совпадать с матрицами (3). При этом если в диагностируемой системе в процессе работы возникает i -й отказ, то в наблюдателе формируется оценка этого составного вектора, в том

числе формируется и оценка $\hat{\delta}_i$ значения переменной δ_i .

Для завершения синтеза наблюдателей необходимо определить матрицы \mathbf{L}_i обратной связи. Для случая, когда исходная система стационарна и наблюдаема, алгоритм выбора этой матрицы известен и достаточно прост [13]. Он исходит из требования устойчивости матрицы $\mathbf{F}_0^* - \mathbf{L}_0 \mathbf{H}_0^*$:

1. Определить характеристический многочлен $\varphi_{\mathbf{F}_i^*}(\lambda) = \lambda^n + \alpha_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + \alpha_0$ для матрицы \mathbf{F}_i^* .

2. Определить желаемые с точки зрения длительности переходного процесса характеристические числа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ для матрицы $\mathbf{F}_i^* - \mathbf{L}_i \mathbf{H}_i^*$ и соответствующий им характеристический многочлен

$$\varphi_{\mathbf{F}_i^* - \mathbf{L}_i \mathbf{H}_i^*}(\lambda) = \prod_{j=1}^n (\lambda - \lambda_j) = \lambda^n + \alpha'_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + \alpha'_0.$$

3. Определить матрицу (вектор) \mathbf{L}_i обратной связи с использованием выражения $\mathbf{l}_j = \alpha'_j - \alpha_j$, $j = \overline{1, n}$.

Правило принятия решений об отказе

Обсуждая правило принятия решения об отказе, следует иметь в виду следующее. На практике средства диагностирования характеризуются не только ненулевыми значениями невязок, формируемых в наблюдателях, настроенных на текущее техническое состояние системы, но и ошибками при формировании оценки $\hat{\delta}_i$. Эти факты имеют общие причины в виде переходных процессов, сопровождающих оценивание, и отсутствия на практике полной адекватности используемой при синтезе наблюдателя модели диагностируемой системы. В связи с этим решение об отказе целесообразно принимать не упрощенно, например по критерию минимума взвешенной нормы невязки, т. е.

$$i^* = \arg \min_i (\mathbf{v}_i^T \mathbf{M} \mathbf{v}_i),$$

где \mathbf{M} — весовая матрица невязки, а по более сложному нечеткому правилу. Это правило основано на использовании определяемого ниже понятия коэффициента уверенности K_i в i -м техническом состоянии. Правило требует достижения заданного уровня A коэффициентом уверенности K_i для доминирующего по значению этого коэффициента технического состояния, т. е. должно выполняться

$$K^* = \max_i \{K_i\} \geq A.$$

Для получения коэффициентов уверенности $\{K_i | i = \overline{0, N}\}$ предварительно определяются так называемые обобщенные степени принадлежности

сти $\{\tilde{\mu}_i^1 | i = \overline{0, N}\}$ технического состояния диагностируемой системы к каждому из возможных нечетких технических состояний. Эти характеристики обобщают информацию о техническом состоянии системы по всем наблюдателям и формируются на основе множеств значений двух диагностических показателей — невязки $\{v_i | i = \overline{0, N}\}$ и оценки ошибки $\{\hat{\delta}_i | i = \overline{1, N}\}$. Выражение для обобщенной степени принадлежности $\tilde{\mu}_i^1$ формируется в соответствии со следующим логиколингвистическим выражением, записанным в терминах определенных выше лингвистических переменных и отражающим ожидаемую реакцию средств диагностирования при техническом состоянии S_i :

$$S_i \leftrightarrow (\text{невязка } i\text{-го наблюдателя} = \text{малая}) \wedge (\text{оценка ошибки в } i\text{-м наблюдателе} = \text{большая}) \wedge \left[\bigwedge_{j \neq i} (\text{невязка } j\text{-го наблюдателя} = \text{большая}) \right].$$

Объяснение этого выражения очевидно. Действительно, наблюдатель, адекватный техническому состоянию системы, будет формировать малую невязку, остальные же наблюдатели — большую. При этом говорить о соответствующем отказе можно лишь в том случае, когда величина δ_i — большая. Пока исключим из рассмотрения ситуации, когда среди рассматриваемых отказов присутствуют эквивалентные или малоразличимые. Следуя этому выражению и воспользовавшись соответствующими функциями принадлежности, запишем выражение для $\tilde{\mu}_i^1$:

$$\tilde{\mu}_i^1 = \mu_{v_i}^1 \mu_{\hat{\delta}_i}^1 \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^N \mu_{v_j}^0.$$

Далее коэффициент уверенности K_i для каждого технического состояния S_i вычисляется по правилу «весовых коэффициентов» путем определения вклада обобщенной степени принадлежности $\tilde{\mu}_i^1$ в сумму этих степеней для всех состояний:

$$K_i = \frac{\tilde{\mu}_i^1}{\sum_{j=0}^N \tilde{\mu}_j^1}.$$

Моделирование

Рассмотрим пример системы, заимствованный из работы [2], характеризующийся матрицами

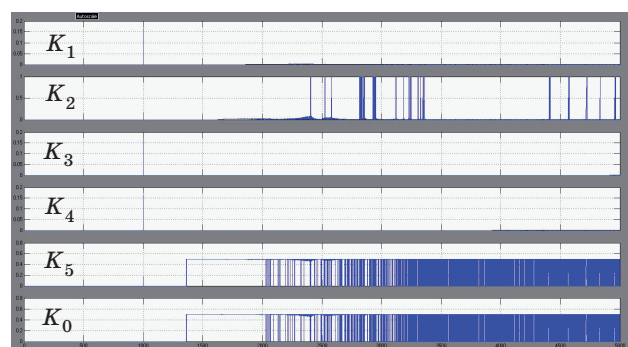
$$F = \begin{bmatrix} -0,0061 & 0,5122 & -0,0579 & 0,029 & 0,0377 \\ -0,5122 & -0,1868 & 0,6803 & -0,1417 & -0,2028 \\ -0,0579 & -0,6803 & -0,7645 & 0,7531 & 0,8508 \\ -0,29 & -0,1417 & -0,7531 & -0,3258 & -0,5974 \\ -0,0377 & -0,2028 & -0,8508 & -0,5974 & -1,242 \end{bmatrix};$$

$$G = \begin{bmatrix} 0,0452 \\ 0,2335 \\ 0,2779 \\ 0,09742 \\ 0,1329 \end{bmatrix};$$

$$H = [0,0452 \quad -0,2334 \quad 0,2779 \quad -0,09743 \quad -0,1329].$$

По смыслу данная система представляет собой редуцированную модель контура управления самолетом по высоте, которая была получена линеаризацией уравнений движения самолета в окрестностях номинальной траектории. Полученная модель была редуцирована путем приведения к сбалансированной канонической форме и отбрасыванием наименее значимых переменных состояния. Это описание охватывает управляемый объект, сервопривод управления рулем, датчик высоты и регулятор.

Для этого примера в среде Simulink было проведено моделирование задачи диагностирования в пространстве сигналов. Поскольку размерность пространства состояний равна 5, то использовался банк из шести наблюдателей. Отказ моделировался в виде скачка единичного уровня в первом интеграторе на 1000-м шаге моделирования. На вход системы подавался синусоидальный сигнал с амплитудой 0,5. На рис. 3 представлены временные диаграммы полученных коэффициентов уверенности. Видно, что средства диагностирования не формируют ожидаемого результата, когда до появления отказа коэффициент K_0 должен принимать устойчивое значение, близкое к еди-



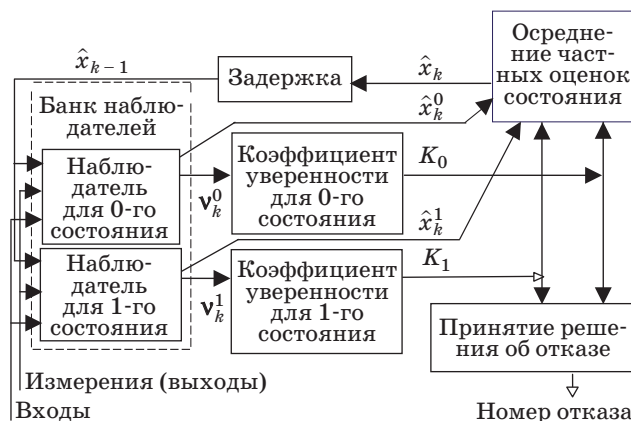
■ Рис. 3. Коэффициенты уверенности при независимых наблюдателях

нице, а остальные коэффициенты — значения, близкие к нулю. После появления отказа коэффициент K_1 должен принимать устойчивое значение, близкое к единице, а остальные коэффициенты — значения, близкие к нулю. При больших уровнях нарушения работа средств диагностирования приобретает устойчивый характер.

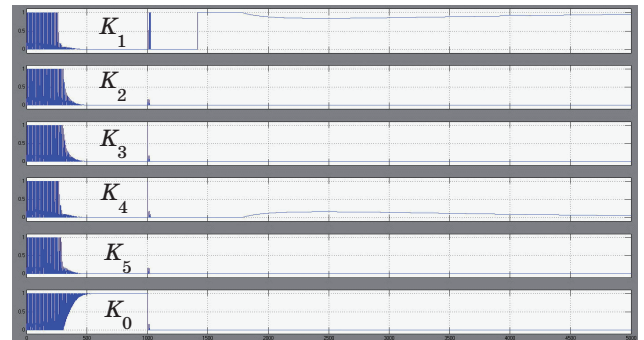
Синтез средств диагностирования с взаимодействующими наблюдателями

Банк наблюдателей

В настоящем разделе предлагается алгоритм диагностирования, предполагающий использование банка взаимодействующих наблюдателей. При этом применяется прежнее правило принятия решения об отказе. Как будет показано ниже, эффективность рассматриваемого алгоритма существенно выше, нежели у предыдущего. В случае алгоритма для простейшего варианта одного отказа (рис. 4) техническое состояние может принимать только два значения. В результате в средствах диагностирования применяются два наблюдателя. Как и прежде, на основании невязок, формируемых при сопоставлении выходов наблюдателей и диагностируемой системы, определяются коэффициенты уверенности. Основная особенность алгоритма заключается в том, что на каждом очередном шаге вычислений каждый из наблюдателей опирается не на автономно сформированную им частную оценку вектора состояния, а на оценку состояния, полученную в результате осреднения частных оценок по всем наблюдателям. Причем в качестве весовых коэффициентов при осреднении выступают текущие значения сформированных на данном шаге коэффициентов уверенности. В результате из-за использования осреднения достоверность этой оценки возрастает. При этом определение весовых коэффициентов



■ Рис. 4. Структура алгоритма диагностирования с взаимодействующими наблюдателями



■ Рис. 5. Коэффициенты уверенности при взаимодействующих наблюдателях

(коэффициентов уверенности) производится достаточно точно благодаря вычислению их во всех наблюдателях при одном и том же состоянии по результатам одного шага моделирования.

При другой интерпретации структурных блоков можно заметить сходство данного алгоритма с известным алгоритмом диагностирования стохастической системы, использующим гауссову аппроксимацию апостериорной плотности вероятности [8].

Моделирование

Результаты моделирования задачи диагностирования для приведенного выше примера с использованием взаимодействующих наблюдателей показаны на рис. 5. Видно, что средства диагностирования формируют ожидаемый результат. Так, на интервале времени до появления отказа коэффициент уверенности K_0 для работоспособного технического состояния после переходного процесса, связанного с начальным оцениванием, принимает значение, равное единице. После появления отказа на 1000-м шаге моделирования соответствующий ему коэффициент уверенности сначала кратковременно, а затем через 400 шагов устойчиво принимает значение, близкое единице.

Дополнительно было произведено моделирование задачи диагностирования для случая, когда модель, используемая в наблюдателях, не вполне адекватна реальной системе. При этом был принят уровень неадекватности по всем элементам матрицы динамики, равный 10 %. В результате моделирования было установлено сохранение синтезированными средствами качества диагностирования.

