МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ИЗВЕСТИЯ

Юго-Западного государственного университета

Серия
УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА. МЕДИЦИНСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

№ 4
2013

Курск

2013. № 4
Научный рецензируемый журнал

ИЗВЕСТИЯ

ЮГО-ЗАПАДНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА
Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение

Основан в 2010 г.

Выходит четыре раза в год

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-44620 от 15.04.11).

Журнал «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» включен в перечень ведущих научных журналов ВАК РФ

Редакционный совет

С.Г. Емельянов (председатель, главный редактор), д-р техн.наук, профессор, ректор ЮЗГУ;
Л.М. Червяков (зам. председателя), д-р техн. наук, профессор, ЮЗГУ.
И.А. Асеева, д-р филос. наук, доцент, ЮЗГУ; **О.И. Атакищев**, д-р техн.наук, профессор, ЮЗГУ; **Т. Бертран**, д-р техн.наук, профессор, ун-т Дортмунда (Германия); **Р.К. Боженкова**, академик РАЕН, д-р филол. наук, профессор, МГТУ им. Баумана, Москва; **Ю.В. Вертакова**, д-р экон. наук, профессор, ЮЗГУ; **С.В. Дегтярев**, д-р техн.наук, профессор, ЮЗГУ; **В.Э. Дрейзин**, д-р техн. наук, профессор, ЮЗГУ; **А.В. Киричек**, д-р техн. наук, профессор, ЮЗГУ; **В.И. Колчунов**, академик РААСН, д-р техн. наук, профессор, ЮЗГУ; **Н.А. Кореневский**, д-р техн. наук, профессор, ЮЗГУ; **П.Ф. Кравчук**, д-р философ. наук, профессор, ЮЗГУ; **А.П. Кузьменко**, д-р физ.-мат. наук, профессор, ЮЗГУ; **О.Г. Локтионова**, д-р техн. наук, профессор, ЮЗГУ; **А.В. Олейник**, д-р техн. наук, профессор, департамент Минтранса РФ, Москва; **В.Н. Сусликов**, д-р юр. наук, профессор, ЮЗГУ; **М.Л. Титаренко**, акад. РАН, д-р филос. наук, профессор, ИДВ РАН, Москва; **В.С. Титов**, д-р техн. наук, профессор, ЮЗГУ; **С.Ф. Яцун**, д-р техн. наук, профессор, ЮЗГУ.

СОДЕРЖАНИЕ

Уважаемые коллеги! 10

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА 8

Борзов Д.Б., Кудланов Э.А.
Методика и алгоритм планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах 8

Ватутин Э.И., Мартынов И.А., Титов В.С.
Оценка реальной производительности современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации 11

Бобынцев Д.О., Ватутин Э.И., Титов В.С.
Оценка производительности матричного мультипроцессора при выполнении параллельного алгоритма решения задачи гравитационного взаимодействия N тел 20

Михайлов С.Н., Хотынюк С.С., Потапенко А.М.
Технологии интерактивного выявления смыслового содержания текстов в целях организации информационно-аналитического обеспечения научных исследований 29

Борзов Д.Б., Гуляев К.А., Башмаков А.И.
Обобщенный алгоритм сжатия видеопотока с использованием RGB-модели и его аппаратная реализация 35

Титов В.С., Вакун В.В., Полунин А.В.
Оптико-электронное устройство обнаружения и распознавания объектов городской транспортной инфраструктуры 40

Сизов А.С., Никутин Е.И., Котенко С.В.
Обзор и тенденции развития методов анализа стеганографических сообщений 43

Архипов Н.С., Полянский И.С., Ермишин Г.А.
Синтез корректирующего рефлектора двухзеркальных антенн зонтичного типа, построенных по схеме со смещенной образующей (схема АДЭ) 48

Добросердов О.Г., Белицкий А.М., Деренкова Е.О.
Математическая модель многопозиционной суммарно-разностно-дальномерной радиотехнической системы 57

Редакционная коллегия:

Главный редактор
С.Г. Емельянов, д-р техн. наук, профессор

Зам. главного редактора
В.С. Титов, д-р техн. наук, профессор

Члены редколлегии:

В.Н. Гридин, д-р техн. наук, профессор
И.В. Зотов, д-р техн. наук, профессор
В.Э. Дрейзин, д-р техн. наук, профессор
Н.А. Кореневский, д-р техн.наук, профессор
Т.А. Ширабакина, канд. техн. наук, профессор

Адрес редакции: 305040, г. Курск, ул.50 лет Октября, 94.
Телефоны: (4712) 50-48-19
Факс: (4712) 50-48-00. E-mail: rio_kursk@mail.ru

Оригинал-макет подготовлен О.В. Кофановой

Подписано в печать 27.12.10.13. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ.л. 10,5.
Тираж 1000 экз. Заказ . Цена свободная.
Юго-Западный государственный университет
305040, г. Курск, ул.50 лет Октября, 94.

Плата с аспирантов за публикацию не взимается.

Подписной индекс журнала «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» 44023, 44288 в объединенном каталоге «Пресса России»

Добросердов О.Г., Белицкий А.М., Деренкова Е.О.
Подход к структурно-параметрическому синтезу многопозиционных радиотехнических систем, реализующих угломерно-временные методы координатометрии 63

МЕДИЦИНСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ.....69

Кореневский Н.А., Башир Аббас Самаха, Горбатенко С.А.
Синтез гибридных нечетких правил для прогнозирования, оценки и управления состоянием здоровья в экологически неблагоприятных регионах.....69

Мохаммед А.А., Филист С.А., Шаталова О.В.
Моделирование импеданса биоматериалов в среде MATLAB.....73

Башир Аббас Самаха, Адел Мохаммед Аль-Кдаси, Кореневский Н.А., Милостная Н.А.
Распределенная автоматизированная система поддержки проведения исследований для управления контролем загрязнения среды в промышленном кластере.....78

Томакова Р.А., Ефремов М.А., Жилин В.В.
Нечеткие нейросетевые технологии для классификации форменных элементов крови.....84

К сведению авторов 90

© Юго-Западный государственный университет, 2013

2013. № 4

Scientific reviewed journal

Published four times a year

PROCEEDINGS

of the SOUTH WEST
STATE
UNIVERSITY
Management, computer facilities,
Computer science. Medical instrument making

CONTENS

Respected Colleques! 6

INFORMATICS, COMPUTER SCIENCES 8

Borzov D.B., Kudlanov E.A.
Techniques and algorithms processor capacity planning in multiprocessor systems 8

Vatutin E.I., Martynov I.A., Titov V.S.
Assessment of real productivity of modern processors in the problem of multiplication of matrixes for one-line program realization..... 11

Bobyntsev D.O., Vatutin E.I., Titov V.S.
Estimation of matrix multiprocessor performance using parallel algorithm for the n-body problem solving.....20

Mikhailov S.N., Hotynyuk S.S., Potapenko A.M.
Technologies of interactive identification the semantic content of the texts.....29

Borzov D.B., Gulyaev K.A., Bashmakov A.I.
Generic algorithms compressed video using rgb-models and its hardware implementation.....35

Titov V.S., Vakun V.V., Polunin A.V.
An optoelectronic device for detection and identification of urban transportation 40

Sizov A.S., Nikutin E.I., Kotenko S.V.
Overview and trends of the analysis methods of steganographic messages development.....43

Arkhipov N.S., Polyansky I.S., Yermishyn G.A.
Synthesis of two-mirror reflector antennas corrective umbrella type built by the scheme shifted generator (scheme ade) 48

Dobroserdov O.G., Belitsky A.M., Derenkova E.O.
Mathematical multiposition model of totally differential distance-measuring radio engineering system.....57

Dobroserdov O.G., Belitsky A.M., Derenkova E.O.
The approach to the structural parametric synthesis of multiposition radio engineering system realising goniometric and time methods of koordinatometriya.....63

MEDICAL INSTRUMENT MAKING..... 69

Korenevsky N.A., Bashir Abbas Samakha, Gorbatenko S.A.
Synthesis of hybrid indistinct rules for forecasting, assessment and management of the state of health in ecologically adverse regions 69