Заключение

В настоящей работе рассматриваются методы диагностирования линейных динамических систем, основанные на использовании банка наблю-

дателей и нечеткого анализа при принятии решения об отказе. Посредством моделирования в среде Simulink проанализированы два метода — с независимыми и взаимодействующими наблюдателями. Показано, что при использовании вто-

рого варианта достигается более высокое качество диагностирования.

Работа проводилась при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 08-08-00215а.

Литература

1. **Игнатъев М. Б. и др.** Контроль и диагностика робототехнических систем / ЛИАП. — Л., 1985. — 160 с.
2. **Мироновский Л. А.** Функциональное диагностирование динамических систем. М.-СПб.: Изд-во МГУ-ГРИФ, 1998. — 256 с.
3. **Frank P. M.** Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy — A survey and some new results // *Automatica*. 1990. Vol. 26. P. 459–474.
4. **Жирабок А. Н., Шумский А. Е.** Методы и алгоритмы функционального диагностирования сложных технических систем. — Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. — 134 с.
5. **Колесов Н. В.** Многоуровневое проектирование средств тестового и функционального диагностирования специализированных вычислительных комплексов / ЦНИИ «Румб». — Л., 1992. — 70 с.
6. **Takagi T., Sugeno M.** Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1985. Vol. 15. N 1. P. 116–132.
7. **Stancu A., Puig V., Quevedo J.** Passive robust fault detection using interval observers: application to the damadics benchmark problem // 10th IEEE interna-
8. **Дмитриев С. П., Колесов Н. В., Осипов А. В.** Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем / ЦНИИ «Электроприбор». — СПб., 2003. — 206 с.
9. **Блинов А. Н., Осипов А. В.** Диагностирование параметрических отказов методами нечеткой логики // X Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, Санкт-Петербург, 23–27 июня 2007 г. С. 224–229.
10. **Mendouca L. et al.** Fault isolation using fuzzy model-based observers / 6th IFAC symp. on Fault Detection. 2006. Beijing. P. R. China. P. 142–150.
11. **Ракитянская А. Б., Ротштейн А. П.** Диагностика на основе нечетких отношений // *Автоматика и телемеханика*. 2007. № 12. С. 162–177.
12. **Chen G., Wang J., Shien L. S.** Interval Kalman filtering // *IEEE Transaction on aerospace and electronic systems*. 1997. Vol. 33. N 1. P. 250–257.
13. **Андреев Ю. Н.** Управление конечномерными линейными объектами. — М.: Наука, 1976. — 424 с.

УДК 004.413

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ИНТЕГРАЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ УНАСЛЕДОВАННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСИНХРОННОГО ПИ-ИСЧИСЛЕНИЯ

А. Д. Брейман,

канд. техн. наук, доцент

А. Ю. Зерний,

аспирант

Б. В. Казьмин,

аспирант

Московский государственный университет приборостроения и информатики

Рассматриваются проблемы организации распределенных систем унаследованных приложений, использующих сторонние компоненты для управления интеграцией и последующим внутренним взаимодействием. Исследуется возможность устранения блокировок, которые возникают при взаимодействии приложений, применяющих разные типы связи. В качестве формальной модели исследования применяется асинхронное пи-исчисление. Предложен набор рекомендаций для организации рассматриваемых систем.

Ключевые слова — интеграция приложений, промежуточное программное обеспечение, асинхронное пи-исчисление.

Введение

Развитие технологий создания распределенных систем в последние годы во многом определено возрастающими требованиями бизнеса. Современные распределенные системы используют приложения сторонних поставщиков информационных услуг, которые реализуют типовые подзадачи более эффективно. Такой подход позволяет улучшить качество решения задач и минимизировать сопутствующие расходы. С развитием рассматриваемого подхода сформировалось новое направление в инженерии программного обеспечения (ПО), лежащего в основе таких систем.

Объектом нашего исследования является процесс интеграции гетерогенных приложений сторонних поставщиков информационных услуг в распределенную систему и управление их взаимодействием. При проектировании таких систем возникает необходимость создания универсальной архитектуры, позволяющей подключать приложения со скрытой внутренней организацией. Также возникает необходимость в инструментах адаптации рассматриваемого класса при-

ложений для их использования в процессах проектируемой распределенной информационной системы.

Очевидно, что сторонние приложения можно использовать не только в качестве поставщиков специализированных услуг, но и для эффективного решения задач интеграции приложений и управления распределенной системой. Целью работы является исследование проблем блокировок при взаимодействии интегрируемых в распределенную систему унаследованных приложений, ориентированных на разные типы связи [1, 2], что в свою очередь поможет решить задачу автоматизации создания промежуточного ПО, направленного на управление взаимодействием в таких системах.

Требования к архитектуре

Сформулируем общие требования к архитектуре системы на основе интегрированных приложений, использующих для управления интеграцией и последующим внутренним взаимодействием сторонние сервисы:

1) управление интеграцией, реализация канала, трансляция данных, маршрутизация сообщений, хореография процессов и прочее управление взаимодействием должны быть вынесены в промежуточное ПО;

2) клиенты системы, т. е. приложения, интегрируемые в общую среду, должны быть слабо связаны с промежуточным ПО;

3) промежуточное ПО должно через соответствующие адаптеры предоставлять возможность взаимодействовать с клиентом на основе любого типа связи;

4) адаптер клиента должен минимально необходимо расширять функционал клиента;

5) взаимодействие «клиент — клиент» должно поддерживать все возможные модели связывания.

Интеграция на уровне приложения [2, 3] в рамках рассматриваемой архитектуры является исключительным случаем и требует подробного исследования. Отметим, что такая архитектура подразумевает связывание не приспособленных для того клиентов, комбинирование продиктованных их природой связей при необходимости соблюдать условия, накладываемые особенностями исследуемой области. На этом уровне интеграции возникают проблемы во взаимодействии друг с другом приложений, ориентированных на разные типы связи. Для того чтобы исследовать возможность устранения блокировок, которые, как будет показано далее, возникают между разнотипными приложениями, необходимо рассмотреть используемые типы связи и построить математическую модель системы на основе таких типов.

Классификация типов связи

Исходя из особенностей исследуемой области можно утверждать, что интегрируемые компоненты не зависимы друг от друга и полностью реализуют свой функционал. При построении архитектуры в рамках рассматриваемого класса систем необходимо учесть следующее условие: промежуточное ПО с помощью соответствующих адаптеров должно обеспечивать взаимодействие клиентов, ориентированных на разные типы связи. Перечислить все существующие и перспективные технологии связи не представляется возможным, однако, как показано в работе [4], можно считать достаточным рассмотрение приведенных в работе шести типов связи:

- 1) сохраняющая асинхронная связь;
- 2) сохраняющая синхронная связь;
- 3) нерезидентная асинхронная связь;
- 4) нерезидентная синхронная связь с синхронизацией по приему;

5) нерезидентная синхронная связь с синхронизацией по доставке;

6) нерезидентная синхронная связь с синхронизацией по ответу.

Для исследования возможности взаимодействия интегрируемых приложений необходимо промоделировать парные сочетания приведенных типов связи.

Исследование сочетаний типов связи

Для исследования поведения взаимодействующих приложений предлагается использовать асинхронное пи-исчисление [5–7]. В статье [8] представлено формализованное описание процессов, отражающих приведенные в работе [4] типы связи, а также показано, что из 36 возможных сочетаний типов связи 12 сочетаний приводят к блокировке работы системы. В качестве примера возьмем пару типов связи, на основе которой, как будет показано далее, можно продемонстрировать вариант взаимодействия с блокировкой процессов.

Введем:

m_{AC} — сообщение, отправителем которого является процесс A , а получателем — процесс C ;

m_{CA} — ссылка на процесс $C_{app.mess}$

Отправитель (нерезидентная синхронная связь с синхронизацией по ответу)

$$A = (v m_{AC} u) \times \\ \times (\bar{x} u | u v. (\bar{v} m_{AC} | u m_{CA}. m_{CA} s. m_{CA} s. A')),$$

где $A' = \tau_{A'}$ — процесс, следующий за синхронизацией взаимодействия.

Получатель (нерезидентная синхронная связь с синхронизацией по доставке)

$$C = (v c m)(C_{app} | C_{app.buff} | C_{app.mess}),$$

где $C_{app.buff}$ — процесс буфера; $C_{app.mess}$ — процесс счетчика состояния получателя; C_{app} — процесс получателя; C' — процесс, предшествующий обработке сообщения; C'' — процесс, следующий за обработкой сообщения:

$$C_{app.buff} = x u. (v v) \times \\ \times (\bar{u} v | v m_{AC}. (v d)(\bar{c} d | d e. (\bar{e} m_{AC} | d f. \bar{e} u)));$$

$$C_{app.mess} = (v q s)(! m p. (\bar{p} q | \bar{q} s));$$

$$C_{app} = C'. c d. (v e)(\bar{d} e | e m_{AC}. (v p) \times \\ \times (\bar{m} p | p q. ((v f)(\bar{d} f) | e u. \bar{u} q) | \tau_C. C''));$$

$$C' = \tau_{C'}; \quad C'' = \tau_{C''}.$$

Для исследования возможностей совместной работы интегрируемых приложений с учетом сформулированных требований к архитектуре необходимо построить модель взаимодействия формализованных выше процессов.

Рассмотрим в качестве примера с блокировкой процессов пару «нерезидентная синхронная связь с синхронизацией по ответу — нерезидентная синхронная связь с синхронизацией по доставке». Для моделирования взаимодействия выбранных процессов с учетом описанных выше условий введем процесс, отражающий работу промежуточного программного обеспечения, выполняющего транслирующую функцию с учетом выбранных типов связи:

$$B = xu.(v\bar{v})(\bar{w}|vm_{AC}.\bar{v}d) \times \\ \times \bar{y}d | de.(\bar{e}m_{AC} | dm_{CA}.\bar{u}m_{CA})).$$

В результате процесс системы будет состоять из трех параллельных процессов:

$$S = (vxy)(A|B|C);$$

$$S \Rightarrow (vxyuv m_{AC} qs)(qs.A' | (vcd\bar{e}fmp) \times \\ \times (C'' | 0 | 0 | !mp.(\bar{p}q | \bar{q}s))) \equiv \\ \equiv C'' | (vqspm)(qs.A' | !mp.(\bar{p}q | \bar{q}s)) \sim \\ \sim (vqs)(qs.A' | C'' = S' \sim C''); \\ (x, y, u, v, m_{AC}, q, s) \notin fn(A');$$

$$(x, y, u, v, m_{AC}, q, s, c, d, e, f, m, p) \notin fn(C'').$$

Блокировка: процессу A для продолжения работы (перехода к процессу A') необходима синхронизация по $q \in bn(S')$; одновременно процесс C продолжает работу (процесс C''), при этом $q \notin fn(C'')$. Процесс S' сильно конгруэнтен процессу C'' (существует отношение сильной бисимуляции [9] между процессами S' и C''), вследствие чего процесс A' недостижим.

Устранение блокировок

Для выработки рекомендаций для построения рассматриваемого класса систем необходимо исследовать возможность решения выявленных блокировок.

Для обеспечения и управления взаимодействием приложений используется посредник — специальное ПО промежуточного уровня. Специфика рассматриваемого класса систем накладывает ограничения на изменения системы, а именно, исходя из сложности внесения изменений в компоненты, решение проблемы блокировок может быть достигнуто только благодаря изменению промежуточного ПО. Однако стоит отметить, что существуют исключительные условия принципиального характера, вынуждающие вносить минимальные изменения в интегрируемые компоненты.