Mohammed A.A., Filist S.A., Shatalova O.V.
Modelling of the impedance of biomaterials in the environment of MATLAB.....73

Bashir Abbas Samakha, Adel Mohamed Al-Kdasi, Korenevsky N.A., Milostnaya N.A.
The distributed automated system of support of carrying out researches for management of control of pollution of the environment in the industrial cluster.....78

Tomakova R.A., Efremov M.A., Zhilin V.V.
Indistinct neuronetwork technologies for classification of uniform elements of blood.....84

Information for authors ……..…….……90

© Southwest State University, 2013

Уважаемые коллеги!

Предлагаемый читателям журнал объединяет статьи авторов, посвященные развитию научных исследований в области теории управления, вычислительной техники, информатики и медицинского приборостроения.

В разделе «Управление, вычислительная техника, информатика» рассмотрены следующие вопросы: методика и алгоритм планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах; оценка реальной производительности современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации, а также оценка производительности матричного мультипроцессора при выполнении параллельного алгоритма решения задачи гравитационного взаимодействия *n* тел; две основные технологии визуализации результатов поиска, осуществляемого поисковыми системами в сети Интернет: традиционного и с построением понятийного графа, также производится анализ, сравнение данных технологий, предложено совместное применение рассмотренных технологий при организации информационно-аналитического обеспечения научных исследований вуза; рассмотрен один из подходов для кодирования видеосигнала в системе RGB, показана необходимость снижения трафика при передаче данных на большие и сверхбольшие расстояния, представлено схемотехническое решение для данного алгоритма; описывается автоматическое устройство обнаружения и распознавания объектов муниципального транспорта; приведен обзор основных методов анализа стеганографических сообщений и определены тенденции их развития; предложен алгоритм синтеза корректирующего рефлектора двухзеркальной антенны зонтичного типа, построенной по схеме со смещенной образующей; математическая модель многопозиционной суммарно-разностно-дальномерной радиотехнической системы; рассматривается решение задачи структурно-параметрического синтеза многопозиционных радиотехнических систем на основе агрегативно-декомпозиционного подхода.

В разделе «Медицинское приборостроение» рассматривается метод синтеза нечетких решающих правил, работающих с разной структурой данных в условиях отсутствия точных аналитических моделей, описывающих состояние здоровья людей, проживающих в экологически неблагоприятных регионах; для моделирования импеданса биоматериала предлагается использовать гибридные модели, построенные в виде структурно-функциональных узлов, полученных на основе гипотезы о свойствах биоматериалов и строгого математического описания функционирования узлов, входящих в модель; рассматривается распределенная автоматизированная система поддержки проведения исследований для управления контролем загрязнения среды в промышленном кластере; предложена универсальная сетевая структура, предназначенная для классификации форменных элементов крови на микроскопических изображениях мазков периферической крови, а также приведена схема алгоритма формирования сетевой модели для классификации пикселей сложноструктурируемого изображения.

С.Г. Емельянов, д-р техн. наук,
профессор, ректор ЮЗГУ,
главный редактор журнала

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

УДК 004.042

Д.Б. Борзов, канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: borzovdb@kursknet.ru)

Э.А. Кудланов, магистрант, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: eduardokud@mail.ru)

МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ ПРОЦЕССОРОВ В МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрена проблема планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах. Показана полиномиальная сложность составления плана загрузки процессоров. Предложен подход и соответствующий алгоритм составления плана загрузки.

Ключевые слова: *мультипроцессорная система, загрузка, план, подход, алгоритм.*

***

В настоящее время широко используется мультипроцессорная организация вычислительных систем [1]. При этом постоянно стремятся повысить их производительность. Особенно это актуально для систем высокой готовности, к которым можно отнести системы наблюдения, слежения, контроля, бортовой авиации и т.д. Для этих целей применяются различные методы, к которым можно отнести распараллеливание последовательных подпрограмм, размещение подпрограмм по процессорам, составление плана топологии многопроцессорных систем [2–4]. В данной работе предложен подход и алгоритм планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах, которая является продолжением исследований, начатых в [5].