Причиной возникновения блокировок при связывании компонентов рассматриваемого класса систем является невозможность осуществить синхронизацию отправителя (инициатора связывания) с получателем. В вариантах связываний с отправителями, работающими по правилам синхронной связи, отправитель сразу после отправки сообщения блокируется до получения извещения определенного типа от получателя. В случае, если получатель настроен на асинхронную или синхронную связь, но с извещением неподходящего типа, отправитель никогда не получит необходимое для продолжения работы извещение. Единственный вариант связывания с блокировкой и отправителем, работающим по правилам асинхронной связи, — связывание отправителя с асинхронной сохранной связью с получателем с нерезидентной асинхронной связью. Обеспечение сохранной связи с таким получателем невозможно. Причина та же самая: буфер отправителя, обеспечивающий сохранную связь, не может осуществить синхронизацию с получателем, а значит гарантировать отправителю доставку отправленного сообщения.

Определены три типа синхронизации — по приему, по доставке и по ответу. Типы синхронизации характеризуются моментом отправки извещения (сообщения, снимающего блокировку отправителя) получателем. Отправку извещения можно считать следствием смены состояния получателя, — перехода к обработке полученного сообщения или завершения обработки и перехода к обработке последующего сообщения. При этом извещение по ответу, отправляемое получателем в момент времени после доставки сообщения, является достаточным для снятия блокировки отправителя с синхронизацией по приему.

Для устранения выявленных блокировок необходимо обеспечить синхронизацию отправителя с получателем. С учетом ограничений рассматриваемого класса систем решение должно достигаться за счет изменения поведения посредника (ПО промежуточного уровня). Посредник должен гарантированно отправлять извещение, необходимое для синхронизации. При этом момент отправки извещения не должен опережать действительный переход получателя в соответствующее состояние. Таким образом, необходимым для устранения блокировки требованием к получателю является способность возвращать на запрос посредника состояние обработки сообщения.

Рассмотрим решение блокировки на примере связывания отправителя, работающего по правилам нерезидентной синхронной связи с синхронизацией по ответу, с получателем, поддерживающим нерезидентную синхронную связь с синхронизацией по доставке. Ранее было показано,

что такое связывание приводит к блокировке отправителя.

Отправителю, процессу A , для продолжения работы (перехода к процессу A') необходима синхронизация по $q \in bn(S')$; одновременно получатель, процесс C , продолжает работу (процесс C''), при этом $q \notin fn(C'')$. Процесс A' , продолжение работы отправителя, недостижим.

Рассмотрим состояние системы, предшествующее синхронизации процесса C с процессом B :

$$\begin{aligned} S &= (vxy)(A | B | C) \Rightarrow \\ &\Rightarrow (vu)(um_{CA}.m_{CA}s.m_{CA}s.A' | (vd) \times \\ &\times (dm_{CA}.\bar{u}m_{CA} | (vqmps)(\bar{d}q | \tau_C.C'' | \bar{q}s | !mp.(\bar{p}q | \bar{q}s)))) = \\ &= S_1 \Rightarrow (vqs)(qs.A' | C'' | (vmp)(!mp.(\bar{p}q | \bar{q}s))) = S'. \end{aligned}$$

Процесс S_1 — система S в состоянии, предшествующем синхронизации процесса C с процессом B . Процесс S' — система S в заключительном состоянии. Процесс A' недостижим.

Процессу A для продолжения работы (перехода к процессу A') необходима синхронизация по $q \in bn(S')$. Пусть $S'' = S_1$. Расширим S'' так, чтобы обеспечивалась необходимая синхронизация:

$$\begin{aligned} S'' &= (vu)(A_1 | (vd)(B_1 | (vqmps) \times \\ &\times (\bar{d}q | C_1 | \bar{q}s | !mp.(\bar{p}q | \bar{q}s))))); \\ A_1 &= um_{CA}.m_{CA}s.m_{CA}s.A'; \\ B_1 &= dm_{CA}.\bar{u}m_{CA}; \quad C_1 = \tau_C.C''. \end{aligned}$$

Необходимую синхронизацию A_1 может обеспечить только процесс B_1 . Расширим B_1 необходимым поведением:

$$B'_1 = dm_{CA}.(vm_{CA})(\bar{u}m_{CA} | \overline{m_{CA}s} | \overline{m_{CA}s}).$$

Обеспечиваемая расширенным процессом B'_1 синхронизация должна происходить после завершения обработки запроса процессом C_1 . Добавим в процесс B'_1 ожидание сообщения о достижении процессом C_1 необходимого состояния:

$$\begin{aligned} B''_1 &= dm_{CA}.m_{CA}s.m_{CA}s.(vm_{CA}) \times \\ &\times (\bar{u}m_{CA} | \overline{m_{CA}s} | \overline{m_{CA}s}). \end{aligned}$$

Необходимым требованием к получателю является способность к фиксации и возвращению состояния, достаточного для синхронизации; в рассматриваемом случае это состояние, соответствующее завершению обработки запроса. Интегрируемое приложение может реализовывать необходимое поведение, в противном случае требуется минимальное расширение унаследо-

ванного приложения. В рассматриваемом сочетании достаточно расширить поведение (или задействовать имеющийся функционал) получателя так, чтобы подпроцесс получателя C_1 возвращал состояние, соответствующее завершению обработки:

$$C'_1 = \tau_C.(\bar{m}p | C'').$$

Подставим в S'' процесс B'_1 вместо B_1 и процесс C'_1 вместо C_1 :

$$\begin{aligned} S''' &= (vu)(um_{CA}.m_{CA}s.m_{CA}s.A' | (vd) \times \\ &\times (B''_1 | (vqmps)(\bar{d}q | C'_1 | \bar{q}s | !mp.(\bar{p}q | \bar{q}s)))) \Rightarrow \\ &\Rightarrow A' | C''; \end{aligned}$$

$$(x, y, u, v, m_{AC}, q, s) \notin fn(A');$$

$$(x, y, u, v, m_{AC}, q, s, c, d, e, f, m, p) \notin fn(C'').$$

Процесс S''' (процесс S'' с измененным поведением) не имеет блокировок. Расширим процесс B в соответствии с B'_1 :

$$\begin{aligned} B' &= xu.(vu)(\bar{u}v | vm_{AC}.(vd) \times \\ &\times \bar{y}d | de.(\bar{e}m_{AC} | dm_{CA}.m_{CA}s.m_{CA}s.(vm_{CA}) \times \\ &\times (\bar{u}m_{CA} | \overline{m_{CA}s} | \overline{m_{CA}s}))). \end{aligned}$$

Расширим процесс C_{app} в соответствии с C'_1 :

$$\begin{aligned} C'_{app} &= C'.cd.(ve)(\bar{d}e | em_{AC}.(vp) \times \\ &\times (\bar{m}p | pq.((vf)(\bar{d}f) | eu.\bar{u}q) | \tau_C.(\bar{m}p | C''))); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{final} &= (vxy)(A | B' | (vcm) \times \\ &\times (C'_{app} | C_{app}.buff | C_{app}.mess)) \Rightarrow A' | C''; \end{aligned}$$

$$(x, y, u, v, m_{AC}, q, s) \notin fn(A');$$

$$(x, y, u, v, m_{AC}, q, s, c, d, e, f, m, p) \notin fn(C'').$$

Система S_{final} не имеет блокировок. Проблема синхронизации решена расширением поведения посредника (B'_1) и минимальным расширением поведения получателя (C'_1). Аналогичным образом с помощью предложенного подхода решаются выявленные блокировки возможных сочетаний типов связи [8].

Заключение

В настоящей работе были исследованы проблемы интеграции компонентов в распределенных системах, использующих для управления интеграцией и последующим внутренним взаимодействием сторонние сервисы. Были сформу-

лированы требования к архитектуре такого класса систем, а также описаны возможные типы связи интегрируемых в систему компонентов. Для исследования возможностей совместной работы интегрируемых компонентов с помощью асинхронного пи-исчисления была построена математическая модель взаимодействия компонентов, поддерживающих описанные типы связи. В результате моделирования выявлены варианты с блокировкой процессов [8]. В завершение работы на математической модели системы было

показано решение выявленных блокировок. На основе проведенного исследования можно сделать вывод, что взаимодействие компонентов, ориентированных на разные типы связи, в системах рассматриваемого класса, удовлетворяющих поставленным требованиям, при условии предложенных изменений возможно, а следовательно, возможно решение задачи автоматизации создания промежуточного программного обеспечения, направленного на управление взаимодействием в таких системах.

Литература

1. **Гофф М. К.** Сетевые распределенные вычисления. Достижения и проблемы. М.: Кудиц-Образ, 2005. — 320 с.
2. **Ладыженский Г.** Интеграция приложений такая, как она есть // Открытые Системы. 2006. № 9. <http://www.osp.ru/os/2006/09/3776484/>.
3. **Хоп Г., Вульф Б.** Шаблоны интеграции корпоративных приложений: Проектирование, создание и развертывание решений, основанных на обмене сообщениями. — М.: Вильямс, 2007. — 672 с.
4. **Таненбаум Э. С., Ван Стеен М.** Распределенные системы. Принципы и парадигмы. — СПб.: Питер, 2003. — 877 с.
5. **Milner R.** Communicating and mobile systems: the pi-calculus. — Cambridge: Cambridge University Press, 1999. — 161 p.
6. **Boudol G.** Asynchrony and the pi-calculus: Research Report 1702 / INRIA. — Sophia-Antipolis, 1992. — 11 p.
7. **Honda K., Tokoro M.** An object calculus for asynchronous communication // Proc. of ECOOP'91. Geneva, 1991. P. 133–147.
8. **Брейман А. Д., Зерний А. Ю., Казьмин Б. В.** Использование асинхронного пи-исчисления для исследования моделей связи при решении задач организации распределенных систем // Вестник МГУПИ. М.: МГУПИ, 2009. С. 57–63.
9. **Amadio R. M., Castellani I., Sangiorgi D.** On Bisimulations for the Asynchronous pi-calculus // Theoretical Computer Science. 1998. Vol. 195. N 2. P. 291–324.

УДК 377.44:004

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТЕНТА ИНСТРУКТИВНОГО ТИПА

Л. Г. Алсынбаева,

канд. физ.-мат. наук, доцент

Югорский НИИ информационных технологий

Рассматривается один из подходов к автоматизированной генерации тестовых заданий для контента инструктивного типа в системах электронного корпоративного обучения. Задача автоматизации процесса конструирования тестовых заданий базируется на специфических особенностях текстов инструктивного характера и использовании принципов актуального членения предложения при их обработке.

Ключевые слова — электронное обучение, дистанционное обучение, тестовые задания.

Введение

Современный этап развития систем корпоративного обучения в России характеризуется интенсивным внедрением технологий электронного и дистанционного образования, базирующихся на использовании систем электронного обучения (Learning Management System — LMS).

Эти системы позволяют в полной мере осуществлять моделирование учебного процесса, куда входят составление учебных групп, поддержка расписания занятий, формирование различных ведомостей и отчетов; контроль количества пройденного материала и качества его усвоения; работа в асинхронном режиме с возможностью индивидуального подхода к обучающимся; коллективная работа слушателей и преподавателя; поддержка электронных коммуникаций между участниками учебного процесса; разделение участников учебного процесса по функциональным ролям.

E-learning становится новой образовательной парадигмой, но вместе с тем главным фактором успешности проектов в области электронного обучения по-прежнему остается электронный образовательный контент.

Инструктивный образовательный контент и цели обучения

При подготовке электронного образовательного контента выделяют теоретическую часть кур-

са, материал которой может быть представлен в виде **Web-страниц, текстовых документов, презентаций, выполненных в MS Power Point, и практическую часть курса, включающую задания и тесты.** Теоретическая часть курса, как правило, не имеет интерактивных возможностей взаимодействия с обучаемым, а практическая часть курса обладает интерактивностью и является блоком знаний, обеспечивающим управляющие воздействия в системе электронного обучения. Система практических заданий, контрольных вопросов и тестов является основой (каркасом) для автоматического формирования индивидуальных траекторий прохождения электронного учебного курса. Для того чтобы построить корректную систему управления траекторией обучения, необходимо четко знать, какие учебные цели были поставлены и каким образом проверяется их достижение.