В случае применения систем мультипроцессорных систем с числом процессоров более сотни для составления расписания загрузки процессоров применение программных средств неприемлемо из-за длительного времени решения.

Пусть для выполнения программы требуется выполнить n подпрограмм: $J_1 \ldots, J_n$. При этом их длительность фиксирована.

Порядок выполнения подпрограмм задается ориентированным графом

$$G = \left(X, E, A\right),$$

где

$$X = \left\{x_1, x_2, \ldots, x_q, \ldots, x_n\right\} - \qquad (1)$$

это множество вершин графа G, вершины $x_q \in X$ $(q = \overline{1,n})$ которого соответствуют подпрограммам и сведены в матрицу смежности

$$\text{(МС)}\ M = \left\| m_{ij} \right\|_{N \times |E|},$$

где $i = \overline{1,n}$, $!j = \overline{1,n}$, $N = |X|$;

дуги $e_{ij} \in E$ соответствуют связям между $x_q \in X$ $(q = \overline{1,n})$;

$a_q \in A$ – объем данных, обозначающих подпрограммы, назначенные на выполнение в данный момент.

Каждая подпрограмма J_δ изображается вершиной $x_q \in X$. Каждой вершине x_δ приписывается вес a_δ.

Множество процессоров мультипроцессорной системы задается в виде графа H:

$$H = \left(p_1, p_2, \ldots p_n\right). \qquad (2)$$

Примем допущение, что подпрограммы J_t и J_j выполняются непосредственно друг за другом в порядке $J_i \to J_j$. Кроме того, введем ресурсное ограничение, то есть после завершения выполнения подпрограммы J_i процессор

без ожидания начинает выполнять подпрограмму J_j.

Тогда на содержательном уровне планирование загрузки процессоров p_q ($q=\overline{1,n}$) мультипроцессорной системы заключается в выборе такого плана размещения подпрограмм, изображаемых вершинами X, запланированные для загрузки в процессоры H, которые минимизируют время простоя процессоров мультипроцессорной систем и, как следствие, повышают ее производительность.

Аналитически выбор плана загрузки процессоров p_i ($i=\overline{1,n}$) может быть описан отображением:

$$\beta_s=\left\{x_{s_1},x_{s_2},\ldots,x_{s_q},\ldots,x_{s_n}\right\}\to \\ \to\left\{p_1,p_2,\ldots,p_q,\ldots,p_n\right\}, \quad (3)$$

где $!S=\overline{1,n!}$.

В (3) символ → означает отображение одной из вершин $x_{S_q}\in X$ на один из модулей, где s – это номер очередной перестановки, соответствующий s-му варианту размещения.

Мощность множества $\psi=\{\beta_S\}$ всевозможных отображений (3) равна числу всевозможных перестановок подпрограмм $x_q\in X$ в матрице M : $|\psi|=N!$.

Пусть Ψ – множество всевозможных отображений вида (3). Тогда задачу размещения можно сформулировать как поиск отображения $\beta^*\in\Psi$, такого, что

$$T_{\beta^*}=\min_{\Psi}\left\{\operatorname*{sum}_{\beta_S\in\psi}\left\{T_{\beta^*}\left(|M|_q+|A|_\delta\right)\right\}\right\}, \quad (4)$$

где в $T_{\beta^*}\left(|M|_q+|A|_\delta\right)$ – объем обрабатываемых данных при постановке в план подпрограммы x_{s_q} на процессор m_q с учетом обрабатываемой подпрограммы в данном процессоре.

В выражении (4) $\operatorname*{sum}_{\beta_S\in\psi}$ означает поиск суммарных объемов обрабатываемых данных по множеству процессоров H, а $\min_{\Psi}$ – выбор минимального из них.