В сфере электронного обучения широко используются различные типы тестовых заданий. Вопрос об установлении соответствия между категориями учебных целей и типами тестовых заданий в настоящее время проработан недостаточно. Имеются отдельные рекомендации, например соответствие типов вопросов учебным целям на основе таксономии Бенжамина Блума [1]. Как известно, Б. Блум выделял следующие категории учебных целей: знание, понимание, применение, анализ, синтез, оценка. Проектируя содержание электронного учебного курса, мы должны исходить из того, что цели, поставленные в данном

курсе, диагностируемы и что практическая часть курса дает возможность сделать выводы об их достижении. Поэтому сначала требуется точно установить категории учебных целей, а затем выбрать типы тестовых заданий, которые будут использоваться в системе электронного тестирования.

В данной статье в качестве образовательного контента будем рассматривать инструкции, освоение которых является актуальной и массовой задачей в системах корпоративного обучения, а категории учебных целей сузим до первых двух — «знание» и «понимание». Обсудим далее особенности построения тестовых заданий для проверки достижения этих целей.

При проверке знаний сотрудников в области инструкций содержание обучения составляют учебные материалы инструктивного характера, подразумевающие то, что их текст имеет строго определенную интерпретацию, не предполагающую его переработку или творческое воссоздание смысла. Следовательно, в данной предметной области категория учебных целей «знание» соответствует повторению полученного текста.

Таким образом, для адекватной проверки усвоения учебного материала, которым в данном случае является инструкция, целесообразно использовать тестовые задания с выбором правильного ответа из нескольких вариантов предложенных ответов. (Такой тип тестовых заданий или вопросов в среде LMS, как правило, называют «множественный выбор».) Так как главная учебная цель — знание инструкции, определяющей перечень правил, регламентирующих работу с оборудованием и поведение в описываемых ситуациях, то тестовые задания должны в точности отражать отдельные пункты инструкций.

Заметим, что существует диаметрально противоположная рекомендация: вопросы не должны повторять формулировок учебника [2]. Однако при освоении контента инструктивного характера имеет место следующая специфика: при формулировании тестового задания специалист, занимающийся их подготовкой, не должен допускать творческой обработки текста инструкции. В каждом тестовом задании должен присутствовать точный текст отдельного пункта инструкции, разделенный на две части — «вопросную» и «ответную». «Вопросная» часть пункта инструкции используется в формулировке вопроса, а «ответная» — как один из вариантов ответа в списке вариантов, предложенных для выбора. Каждое тестовое задание должно соответствовать одному пункту инструкции.

Использование предложенного метода формирования тестовых заданий создает условия для эффективного тренинга за счет многократного прочтения и запоминания пунктов инструкции.

Рассмотрим формирование содержания тестового задания на примере пункта типовой инструкции по охране труда для машинистов насосных установок предприятий нефтепродуктообеспечения [3].

«1.3. Машинист насосных установок может быть подвержен воздействию отравляющих веществ, повышенной температуры, электрического тока, вибрации».

При составлении тестового задания для данного пункта инструкции, как уже было отмечено, используем тип вопроса «множественный выбор». Существуют два типа вопросов множественного выбора — с одним или несколькими верными ответами. В данном случае используем тип вопроса с одним правильным ответом.

Для формирования тестового задания разделим приведенный выше текст на «вопросную» и «ответную» части. В качестве «вопросной» части используем «машинист насосных установок может быть подвержен», в качестве ответной — «воздействию отравляющих веществ, повышенной температуры, электрического тока, вибрации».

Таким образом, добавив еще несколько вариантов неправильных ответов, мы получим тестовое задание, отвечающее сформулированным выше критериям. Данное тестовое задание проверяет знание инструкции и в ходе тренировки помогает досконально освоить ее пункты, что и требуется для успешной работы сотрудников любой организации. Особенно это касается малых и средних предприятий, которые должны иметь возможность динамично перестраивать производственные процессы и управлять персоналом с учетом изменения нормативной базы, смены технологий и запросов потребительского рынка.

Подготовка электронного образовательного контента — трудоемкий процесс. (Недостаток качественного электронного образовательного контента до сих пор является «узким местом» при внедрении технологий электронного обучения.) Повышение производительности специалистов, занимающихся разработкой контента, важная и актуальная задача.

Автоматизированные технологии подготовки тестовых заданий для контента инструктивного характера

При решении задачи автоматизации подготовки тестовых заданий для текстов инструктивного типа была применена методика, основанная на темарематической структуре текста (инструкций) [4]. При этом под *темой* понимается старая, известная, освоенная информация, а под *ремой* — новая информация.

Таким образом, при подготовке тестового задания типа «множественный выбор» можно использовать деление предложения на тему и ремю. Выделение темы и ремы в каждом пункте инструкции дает возможность автоматизировать подготовку тестовых заданий (сократить объем ручной работы) не менее чем на 50 %. То есть, рассматривая конструирование тестового задания на основе пункта инструкции, выделяем следующие шаги:

- 1) формулирование вопроса — выделение «вопросной» части предложения (темы);
- 2) подготовка правильного варианта ответа — выделение «ответной» части предложения (ремы);
- 3), 4) подготовка двух вариантов неправильных ответов.

Первые два шага предлагается автоматизировать. Третий и четвертый шаги выполняются вручную. Однако и здесь могут быть внесены элементы автоматизации. С учетом того, что неправильные ответы должны быть правдоподобны, чтобы проверяемый не «вычислил» неправильные ответы по формулировкам, можно частично автоматизировать их подготовку, дублируя на место неправильных ответов правильные варианты с предложением составителю тестового задания внести изменения в их текст, сделав их тем самым неверными вариантами ответов.

Встает вопрос: как выделить в предложении, являющемся пунктом инструкции, тему и ремю?

Специалисты в области лингвистики всесторонне разрабатывают вопрос о взаиморасположении компонентов актуального членения в высказывании (темы и ремы), который был впервые сформулирован как чисто лингвистическое явление языковедами Пражской школы. Понятие «актуальное членение предложения» для описания функциональных компонентов повествовательного предложения — ремы, или сообщаемой части, и темы, отправной точки сообщения, было представлено в трудах Пражского лингвистического кружка в 1930-е гг. [5]. Дальнейшее развитие этого вопроса представляет собой в целом более детальную разработку их концепции.

Интересные исследования приводятся в статье М. А. Гончаровой «Классификация высказываний с экспрессивным порядком слов и отношения их в системе» [6]. Автор рассматривает различные виды предложений с экспрессивным порядком слов с точки зрения теории актуального членения высказывания и объясняет некоторые закономерности их употребления.

Проблематика актуального членения активно разрабатывается в настоящее время в рамках различных теорий лингвистической прагматики. Однако вопрос выделения в повествовательном предложении темы и ремы не имеет исчер-

пывающего решения. Более того, в некоторых случаях отнесение части предложения в тему или ремю является неоднозначным, зависит от контекста, или может быть несколько в равной степени приемлемых вариантов, выбор которых происходит субъективно.

Интересен также подход в выделении темы и ремы на основе интонации. Рема в русском, английском и многих других языках выражается интонацией определенного типа. Это нисходящий акцент, или падение тона. Данное наблюдение, однако, трудно использовать в вопросе автоматизации деления инструкции на тему и ремю.

Остановимся на том факте, что главным средством передачи разного актуального содержания является порядок слов. Последовательность «тема — рема» с точки зрения коммуникативной структуры предложения есть прямой (или объективный) порядок слов. Если рема помещается перед темой, имеем обратный (или субъективный) порядок слов [7].

Автором данной статьи предлагается учитывать специфику инструктивного текста при выделении темы и ремы.

1. Структура предложений инструктивного текста имеет, как правило, прямой порядок слов, т. е. тема помещается перед ремой.

2. В инструкции, подготовленной в соответствии с требованиями написания инструктивного текста, обязательно присутствует и тематический, и рематический компоненты.

3. Наличие двоеточия или частицы «не» в тексте предложения говорит о возможной границе между темой и ремой.

4. В инструктивном тексте (положений, правил, инструкций), как правило, используются слова «должен», «следует», «необходимо», «запрещается», «не допускается» и т. д. (Или, говоря на языке лингвистических терминов, используется модальный оператор необходимости, указывающий на обязательность действия.) Можно составить словарь таких слов, назовем их «ключевыми» словами, наличие которых позволяет выделить тему и ремю в соответственно вопросную и ответную части предложения, являющегося пунктом инструкции.

5. Заметим, что «ключевые» слова, обозначающие обязательность действия, в инструкциях часто применяются вместе со смысловыми глаголами, образуя составные сказуемые: «должны применяться», «должны быть оборудованы», «не должны превышать» и т. д. Таким образом, возникает вопрос: как делить составное сказуемое между темой и ремой? Анализ текстов инструкций показал, что целесообразно оставлять в теме составное сказуемое полностью, если в реме не встречается перечисление глаголов, обозначаю-

щих ряд действий, на которые распространяется вспомогательный глагол.

Рассмотрим два примера.

1. «Операторы АЗС *должны быть обеспечены* спецодеждой, спецобувью и средствами индивидуальной защиты».

2. «В зимнее время пешеходные дорожки и проезжая часть АЗС *должны* очищаться от снега и льда и посыпаться песком».

В первом случае при делении на тему и рему получаем:

тема: «Операторы АЗС *должны быть обеспечены*»;

рема: «спецодеждой, спецобувью и средствами индивидуальной защиты».

Во втором случае:

тема: «В зимнее время пешеходные дорожки и проезжая часть АЗС *должны*»;

рема: «очищаться от снега и льда и посыпаться песком».

Как видно, в первом примере целесообразно все составное сказуемое (которое мы выделяем на основе ключевого слова) оставить в теме. Во втором случае составное сказуемое делится на две части, которые распределяются между темой и ремой.

Возвращаясь к категориям учебных целей, стоит отметить, что следующий уровень учебных целей после «знание» — это «понимание» смысла инструкции. Как проверить понимание смысла инструкции?

Например, зная инструкции безопасного поведения на производстве, сотрудник может не понимать важности их соблюдения и допускать их нарушение. А для понимания требуется выяснить смысл модальных операторов необходимости. Например, «я не должен (я должен)» выясняется с помощью вопросов: «Что бы случилось, если бы вы сделали (не сделали)..?»

Поэтому построение тестовых заданий на понимание смысла инструкции может происходить следующим образом. Для словаря ключевых слов, обозначающих обязательность действия, составим словарь слов (словосочетаний), отрицающих обязательность действия, т. е. указывающих на возможность действия (могу, не могу и т. д.), — используем модальные операторы возможности.

Таким образом, для каждого пункта инструкции составим вопрос: «Что может случиться, если не соблюдается инструкция...», — а далее следует текст пункта инструкции и вопросительный знак. Например, рассмотрим пункт инструкции «Смазочные материалы должны храниться в специальной металлической таре с плотно закрытыми крышками». Для проверки понимания этого пункта зададим вопрос: «Что может случиться, если не соблюдается инструкция: “Смазочные материалы должны храниться в специ-

альной металлической таре с плотно закрытыми крышками?»»

Программная реализация автоматизированной генерации тестовых заданий

Входными данными для программы автоматизированной генерации тестовых заданий для проверки знания инструкций являются файлы инструкций, словарь ключевых слов и словарь окончаний глаголов, входящих в набор ключевых слов.

Выходными данными программы являются тестовые задания для вопросов типа «множественный выбор» в форматах Moodle XML (для загрузки в LMS Moodle) и в формате .doc (если потребуется проводить бланочное тестирование).

В настоящее время программа реализована в виде Windows-приложения «Генератор тестовых заданий» на основе технологии Microsoft .NET Framework 3.5. Данное приложение реализует следующие функции:

- 1) ввод информации в приложение в виде инструкций и словарей из внешних источников;
- 2) первичную обработку текста в целях разбиения его на отдельные логические «объекты-вопросы», содержащие тему и рему одного вопроса;
- 3) разбиение «объектов-вопросов» на «вопрос задания и «правильный ответ» задания;
- 4) генерацию базы данных (БД) тестовых заданий на основе этих данных;
- 5) ручную постобработку тестовых заданий из БД (при необходимости);
- 6) управление БД;
- 7) представление данных из БД в форматах Moodle XML и .doc.