Таким образом, задача планирования загрузки процессоров согласно условию (4) заключается в поиске такого варианта размещения, при котором выполняется условие (3)

Исходя из представленных теоретических положений и с учетом (4) разработана методика составления плана загрузки процессоров в мультипроцессорных системах, которая состоит из следующих шагов:

Этап 1. Формируется множество A' и располагаются значения $a_\delta\in A$ по возрастанию; формируется множество M', в котором значения m_{ij} ($i=\overline{1,n}$, ! $j=\overline{1,n}$) расположены по убыванию.

Этап 2. В соответствии с (4) выполняется суммирование значений a_δ со значением $M'[1]$, выбирается минимальное, запоминая номер выбранного процессора.

Этап 3. Повторяем шаг два до конца значений в A'.

Представленная методика позволяет сформулировать алгоритм планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах, который состоит из следующих пунктов:

1. Записываем МС (М).
2. Формируем множество A'.
3. Формируем множество M'.
4. Создаем область Т1 и Т2 размерами $1\times n$ и $n^2\times n$ соответственно.
5. Суммируем значение $M'[1]$ с элементами A', занося результат в Т1.
6. Выбираем минимум из Т1 и заносим порядковый номер выбранного значения и само значение в Т2.
7. Повторяем п. 5–6 до конца значений M'.

8. Полученные в Т2 значения есть расписание загрузки процессоров мультипроцессорной системы.

На шаге 5 представленного алгоритма выполняется пробное суммирование первого элемента из M' с элементами вектора A', а на шаге выбирается минимум из полученных значений. Соответствующее полученное значение и выбранный номер процессора запоминается в Т2. Шаги 5 и 6 алгоритма повторяются до конца значений в M'. В конце работы алгоритма получаем план загрузки в массиве Т2.

В качестве примера работы представленного алгоритма возьмем программу, представленную матрицей смежности (рис. 1), и мультипроцессорную систему из пяти процессоров.

1	7	3	6	7	8
2	3	8			
3	6		3	2	10
4	7		2	5	
5	8		10		11

Рис. 1. Матрица смежности

Тогда в соответствии с представленным алгоритмом первоначально формируем множества A' и M'.

В результате получаем:

$$M' = 10 \quad 8 \quad 7 \quad 6 \quad 3 \quad 2;$$
$$A' = 3 \quad 5 \quad 7 \quad 8 \quad 11.$$

Далее, выполняя последовательные суммирования, в соответствии с п. 5 алгоритма в векторе Т1 будут записаны следующие значения:

$$T1 = \{13 \quad 15 \quad 17 \quad 18 \quad 21\}.$$

Из полученного множества выбираем число 13 как минимальное из полученного множества, что означает первый процессор. Это значит, что значение 10 назначается в план загрузки в первый процессор.

Далее выбирается очередь для задачи 2 из M'. Получаем:

$$T1 = \{21 \quad 13 \quad 15 \quad 16 \quad 19\}.$$

Таким образом, значение 8 из M' назначается в план загрузки для второго процессора. Аналогично применяя предложенный алгоритм, получаем план загрузки процессоров мультипроцессорной системы, представленный на рис. 2.

На рисунке 2 квадратами обозначены процессорные модули мультипроцессорной системы, а числа внутри означают объем данных, выполняемых в данный момент. Стрелки и числа означают задания, запланированные для загрузки данному процессору.

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности применения предложенной методики и аппаратно-ориентированного алгоритма для систем высокой готовности, в которых необходима оперативная реакция системы на отказ. При этом, так как программная реализация в данном случае неприемлема из-за длительного времени решения, целесообразно применить аппаратные средства для решения данной задачи, что является предметом дальнейших исследований.

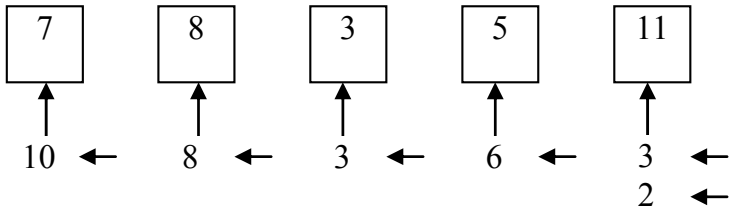


Рис. 2. План загрузки мультипроцессорной системы

Работа выполнена в рамках программы «Научные и научно-педаго-гические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (проект 14.B37.21.0598 «Теоретические основы и методы использования распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем для решения дискретных оптимизационных задач»).