Разработка приложения проводится при участии студентов Югорского государственного университета. В настоящее время создана версия 1.0 программы «Генератор тестовых заданий», которая проходит апробацию в Центре информационных технологий тестирования Югорского НИИ информационных технологий.

Перспективы развития системы автоматизированной генерации тестовых заданий для контента инструктивного характера

В процессе данной работы были изучены «Методические рекомендации по разработке государственных нормативных требований охраны труда», справочные материалы по разработке рабочих инструкций, проведен анализ текстов инструкций для различных видов производственной деятельности.

Необходимо заметить, что в ряде случаев тексты инструкций недостаточно корректны. Пре-

жде чем перейти к анализу текста инструкции, обратимся к экономическому словарю, чтобы уточнить данный термин.

«Инструкция (от лат. *instructio* — наставление) — совокупность правил осуществления определенных видов деятельности, проведения работ, служебного поведения, изложенных в специальных нормативных документах, также именуемых инструкциями. Инструкции призваны, с одной стороны, конкретизировать, разъяснять, дополнять изданные в стране законодательные и нормативные акты, постановления и, с другой стороны, инструктировать исполнителей о том, как они должны действовать в тех или иных ситуациях, в том числе “нештатных” аварийных» [8].

Обратим внимание на тот факт, что инструкция — это совокупность правил, т. е. предложений, выражающих при определенных условиях разрешение или требование совершать или не совершать какое-либо действие. Таким образом, в инструкции целесообразно выделять каждое правило в отдельный пункт.

Однако при анализе текстов инструкций часто обнаруживается объединение нескольких правил в один пункт. Например, рассмотрим «Типовую инструкцию по охране труда для лаборантов химического анализа на предприятиях нефтепродуктообеспечения» [9]. В п. 3.21 присутствуют несколько правил, которые желательно разделить и при проверке знания инструкции сформулировать для них отдельные вопросы.

«3.21 Измельчение едких и ядовитых веществ должно производиться в закрытых ступках под тягой. Лаборант, производящий эту операцию, должен быть в защитных очках и резиновых перчатках. Все ядовитые вещества должны быть на строгом учете. Выдача их без разрешения руководителя лаборатории не допускается».

В данном пункте инструкции сформулированы четыре правила, каждое из которых лаборант должен знать и строго ему следовать.

Далее заметим, что инструкция должна быть адресована исполнителю. Причем исполнитель должен получить корректную инструкцию, не допускающую различных толкований.

Рассмотрим п. 3.1 той же инструкции: «Помещения лаборатории должны содержаться в чистоте и порядке. Запрещается загромождать коридоры и входы (выходы) какими-либо предметами, материалами, оборудованием».

В данном пункте инструкции не указано, кто именно должен содержать помещения лаборатории в чистоте и порядке. Сомнительно также, что эта инструкция (указание) относится к лаборанту химического анализа. Но если предположить, что это указание дано лаборанту, то предложение должно быть построено с указанием субъекта, которому адресована инструкция, иначе получаем не инструктивный текст, а текст описательного характера, который не побуждает к правильным действиям участников производственного процесса.

В качестве решения данных проблем предлагается развитие изложенного в статье подхода, когда для генератора тестов готовится база в виде компонентов: *тема, связка (ключевое слово), рема*. Эта же база может быть источником для генерации самих тестов инструкций. Таким образом, методист готовит исходную инструкцию или производит ее модификацию, редактируя БД.

В заключение заметим, что процесс автоматизации подготовки тестов на основе текстов инструкций является начальным шагом. В дальнейшем контент должен представлять ресурс, который может генерировать как текст инструкции, так и тестовые задания. Причем данный подход позволяет на этапе предобработки откорректировать исходные тексты инструкций в соответствии с требованиями к структуре инструктивного текста, а после создания базы тестовых заданий получить возможность использовать ее для автоматизированной генерации инструкций в целях их использования и обновления.

Литература

1. **Корольков А.** Что мы проверяем, когда тестируем обучаемых. http://websoft-elearning.blogspot.com/2007/03/blog-post_12.html — технологии e-learning.
2. **Сайт** кадрового центра «Ваша команда». <http://www.vashakomanda.ru>
3. **Сайт** проекта «Охрана труда в предпринимательстве». <http://www.tehbez.ru>
4. **Ягунова Е. В.** Тема и рема, данное и новое при восприятии текста // Диалог: Междунар. конф. по компьютерной лингвистике. <http://www.dialog-21.ru/dialog2007/materials/html/92.htm>

5. **Кругосвет:** Энциклопедия. http://www.krugosvet.ru/enc/gumanitarnye_nauki/lingvistika
6. **Гончарова М. А.** Классификация высказываний с экспрессивным порядком слов и отношения их в системе // Вестник Самарского гос. ун-та. <http://vestnik.ssu.samara.ru>
7. <http://www.filologdirect.narod.ru>
8. **Современный экономический словарь.** <http://slovari.yandex.ru/dict/economic>
9. **Сайт** Информационной системы Госстроя России по нормативно-технической документации для строительства. <http://www.skonline.ru>

УДК 629.7.05

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ПОСАДКИ МОРСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В. А. Небылов,¹

аспирант, м. н. с.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Предложен достаточно сложный и адекватный практическим требованиям критерий выбора оптимальной траектории посадки в зависимости от текущих характеристик морского волнения. Разработан новый алгоритм определения генерального направления распространения морских волн по цифровым фотоизображениям морской поверхности.

Ключевые слова — морской летательный аппарат, морское волнение, посадка, критерий оптимизации.

Введение

Ключевой проблемой для морских летательных аппаратов (ЛА) является взлет и посадка при интенсивном морском волнении. В идеале транспортное средство должно быть всепогодным, однако и экранопланы, и гидросамолеты не могут эксплуатироваться при штормовой погоде, когда ветровое морское волнение имеет большую балльность. Чем больше размеры, прочность и энерговооруженность ЛА, тем выше граница разрешенных режимов полета (балльности морского волнения) для взлета и посадки в штормовом море. Однако слишком большие размеры аппарата не только увеличивают его стоимость, но часто не соответствуют имеющимся грузопотокам на большинстве реальных грузопассажирских линий. Поэтому очень важно максимизировать возможность взлета и посадки малых и средних аппаратов в штормовом море. Эффективным способом решения этой проблемы является оптимизация направления захода на посадку по отношению к генеральному направлению распространения морских волн. При этом генеральное направление может определяться автоматически путем обработки показаний бортовых датчиков. В этом случае реализация оптимального режима захода на посадку и сама посадка требуют использования результатов численного анализа характеристик волновых возмущений.

¹ Научный руководитель — доктор техн. наук, профессор А. П. Шенета.

Критерий оптимизации посадки морского ЛА

Посадка морского ЛА на взволнованную морскую поверхность отличается от приземления обычного самолета на конкретную взлетно-посадочную полосу. Пилот или автоматическая система управления может выбрать любое направление посадки, поскольку область для возможной посадки не ограничена полосой и может принадлежать любому подходящему месту в открытом море недалеко от места назначения. Естественно, направление вектора ветра должно быть принято во внимание при выборе направления захода на посадку. Посадка против ветра позволяет снизить посадочную скорость относительно поверхности. При ветровых морских волнах главное направление совпадает с направлением ветра, т. е. аэродинамически нужно приземлиться по направлению, обратному общему направлению распространения морских волн. Но при сильном ветре, когда волны существенны, посадка против ветра дает значительные волновые нагрузки, поскольку ЛА сталкивается с гребнями морских волн, которым соответствуют максимальные отклонения водной поверхностной. Поэтому в соответствии с гидродинамикой это направление исключительно невыгодно из-за частоты встреч с морскими волнами и максимальным изгибом волн, и вероятность крушения транспортного средства из-за чрезмерной нагрузки является большой. Гидродинамически лучше производить посадку перпендикулярно генеральному направлению распространения морских волн. Посадка перпендикулярно ветру не может

обеспечить минимальную скорость посадки относительно поверхности, но уклон морских волн в этом направлении может быть умеренным, и гидродинамическое торможение будет не столь тяжелым. Именно поэтому оптимизация направления посадки — очень важная задача, и контроль движения при посадке должен быть выполнен на основании текущей информации относительно особенностей морской поверхности. Профиль и составные характеристики морских волн могут быть рассчитаны вместе с параметрами полета морского ЛА [1].

Посадка морского ЛА в условиях интенсивного морского волнения должна соответствовать требованию минимизации механических нагрузок при гидродинамическом торможении. Ключевым фактором является автоматизация выбора направления захода на посадку по отношению к генеральному направлению распространения морских волн. После рассмотрения нескольких вариантов формального критерия автором был выбран достаточно простой критерий «мягкости» посадки в виде среднеквадратического значения вертикальной скорости погружения днища ЛА в воду $\sigma_V = V\sigma_\alpha$, где V — посадочная путевая скорость; σ_α — среднеквадратическое значение уклона волновой поверхности вдоль траектории посадки.

При выводе расчетного выражения для критерия σ_V необходима достаточно адекватная математическая модель полностью развитого трехмерного ветрового морского волнения, поскольку именно этот общий случай морского волнения представляет наибольший интерес и позволяет сделать наиболее широкие обобщения. Были использованы формулы для энергетического спектра морского волнения по Нейману и по Пирсону—Мошковицу и формула для среднеквадратического значения уклона волновой поверхности вдоль траектории посадки [2–6].

Результирующая расчетная формула имеет вид

$$\sigma_V = (V_l - v \cos \psi) \times \sqrt{\int_0^\infty \left(\int_0^{\pi/2} (\cos^2 \psi \cos^4 \chi P(\chi, k) d\chi + \sin^2 \psi \cos^2 \chi \sin^2 \chi P(\chi, k) d\chi) dk \right)}$$

где V_l — воздушная скорость; v — скорость ветра; ψ — угол по отношению к направлению ветра; k — пространственная частота;

$$P(\chi, k) = \frac{1,03 \cdot 10^{-2}}{k} \exp \left[- \frac{0,112 \cos^2 \chi}{\left(k(3,95_{\text{м.с}^{-5/2}})(v/g)^{5/2} \right)^2} \right]$$

и

$$P(\chi, k) = \frac{1,03 \cdot 10^{-2}}{k} \exp \left[- \frac{0,112 \cos^2 \chi}{\left(k(0,391)(v^2/g) \right)^2} \right]$$

— для спектров Неймана и Пирсона—Мошковица соответственно.

Полученное выражение позволяет исследовать зависимость показателя «мягкости» посадки от многих факторов, прежде всего — от направления захода на посадку по отношению к направлению ветра, совпадающему с генеральным направлением распространения морских волн. При умеренном волнении, соответствующем скорости ветра 2–10 м/с, наиболее благоприятная траектория посадки при $\psi = 90^\circ$. При более развитом ветровом волнении, соответствующем скорости ветра 10–14 м/с, все направления в интервале $0-90^\circ$ пригодны для совершения посадки, которая происходит при незначительных механических нагрузках. В штормовом море при скорости ветра 14 м/с и выше ситуация резко меняется, и наиболее благоприятная траектория посадки будет против ветра ($\psi = 0$). Разница в нагрузках при благоприятном и неблагоприятном направлениях посадки может превышать один порядок. Нагрузки при посадке снижаются примерно в два раза в случае выбора направления $\psi = 0$ или 30° по сравнению со случаем 90° . При любой скорости ветра самое неблагоприятное направление 180° . Любое направление между 90 и 180° считается нежелательным для избегания больших механических нагрузок, направленных на корпус ЛА. Интересно, что направление $\psi = 60^\circ$ примерно одинаково для любых скоростей ветра. Разница в нагрузках при благоприятном и неблагоприятном направлениях посадки может превышать один порядок.

Цифровая обработка фотоизображений водной поверхности

Для реализации рекомендаций в отношении направления посадки морского ЛА желательно иметь на борту комплекс приборных средств для определения интенсивности морского волнения (высоты морских волн) и генерального направления распространения морских волн. В последнее время в связи с быстрым совершенствованием цифровых фотокамер появилась возможность использовать наиболее простой способ определения характеристик морской поверхности, заключающийся в обработке фотоизображений водной поверхности. Конечно, в условиях штилевого моря информативность даже высококачественного изображения водной поверхности невелика, но при этом проблема оптимизации захода на посадку и не стоит, а возникает лишь при существенном

морском волнении, когда структуру морских волн легко проанализировать по фотографиям. Необходимо также учитывать другие сложности, которые могут возникнуть при фотографировании водной поверхности, такие как солнечные блики, затуманенность, малая освещенность при ночной съемке и т. п.

При рассмотрении волновой поверхности как трехмерного случайного поля, анизотропного по направлению, генеральное направление может быть определено как такое, вдоль которого интервал пространственной корреляции между возвышениями волновой поверхности минимален. Соответственно, в перпендикулярном направлении интервал корреляции должен быть максимален.

Вместо определения интервала корреляции фактически можно подсчитывать число переходов n_0 черное—белое вдоль разных направлений при анализе черно-белого изображения. Это число должно быть пропорционально среднеквадратической частоте пространственного спектра волновой поверхности $k_{\text{ск}}$ и, следовательно, обратно пропорционально интервалу пространственной корреляции. Для нормального случайного поля, каковым являются возвышения волновой поверхности, величина n_0 при рассмотрении особенностей изображения волновой поверхности вдоль определенного направления выражается формулой

$$n_0 = \frac{k_{\text{ск}}}{\pi} \exp\left(-\frac{C_0^2}{2D_\xi}\right),$$

где D_ξ — дисперсия волновой ординаты, а уровень C_0 зависит от адаптируемой контрастности изображения.

В общем виде алгоритм определения генерального направления распространения морских волн может быть реализован в виде следующей последовательности операций.

1. RGB-изображение преобразуется в серое изображение с 256 уровнями яркости. Значение

серого находится как среднее арифметическое по трем цветовым каналам RGB, при этом сохраняются общая яркость и контрастность изображения, но теряются данные о цвете.

2. Устанавливается некий порог яркости и осуществляется переход к черно-белому изображению. Возможны несколько вариантов выбора этого порога. К примеру, пороговое значение может быть определено как среднее арифметическое значений яркости всех точек изображения. В другом варианте находится минимум и максимум яркости на конкретной фотографии и их средняя величина признается пороговой. Фактический интервал яркости полезно растянуть до максимально возможного интервала в 256 градаций путем масштабирования с плавающим адаптивным масштабным коэффициентом. При этом повышается качество черно-белого изображения, что важно для последующей обработки [7].

3. Подсчитывается число переходов черное-белое вдоль выбранного направления (по умолчанию начальное направление принимается за 0°).

4. Изображение пошагово (шаг выбирается в зависимости от необходимой точности и быстроты действия бортового компьютера, например в 1°) поворачивается для определения направления с максимальным числом черно-белых переходов на отрезке выбранной длины.

Определенное направление признается генеральным.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана методика оптимизации посадочного режима морского ЛА в целях гарантирования безаварийной посадки в условиях штормового моря. Реализация разработанной методики позволяет повысить характеристики всепогодности морских ЛА.

Литература

1. Волков Г. Основы гидроавиации. — М.: Военное издательство НКО СССР, 1940. — 248 с.
2. Nebylov A. V., Wilson P. Ekranoplane — Controlled Flight close to Surface. — Southampton, UK: WIT-Press, 2002. — 220 p.
3. Ambrosovsky V. M., Nebylov A. V. Flight Parameters Monitoring System for Small WIG-Craft: III International Conf. on Ground-Effect Machines / The RSME, Russian Branch. Saint-Petersburg, 2000. P. 15–25.
4. Nebylov A. V. Structural Optimization of Motion Control System Close to the Rough Sea // 13th IFAC World Cong. San Francisco, 1996. Vol. Q. P. 375–380.
5. Небылов А. В. Измерение параметров полета вблизи морской поверхности. СПб. гос. академия аэрокосмического приборостроения, 1994. — 307 с.
6. Nebylov A. V., Nebylov V. A., Panferov A. I., Shepeta A. P. WIG-craft Marine landing control at rough sea // 17th IFAC Symp. on Automatic Control in Aerospace. Toulouse, 2007.
7. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2005. — 1072 с.



Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
Университет Помпеу Фабра (Барселона, Испания)
Технический университет Дрездена (Германия)
ООО «Центр Специальных Информационных Технологий» (Санкт-Петербург)

III МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЕМИНАР ПО СИСТЕМАМ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА «MACOM-2010»

Барселона, Испания, 13–14 сентября 2010 года

Тематика и цели семинара

Основы дисциплины, известной сейчас как «теория множественного доступа», были заложены Клодом Шенноном в 1961 году в его пионерской работе «Two-way Communication Channels» и позднее в 1970 году Норманном Абрамсоном в статье «The Aloha System — Another Alternative for Computer Communications», где была предложена концепция коллективного использования абонентами общего канала связи. В последние годы в телекоммуникационной индустрии активно развивается направление широкополосной беспроводной связи (например, беспроводные локальные сети IEEE 802.11 Wi-Fi, технология широкополосных городских сетей IEEE 802.16 WiMAX и т. д.). Ожидается, что сети нового поколения позволят предоставлять конечному пользователю широкий спектр мультимедийных услуг по беспроводному каналу. В этой связи важнейшей задачей становится разработка эффективных методов доступа большого числа (нескольких сотен) мобильных абонентов к общему каналу связи.

Семинар MACOM проводится в третий раз в целях обсуждения как теории множественного доступа, так и вопросов стандартизации протоколов современных сетей передачи данных в части физического и канального уровней. В семинаре примут участие специалисты телекоммуникационных компаний и ведущие ученые, которые представят свои последние результаты в об-

ласти множественного доступа и сопутствующих областях.

Направления работы

Теория множественного доступа.

Технологии физического уровня (PHY), такие как CDMA, OFDMA и т. д.

Протоколы управления доступом к среде передачи (MAC), такие как 802.11, 802.16 и т. д.

Вопросы совместной оптимизации протоколов физического и канального уровней.

Теория очередей и систем поллинга.

Издание трудов

Все принятые работы публикуются в сборнике трудов Lecture Notes in Computer Science (SPRINGER).

Контрольные сроки

Заявки и тексты принимаются до 15 апреля 2010 года.

Все работы рецензируются Международным техническим комитетом.

Дополнительная информация и справки

Подробную информацию о мероприятии можно получить на web-странице MACOM-2010:

<http://www.csit-spb.ru/macom2010.html>

или у председателя организационного комитета Алексея Викторовича Винеля (СПИИРАН):

эл. адрес: vinel@ieee.org.

АЛСЫНБАЕВА
Людмила
Георгиевна



Руководитель центра информационных технологий тестирования Югорского НИИ информационных технологий, доцент кафедры компьютерного моделирования и информационных технологий Югорского государственного университета. В 1976 году окончила Новосибирский государственный университет. В 1998 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором более 70 научных публикаций. Область научных интересов — технологии электронного образования, системы автоматизированного тестирования, системы электронного корпоративного обучения и развития персонала. Эл. почта: alg@uriit.ru

БЕЗМЕН
Глеб
Владимирович



Ведущий инженер ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор». В 2000 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики. Является автором 10 научных публикаций. Область научных интересов — синтез и диагностирование систем реального времени. Эл. почта: office@eprib.ru

БРЕЙМАН
Александр
Давидович



Доцент кафедры персональных компьютеров и сети Московского государственного университета приборостроения и информатики. В 1994 году окончил Московский государственный университет приборостроения и информатики по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». В 1998 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 60 научных публикаций. Область научных интересов — распределенные системы, информационные системы, системы управления базами данных. Эл. почта: adbadb@gmail.com

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

БУРАКОВ
Вадим
Витальевич



Доцент кафедры компьютерной математики и программирования Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1996 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 15 научных публикаций. Область научных интересов — программная инженерия, обеспечение качества. Эл. почта: burakov@aanet.ru

ВОЛКОВ
Владимир
Юрьевич



Профессор кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. В 1972 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения. В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 200 научных и учебно-методических работ и 20 изобретений. Область научных интересов — цифровая обработка сигналов, прием сигналов в условиях априорной неопределенности, адаптивные, инвариантные и робастные алгоритмы различения и фильтрации, негауссовы модели случайных сигналов и полей. Эл. почта: vladimi-volkov@yandex.ru

ДМИТРИЕВ
Валерий
Федорович



Профессор кафедры электроники и оптической связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, начальник отдела ОАО «РАДАР ммс». В 1981 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Промышленная электроника». В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — моделирование и проектирование акустоэлектронных устройств и функциональных модулей на их основе.
 Эл. почта: vf_dmitriev@rambler.ru

ЗАБУЗОВ
Сергей
Александрович



В 1966 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры». В 1975 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — акустоэлектроника, устройства на новых физических принципах и их применение в радиосистемах.

ЗЕРНИЙ
Андрей
Юрьевич



Аспирант кафедры персональных компьютеров и сетей Московского государственного университета приборостроения и информатики. В 2006 году окончил Московский государственный университет приборостроения и информатики по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». Является автором пяти научных публикаций. Область научных интересов — распределенные информационные системы.
 Эл. почта: andrey@zerni.com

КАВАЛЕРОВ
Борис
Владимирович



Доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского государственного технического университета. В 1991 году окончил электротехнический факультет Пермского политехнического института. В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — математическое моделирование электроэнергетических систем, автоматизация газотурбинных электростанций.
 Эл. почта: kbv@pstu.ru

КАГИРОВ
Ильдар
Амирович



Младший научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 2008 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет, защитил диссертацию на соискание степени магистра. Является автором 15 научных публикаций. Область научных интересов — методы автоматической обработки текста для лингвистического процессора в системе распознавания русской речи.
 Эл. почта: kagirov@iiias.spb.su

КАЗМИН
Борис
Викторович



Аспирант кафедры персональных компьютеров и сетей Московского государственного университета приборостроения и информатики. В 2006 году окончил Московский государственный университет приборостроения и информатики по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». Является автором пяти научных публикаций. Область научных интересов — распределенные информационные системы.
 Эл. почта: bk@kazmin.ru

КАРПОВ
Алексей
Анатольевич



Старший научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

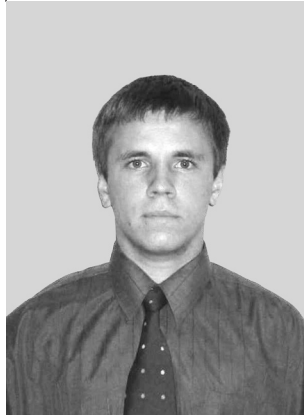
В 2002 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 70 научных публикаций.

Область научных интересов — автоматическое аудиовизуальное распознавание речи, много-модальные интерфейсы.

Эл. почта: karpov@mail.iias.spb.su

КОЙГЕРОВ
Алексей
Сергеевич



Аспирант кафедры электроники и оптической связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, ведущий инженер ООО «ЗИГ».

В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Радиотехника».

Область научных интересов — моделирование и проектирование акустоэлектронных устройств для радиосистем.

Эл. почта: jerr2051@mail.ru

КОЛЕСОВ
Николай
Викторович



Профессор, начальник сектора ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор».

В 1969 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина).

В 1992 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 140 научных публикаций, в том числе двух монографий.

Область научных интересов — вычислительные системы реального времени, диагностирование вычислительных и информационно-измерительных систем, системы искусственного интеллекта.

Эл. почта: office@eprib.ru

ЛЕБЕДЕВ
Илья
Сергеевич



Старший научный сотрудник Научно-исследовательского института точной механики преподаватель кафедры военной кибернетики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1998 году окончил Санкт-Петербургское высшее военное училище ПВО.

В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 40 научных публикаций.

Область научных интересов — информационные технологии, компьютерная лингвистика.