Список литературы

1. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 608 с.

2. Борзов Д.Б., Дюбрюкс С.А., Титов В.С. Метод выявления параллелизма внутри линейных участков последовательных программ и его аппаратная реализация // Известия вузов. Серия «Приборостроение». 2008. № 2. С. 34–38.

3. Борзов Д.Б., Аль-Марят Б.И., Масолов А.С. Метод снижения коммуникационной задержки путем субоптимального размещения задач в матричных базовых блоках кластера // Телекоммуникации. 2008. № 4. С. 21–25.

4. Борзов Д.Б., Соколова Ю.В., Минайлов В.В. Переразмещение подпрограмм в отказоустойчивых мультипроцессорных системах // Известия вузов. Серия «Приборостроение». 2013. № 6. С. 39–44.

5. Борзов Д.Б., Родин А.В. Планирование загрузки процессоров в мультипроцессорных системах // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: сборник материалов X Междунар. конф. Курск, 2012. С. 135–136.

Получено 25.10.13

D.B. Borzov, Candidate of Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: borzovdb@kursknet.ru)

E.A. Kudlanov, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: eduardokud@mail.ru)

TECHNIQUES AND ALGORITHMS PROCESSOR CAPACITY PLANNING IN MULTIPROCESSOR SYSTEMS

The problem of scheduling in multiprocessor. Shows a polynomial complexity of scheduling load one processor. The approach and the corresponding algorithm of scheduling loads.

Key words: *multi-processor system, the load plan, the approach, the algorithm.*

УДК 681.3

Э.И. Ватутин, канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: evatutin@rambler.ru)

И.А. Мартынов, аспирант, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: morzee@inbox.ru)

В.С. Титов, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: titov-kstu@rambler.ru)

ОЦЕНКА РЕАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОРОВ В ЗАДАЧЕ УМНОЖЕНИЯ МАТРИЦ ДЛЯ ОДНОПОТОЧНОЙ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Приведено описание подходов к выполнению операции умножения матриц, показано, что «наивный» подход без оптимизации работы с памятью характеризуется низкой производительностью обработки, в то время как подходы с буферизацией столбца и блочного умножения позволяют более эффективно использовать кэш-память, что в совокупности с применением раскрутки циклов обеспечивает реальную производительность на уровне 2,5–6,8 GFLOP/s для однопоточной реализации операции для современных процессоров Intel Core.

Ключевые слова: *умножение матриц, алгоритмическая оптимизация.*

***

Одной из частных подзадач, находящих широкое применение при решении задач широкого спектра (томография, компьютерная графика, проектирование

роботизированных средств, классификация бинарных отношений [1] и др.), является задача умножения матриц. Время ее решения во многих случаях является бутылочным горлышком (англ. bottleneck) и напрямую влияет на время решения поставленной задачи, поэтому существует большое количество различных подходов, связанных с оптимизацией и распараллеливанием выполняемых действий. Существует целый спектр программно-алгоритмического обеспечения для выполнения действий над матрицами в ряде частных случаев (например, для разряженных или ленточных матриц), а также базирующееся на нем аппаратно-алгоритмическое обеспечение (например, с использованием транспьютерных сетей или систолических вычислительных структур). Несмотря на кажущуюся простоту, задача характеризуется рядом особенностей, к которым в первую очередь можно отнести высокую степень параллелизма для выполняемых операций и сильную зависимость времени вычисления от темпа поступления данных из памяти.

В данной статье рассмотрены вопросы анализа эффективности различных подходов к решению задачи общего вида (умножение «плотных» квадратных матриц размера $N \times N$) для однопоточной высокоуровневой программной реализации, ориентированной на использование процессоров семейства x86, с оптимизацией работы кэш-памяти.