Эл. почта: isl_box@mail.ru

ЛУПАЛ
Алексей
Валентинович



Главный специалист ЗАО «Компания «ТрансТелеКом», соискатель в аспирантуре Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1996 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Вычислительные системы, комплексы и сети».

Является автором шести научных публикаций.

Область научных интересов — надежность компьютерных сетей, информационные и телекоммуникационные системы и информационные технологии.

Эл. почта: lupalav@mail.ru

МОЧАЛОВ
Владимир
Анатольевич



Аспирант кафедры автоматизации информационных технологий и сертификации в связи Московского технического университета связи и информатики.

В 2007 году окончил Московский технический университет связи и информатики по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем».

Является автором семи научных публикаций. Область научных интересов — сенсорные сети, отказоустойчивость, искусственный интеллект, системы поддержки принятия решений, человеко-машинное взаимодействие, распределенные вычислительные системы.

Эл. почта: mvaproduct@mail.ru

НЕБЫЛОВ
Владимир
Александрович



Аспирант, младший научный сотрудник Международного института передовых аэрокосмических технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем».

Является автором 12 научных публикаций.

Область научных интересов — системный анализ, управление и обработка информации, морские летательные аппараты, морское волнение.

Эл. почта: vladnebylov@rambler.ru

ОДИН
Константин
Анатольевич



Программист кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского государственного технического университета. В 2008 году окончил Пермский государственный технический университет по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Область научных интересов — математическое моделирование систем электроснабжения.

Эл. почта: oka54@mail.ru

РОНЖИН
Андрей
Леонидович



Доцент, заведующий лабораторией речевых и многомодальных интерфейсов Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1999 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

В 2003 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 80 научных публикаций.

Область научных интересов — моделирование естественного взаимодействия человека с компьютером, автоматическое распознавание речи, многомодальные интерфейсы.

Эл. почта: ronzhin@mail.iias.spb.su

СВЕШНИКОВ
Олег
Васильевич



Доцент кафедры радиоэлектронных систем управления Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д. Ф. Устинова.

В 1975 году окончил Ленинградский механический институт по специальности «Радиолокационные системы управления».

В 1982 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 120 научных публикаций.

Область научных интересов — разработка алгоритмов вторичной обработки информации для высокоточных систем автоматического управления, пеленгование протяженных объектов, выполненных по технологии «Stealth».

Эл. почта: ovsvesh@mail.ru

ТИХОНОВ
Эдуард
Прокофьевич



Доцент кафедры биомедицинской электроники и охраны среды Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», член-корреспондент Метрологической академии.

В 1963 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения.

В 1968 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 190 научных публикаций, в том числе более 60 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Область научных интересов — кибернетика, информатика, моделирование, информационно-измерительные системы, биомедицинская инженерия.

Эл. почта: edikleti@yandex.ru

ТУРНЕЦКИЙ
Леонид
Сергеевич



Начальник отдела проектирования перспективных радиоэлектронных систем ОАО «НПП «Радар ммс». Заслуженный изобретатель РФ.

В 1970 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения.

В 1984 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 460 научных работ, в том числе двух монографий и 100 изобретений.

Область научных интересов — комплексные радиоэлектронные информационно-управляющие системы навигационных комплексов летательных аппаратов, статистическая радиотехника и радиолокация.

Эл. почта: tournetsky@radar-mms.com.

**ШЕРЕМЕТОВ
Леонид
Борисович**



Старший научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1982 году окончил Ленинградский кораблестроительный институт по специальности «Приборостроение».

В 1990 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 250 научных публикаций.

Область научных интересов — многоагентные системы, гибридные интеллектуальные системы, поиск данных и архитектуры, ориентированные на семантические сервисы.

Эл. почта:
lsheremetov@mail.ru

**ШИГАПОВ
Артур
Азгарович**



Начальник отдела автоматизации ЗАО «Энергокомплект-Пермь», аспирант кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского государственного технического университета.

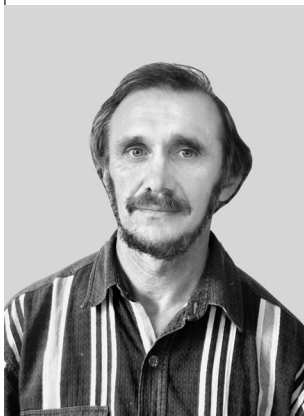
В 2004 году окончил электротехнический факультет Пермского государственного технического университета.

Является автором восьми научных публикаций.

Область научных интересов — разработка программно-моделирующих комплексов для автоматизации газотурбинных электростанций.

Эл. почта: art@energo.perm.ru

**ШМИДТ
Игорь
Альбертович**



Доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского государственного технического университета.

В 1980 году окончил физический факультет Пермского государственного университета.

В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 40 научных публикаций.

Область научных интересов — системное программирование, распределенные информационные системы, сервис-ориентированная архитектура.

Эл. почта:
shmidt@msa.pstu.ac.ru

УДК 681.314

Модифицированные алгоритмы и классификация аналого-цифровых преобразователей. Часть 3: Нейроподобные и другие варианты алгоритмов

Тихонов Э. П. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 2–9.

Предложено аналитическое описание различных модификаций алгоритмов аналого-цифровых преобразователей, включая мажоритарный и нейроподобный принцип обработки информации, на базе которых выполнен сравнительный анализ их свойств, доведенных до численных результатов, и разработана классификационная схема аналого-цифровых преобразователей.

Ключевые слова — аналого-цифровой преобразователь, функция активации, квант, помеха, погрешность, нейронный алгоритм, измерение.

Список лит.: 22 назв.

УДК 621.397:621.396.96

Пороговая обработка для сегментации и выделения протяженных объектов на цифровых изображениях

Волков В. Ю., Турнецкий Л. С. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 10–13.

Исследуется задача установки порога бинарного квантования для сегментации и выделения объектов на цифровых изображениях. Рассматривается структура цифровой обработки, включающая предварительную фильтрацию, пороговую обработку и логическую фильтрацию. Предложен новый метод динамической установки и регулировки порогового уровня, который основан на анализе изолированных фрагментов, выделенных на изображении в процессе сегментации. Предложенный метод позволяет оптимизировать решение задачи сегментации объектов на цифровых изображениях на фоне гауссова шума.

Ключевые слова — фильтрация, сегментация, выделение объектов, эрозия элементов, порог бинарного квантования.

Список лит.: 3 назв.

УДК 62-519

Децентрализованное управление адаптивными сетями поставок на основе теории коллективного интеллекта и агентной технологии. Часть 2: Многоагентная среда моделирования и оптимизации сетей поставок

Шереметов Л. Б. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 14–20.

Описана среда моделирования сети поставок как динамической, гибкой и самонастраивающейся системы автономных агентов. Экспериментальный комплекс выполнен на основе агентной платформы CAPNET. Приведены результаты экспериментов.

Ключевые слова — сети поставок, многоагентная система, теория коллективного интеллекта, стимулированное обучение.

Список лит.: 6 назв.

УДК 681.314

The modified algorithms and classification of analog-digital converters. Part 3: Algorithm similar to a neuron and other variants of algorithms of transformation

Tikhonov E. P. IUS, 2009. N 5. P. 2–9.

Various algorithms and block diagrams of analog-digital converters are presented, and their comparative analysis is performed. Numerical and graphic results of researches of the suggested algorithms are completed. A classification circuit of analog-digital converters is developed.

Keywords — the analog to digital converter; activation function; quantum; hindrance; inaccuracy; neural algorithm; measurement.

Refs: 22 titles.

УДК 621.397:621.396.96

Threshold processing for segmentation and extraction extensive objects on digital images

Volkov V. Yu., Turnetskiy L. S. IUS, 2009. N 5. P. 10–13.

The threshold setting problem is investigated for segmentation and extraction of extensive objects on digital images. Image processing structure is considered which includes pre-filtering, threshold processing and logical filtering. A new method for dynamic threshold setting and control is proposed which is based on the analysis of isolated fragments to be extracted in the making of segmentation. The proposed method allows to obtain optimal object segmentation in Gaussian noise.

Keywords — filtering, segmentation, objects extraction, erosion of elements, threshold for binary quantization.

Refs: 3 titles.

УДК 62-519

Decentralized control of open supply chains based on collective intelligence and agent technologies. Part 2: Multiagent system for modeling and optimization of supply networks

Sheremetov L. B. IUS, 2009. N 5. P. 14–20.

An approach to decentralized control of supply networks based on the collective intelligence theory and multi-agent systems is proposed. A test-bed is deployed on the CAPNET agent platform. The experimental results are discussed.

Keywords — supply network, multiagent system, collective intelligence theory, reinforcement learning

Refs: 6 titles.

УДК 681.324(031)

Вероятностный анализ состояний ideo3-моделей технологических процессов

Бритов Г. С., Лупал А. В. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 21–24.

Приводится один из подходов к исследованию технологических моделей бизнес-процессов, основанных на вероятностном анализе отказов связей между единицами работы и позволяющих рассчитать вероятности различных состояний технологического процесса и вычислить время исправной работы системы.

Ключевые слова — бизнес-процесс, вероятность, граф, марковский процесс, надежность, перекресток, рекуррентные уравнения, состояние, узкие места.

Список лит.: 4 назв.

УДК 621.311.1:681.51

Сопряжение программных сред в задачах моделирования и тестирования систем управления энергетическими газотурбинными установками

Шмидт И. А., Кавалеров Б. В., Один К. А., Шигапов А. А. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 25–31.

Приводится решение задачи сопряжения программных сред для программной реализации разработанной математической модели газотурбинной мини-электростанции. Математическая модель предназначена для тестирования систем управления энергетическими газотурбинными установками.

Ключевые слова — электроэнергетическая система, газотурбинная установка, автоматическое управление.

Список лит.: 8 назв.

УДК 004.93

Особенности дистанционной записи и обработки речи в автоматах самообслуживания

Ронжин А. Л., Карпов А. А., Кагиров И. А. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 32–38.

Рассматривается ряд проблем, возникающих при дистанционной записи речи в зашумленных условиях. Повысить точность выделения границ полезного речевого сигнала предлагается за счет применения спектрально-пространственного анализа многоканального звукового сигнала.

Ключевые слова — дистанционное распознавание речи, пассивная локализация, корреляция взаимного спектра, речевой пользовательский интерфейс.

Список лит.: 13 назв.

УДК 681.324(031)

Probability analysis of IDEF3 models states of technological processes

Britov G. S., Lupal A. V. IUS, 2009. N 5. P. 21–24.

We propose an approach to research the technological models of business processes based on the probabilistic analysis of refusals of connections between units of work and allowing to expect probabilities of the different technological process states and to calculate the time of the functioning of a system working properly.

Keywords — business process, probability, graph, Markov process, reliability, junction, recurrence equations, status, bottlenecks.

Refs: 4 titles.

УДК 621.311.1:681.51

Interface between simulation tools for problems of simulation and testing of control systems of power gas-turbine units

Shmidt I. A., Kavalero B. V., Odin K. A., Shigapov A. A. IUS, 2009. N 5. P. 25–31.

A solution of a problem of interface between simulation tools for mathematical simulation of the presented mathematical model of gas-turbine mini-power stations is offered. The mathematical model is intended for testing control systems of power gas-turbine units.

Keywords — power system, gas-turbine unit, automatic control.

Refs: 8 titles.

УДК 004.93

Peculiarities of distant recording and processing of speech in self-services machines

Ronzhin A. L., Karpov A. A., Kagirov I. A. IUS, 2009. N 5. P. 32–38.

Problems appeared at distant speech recording in noisy environments are considered. A spectral-spatial analysis of multichannel sound signal is proposed to improve the accuracy of selection of speech.

Keywords — distant speech recognition, passive localization, cross correlation spectrum, speech user interface.

Refs: 13 titles.

УДК 681.3

Построение шаблонов кода по текстам спецификаций

Лебедев И. С. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 39–42.

Приведен подход к созданию шаблонов кода на основе анализа естественно-языковых структур текстов спецификаций. Рассматривается алгоритм преобразования естественно-языковых конструкций.