Как известно, результатом умножения квадратных матриц A и B размера $N \times N$ является квадратная матрица C размером $N \times N$, элементы c_{ij}, $i, j = \overline{1, N}$ которой определяются по формуле

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^{N} a_{ik} b_{kj}. \qquad (1)$$

«Наивная» программная реализация, соответствующая формуле (1) и часто используемая в процессе обучения основам программирования, представлена ниже:

```
for (int i=0; i<N; i++)
   for (int j=0; j<N; j++)
   {
   float s = 0.0f;

            for (int k=0; k<N; k++)
                    s += A[i][k]*B[k][j];

            C[i][j] = s;
   }
```

Для последующих оценок производительности различных программных реализаций заметим, что в составе внутреннего цикла присутствуют две операции с плавающей точкой (сложение и умножение), что формально позволяет оценить необходимый объем вычислений $V = 2N^3$ FLOP.

Зная время t, которое затрачивает вычислительная система на выполнение программы, можно оценить полученную реальную производительность $P = \frac{V}{t}$. При этом, в отличие от оценки абстрактной пиковой производительности вычислительной системы (в простейшем случае – процессора), учитывается ряд особенностей архитектуры современных вычислительных средств (суперскалярность, конвейерное и внеочередное исполнение команд, наличие кэш-памяти) и их влияние на реальную производительность конкретной программной реализации.

Для приведенной выше «наивной» программной реализации время выполнения и соответствующая реальная производительность для матриц различного размера приведены в таблице 1 (здесь и далее тип элементов матриц имеет одинарную точность).

Таблица 1

Оценка времени выполнения и реальной производительности для «наивной» программной реализации, компилятор Microsoft Visual Studio 2012, без оптимизаций компилятора

Размерность задачи	Объем обрабатываемых данных	Объем вычислений	Время выполнения, производительность	
			Intel Core 2 Duo E6300, 1,86 ГГц, 2 МБ L2 (Allendale, 2006)	Intel Core i7 4770, 3,4 (3,9) ГГц, 8 МБ L3 (Haswell, 2013)
256×256	2×256 = 512 КБ	32 MFLOP	0,135 с 0,24 GFLOP/s	0,045 с 0,71 GFLOP/s
512×512	2×1 = 2 МБ	256 MFLOP	1,1 с 0,23 GFLOP/s	0,41 с 0,62 MFLOP/s
1024×1024	2×4 = 8 МБ	2 GFLOP	40,8 с 0,05 GFLOP/s	3,3 с 0,61 GFLOP/s
2048×2048	2×16 = 32 МБ	16 GFLOP	340 с (5 мин 40 с) 0,05 GFLOP/s	103 с (1 мин 43 с) 0,16 GFLOP/s

Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд выводов. Так производительность обработки на использованной в тестировании паре процессоров (первый и последний на данный момент представители семейства Intel Core) отличается приблизительно в 3 раза за счет разницы в тактовых частотах ($3,9/1,86 = 2,1$ раза) и микроархитектурных улучшений ядра Haswell по сравнению с Allendale.

Из общей тенденции выбивается тест для размерности задачи 1024×1024 (разница в производительности $0,61/0,05 = 12,2$ раза), объяснением чему служит исчерпание объема доступной кэш-памяти (2 МБ для ядра Allendale при объеме обрабатываемых данных 8 МБ). По той же причине наблюдается падение производительности при переходе 512×512→1024×1024 (в 0,23 / 0,16 = = 4,6 раза) для ядра Allendale и 1024×1024→2048×2048 (в 0,61 / 0,16 = = 3,8 раза) для ядра Haswell.

Таким образом, скорость поступления исходных данных существенно лимитирует реальную производительность обработки и для матриц большой размерности (превышающих объем доступной кэш-памяти) определяется пропускной способностью оперативной памяти, кэш-память процессора при этом используется неэффективно.

Включение оптимизаций в составе опций компилятора (опция «/O2») сокращает время обработки приблизительно в 2 раза (с 103 до 68 с для умножения матриц 2048×2048 на ядре Haswell), позволяя достичь производительности 0,24 PFLOP/s и не меняя общей картины.