Ключевые слова — структуры естественного языка, генерация кода, вычисление структур шаблонов кода.

Список лит.: 7 назв.

УДК 004.05

Управление качеством программных средств

Бураков В. В. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 43–47.

Описывается система управления качеством программ. Перечислены и кратко описаны формальные модели, образующие основу системы, обоснована их значимость на каждом этапе цикла управления качеством. Приведен алгоритм работы системы, обеспечивающий мониторинг показателей качества и улучшение этих показателей путем изменения структуры программы.

Ключевые слова — качество программ, управление качеством программ.

Список лит.: 4 назв.

УДК 621.38

Исследование корреляционного метода для решения задачи антиколлизии для систем радиочастотной идентификации на ПАВ

Койгеров А. С., Забузов С. А., Дмитриев В. Ф. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 48–55.

Рассматривается корреляционный метод решения задачи антиколлизии для радиомаркеров на поверхностных акустических волнах. Предлагается алгоритм поиска оптимальных кодовых последовательностей маркеров. Приводятся результаты анализа автокорреляционных и взаимно корреляционных функций модифицированных последовательностей максимальной вероятности. Определено максимально возможное число кодов для 16-значных последовательностей с заданными корреляционными свойствами.

Ключевые слова — радиочастотная идентификация, радиомаркеры на ПАВ, коллизия, корреляционный метод, согласованный фильтр, последовательности максимальной вероятности, автокорреляционная функция, взаимно корреляционная функция.

Список лит.: 7 назв.

УДК 681.3

Construction of code templates by texts of specifications

Lebedev I. S. IUS, 2009. N 5. P. 39–42.

The creation of code templates is based on the analysis of natural language structures of text specification. An algorithm of transformation of natural language construction is considered.

Keywords — natural language structures, code generation, calculation of structures of templates.

Refs: 7 titles.

УДК 004.05

Software quality control

Burakov V. V. IUS, 2009. N 5. P. 43–47.

In this paper, an approach to software quality modeling is described. The paper contains an overview of mathematical models, which forms a basis of the control system. The paper investigates an algorithm of software quality control, whose tasks includes software quality evaluating and improving by refactoring.

Keywords — software quality, software quality assurance.

Refs: 4 titles.

УДК 621.38

Investigation of correlation approach to solution anti-collision problem for RFID systems on SAW

Koigerov A. S., Zabuzov S. A., Dmitriev V. F. IUS, 2009. N 5. P. 48–55.

In this paper, a correlation method of the solution of a problem of anti-collision for tags on surface acoustic waves is considered. An algorithm of search of optimum code sequences for tags is offered. The results of the analysis of autocorrelation and cross correlation functions of the modified sequences of the maximum probability are presented. The maximum possible number of codes for 16-bit sequences with the set correlation properties is defined.

Keywords — radio frequency identification, SAW-tag, collision, correlation method, matched filter, sequences of maximum probability, autocorrelation function, cross correlation function

Refs: 7 titles.

УДК 621.391

Компенсация влияния переотражений от подстилающей поверхности при автосопровождении морских объектов под крутыми углами визирования

Свешников О. В. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 56–60.

Рассматриваются особенности пеленгации кораблей и других объектов, в том числе выполненных по глубокой технологии «Stealth», пеленгуемых под большими углами места. За счет переотражений от морской поверхности отраженный радиолокационный сигнал объекта подвергается дополнительной амплитудно-фазовой модуляции, значительно увеличивая дисперсию флуктуаций эхо-сигнала. Предложен алгоритм компенсации влияния переотражения для улучшения точности автосопровождения надводного объекта по угловым координатам и дистанции.

Ключевые слова — глубокая технология «Stealth», угловой шум, низкочастотная модуляция, локальный отражатель, фантомные рассеиватели, автокаталитическая реакция.

Список лит.: 8 назв.

УДК 519.682

Алгоритмы оценки надежности структуры сенсорной сети

Мочалов В. А. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 61–66.

Предлагаются алгоритмы оценки надежности структуры сенсорной сети, которые можно использовать в системах поддержки проектирования отказоустойчивых сенсорных сетей большой размерности и высокой степени связности. Рассматриваются алгоритмы вычисления нижней оценки вероятности связности двух узлов сенсорной сети на основе сжатия графа, описывающего сеть, а также оценка по количеству независимых путей.

Ключевые слова — сенсорная сеть, отказоустойчивость, оценка структуры сети, надежность, граф.

Список лит.: 6 назв.

УДК 621.396

Функциональное диагностирование линейных динамических систем с использованием нечеткого анализа

Безмен Г. В., Колесов Н. В. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 67–73.

Предлагается метод диагностирования линейных динамических систем, основанный на предположении об отсутствии четкой границы между работоспособным и неработоспособным техническими состояниями как системы, так и ее элементов и использующий банк взаимодействующих наблюдателей.

Ключевые слова — функциональное диагностирование, динамическая система, банк наблюдателей.

Список лит.: 13 назв.

УДК 621.391

Objects automatic tracking accuracy increase made according to the deep technology «Stealth»

Sveshnikov O. V. IUS, 2009. N 5. P. 56–60.

The objects of this article are direction — finding features of ships and other objects including those, made according to «Stealth» deep technology, which are taken bearing under the large tilt angles. Due to re-reflections from the sea surface the object's reflected radar signal is additionally amplitude- phase modulated, which significantly increases the bobbing dispersion.

Re-reflections compensation algorithm is suggested to improve accuracy of surface object automatic tracking by distance and angular coordinates.

Keywords — «Stealth» deep technology, angle noise, low-frequency modulation, local reflector, phantom scatters, автокаталитическая реакция.

Refs: 8 titles.

УДК 519.682

Algorithms for assessing the reliability of sensor network

Mochalov V. A. IUS, 2009. N 5. P. 61–66.

This paper proposes algorithms for assessing the reliability of sensor network that can be used in design support systems of fault tolerant sensor networks. We consider algorithms for computing the lower bound probability of two nodes based on the compression of the graph describing the sensor network, as well as an assessment of the number of independent paths. The suggested algorithms can be successfully applied in large-scale sensor networks with high node connectivity.

Keywords — sensor network, fault tolerance, network assessment, reliability, graph.

Refs: 6 titles.

УДК 621.396

Functional diagnostics of linear dynamic systems using fuzzy analysis

Bezmen G. V., Kolesov N. V. IUS, 2009. N 5. P. 67–73.

A method for linear dynamic systems diagnostics is proposed, which is based on the assumption that there are no clear-cut boundaries between the serviceable and unserviceable technical states of the system and its components, and uses the bank of communicating observers.

Keywords — functional diagnostics, dynamic system, bank of observers.

Refs: 13 titles.

УДК 004.413

Исследование проблем интеграции в распределенных системах унаследованных приложений с использованием асинхронного пи-исчисления

Брейман А. Д., Зерний А. Ю., Казьмин Б. В. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 74–78.

Рассматриваются проблемы организации распределенных систем унаследованных приложений, использующих сторонние компоненты для управления интеграцией и последующим внутренним взаимодействием. Исследуется возможность устранения блокировок, которые возникают при взаимодействии приложений, применяющих разные типы связи. В качестве формальной модели исследования применяется асинхронное пи-исчисление. Предложен набор рекомендаций для организации рассматриваемых систем.

Ключевые слова — интеграция приложений, промежуточное программное обеспечение, асинхронное пи-исчисление.

Список лит.: 9 назв.

УДК 377.44:004

Об одном подходе к автоматизированной генерации тестовых заданий для контента инструктивного типа

Алсынбаева Л. Г. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 79–83.

Рассматривается один из подходов к автоматизированной генерации тестовых заданий для контента инструктивного типа в системах электронного корпоративного обучения. Задача автоматизации процесса конструирования тестовых заданий базируется на специфических особенностях текстов инструктивного характера и использовании принципов актуального членения предложения при их обработке.

Ключевые слова — электронное обучение, дистанционное обучение, тестовые задания.

Список лит.: 9 назв.

УДК 629.7.05

Методы и средства оптимизации режима посадки морского летательного аппарата

Небылов В. А. Информационно-управляющие системы, 2009. № 5. С. 84–86.

Предложен достаточно сложный и адекватный практическим требованиям критерий выбора оптимальной траектории посадки в зависимости от текущих характеристик морского волнения. Разработан новый алгоритм определения генерального направления распространения морских волн по цифровым фотоизображениям морской поверхности.

Ключевые слова — морской летательный аппарат, морское волнение, посадка, критерий оптимизации.

Список лит.: 7 назв.

УДК 004.413

Researching the problems of legacy application integration in distributed systems using asynchronous pi-calculus

Breyman A. D., Zernii A. Yu., Kazmin B. V. IUS, 2009. N 5. P. 74–78.

In this paper, we focus on the problems of organization of distributed systems of legacy applications that use remote components for managing integration and integrated applications interaction. We research possibility of correction of locks that occur during interaction between applications that support different types of communication. We use asynchronous pi-calculus as a formal model of research. We propose set of recommendations for organization of discussed systems.

Keywords — enterprise application integration, middleware, asynchronous pi-calculus.

Refs: 9 titles.

УДК 377.44:004

About one approach to automated generation of test assignments for instructive type content

Alsynbaeva L. G. IUS, 2009. N 5. P. 79–83.

One of the approaches to automated generation of test assignments for instructive type content in systems of electronic corporate education is examined in this article. The task of automatization of test assignment construction process is based upon specific peculiarities of instructive type texts and usage of principles of actual division of the sentence while its processing.

Keywords — electronic education, distance learning, test assignments.

Refs: 9 titles.

УДК 629.7.05

Methods and means of landing mode optimization of sea flying vehicles

Nebylov V. A. IUS, 2009. N 5. P. 84–86.

Pretty difficult but adequate to practical requirements criterion of an optimum landing trajectory choice depending on current characteristics of sea surface is offered. Before, pilots were given only general recommendations which were not based on detailed numerical research. A new algorithm of sea waves general direction definition by digital photos of sea surface is developed

Keywords — sea vehicle, disturbed sea surface, landing mode, optimization criterion.

Refs: 7 titles.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

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 Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатуры и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

Формулы набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), 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 заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), т. к. этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

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, подающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы изготавливаются в векторных программах: Visio 4, 5, 2002–2003 (*.vsd); Coreldraw (*.cdr); Excel; Word; AdobeIllustrator; AutoCad (*.dxf); Компас; Matlab (экспорт в формат *.ai);

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

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 подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Факс: (812) 494-70-18 (с пометкой «Для РИЦ»)

Тел.: (812) 494-70-44

Эл. почта: 80x@mail.ru

Сайт: www.i-us.ru



Российская академия наук
 Академия информационных систем
 Федеральное агентство по информационным технологиям
 Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии
 ЗАО «ИТ-Экспо»
 Российский фонд фундаментальных исследований

III КОНФЕРЕНЦИЯ «СТАНДАРТИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТЬ SITOP-2009»

27 октября 2009 г.

Место проведения: г. Москва, ВВЦ, павильон № 69, малый конференц-зал.

Конференция проводится в рамках национального форума «Информационное общество, электронное государство, электронное правительство» деловой программы 20-й Ежегодной выставки компьютерных и информационных технологий «Softtool».

Основные направления работы конференции

Методы и средства обеспечения интероперабельности.
 Применение ИТ-стандартов в различных областях (e-government, e-city, e-business, e-health и др.).
 Социальные и экономические аспекты ИТ-стандартизации.
 Стандарты управления ИТ-сервисами современной организации.
 Передовой опыт.
 Стандарты открытых систем и ПО с открытым кодом.

Контрольные сроки

Заявка на участие с предоставлением тезисов не позднее 01 октября 2009 г.
 Уведомление авторов о включении в состав участников 10 октября 2009 г.
 Опубликование программы докладов участников конференции 15 октября 2009 г.

Дополнительная информация и справки

тел. (495) 231-30-49, 629-33-46
 Эл. почта: info@sitopconf.ru
 Сайт: <http://www.sitopconf.ru/>



ISSN 1684-8853