При выполнении «наивной» программной реализации производится $2N^3$ обращений в оперативную память, при этом обращения к элементам матрицы A производятся по смежным адресам $(a+iN, a+iN+1, a+iN+2, ...)$, что делает эффективной работу механизма аппаратной предвыборки данных (англ. hardware prefetch), в то время как обращения к элементам матрицы B производятся «прыжками» (см. рис. 1) через N элементов $(b+j, b+N+j, b+2N+j, ...)$, что затрудняет как работу кэш-памяти, так и механизма аппаратной предвыборки данных, приводя к большому числу кэш-промахов (англ. cache miss) [2].

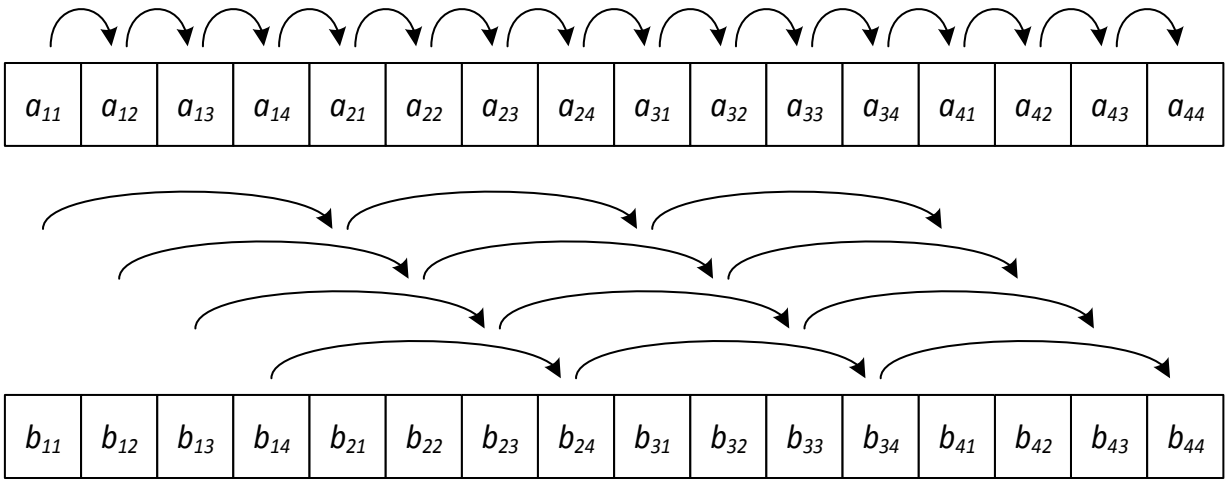


Рис. 1. Схема обращений к памяти при «наивной» реализации умножения матриц

Снизить число «неудобных» обращений в память можно путем буферизации значения j-го столбца матрицы B, что, в свою очередь, требует изменения порядка следования циклов в программе.

При реализации данной стратегии обращения к элементам матрицы B «прыжками» через N элементов заменяются обращениями к временному массиву-буферу $T = [t_1, t_2, ..., t_N]$ размером N элементов, $t_k = b_{kj}$, $k = \overline{1, N}$, которые располагаются в кэш-памяти и обходятся подряд.

При этом умножение матриц выполняется по следующий формуле:

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^{N} a_{ik} t_k, \qquad (2)$$

соответствующая программная реализация приведена ниже:

```
float buf[N];        // Буфер для хранения j-го столбца

for (int j=0; j<N; j++)
{
// Буферизация столбца
  for (int k=0; k<N; k++)
        buf[k] = B[k][j];

// Умножение
  for (int i=0; i<N; i++)
  {
        float s = 0.0f;

        for (int k=0; k<N; k++)
              s += A[i][k]*buf[k];

        C[i][j] = s;
  }

}
```

При подобной буферизации в память производится $N^3 + N^2$ обращений, остальные N^3 обращения к массиву-буферу T производятся в кэш.

Результаты оценки необходимого времени и соответствующая реальная производительность приведены в таблице 2.

Таблица 2

Оценка времени выполнения и реальной производительности для программной реализации с буферизацией столбца, компилятор Microsoft Visual Studio 2012, с оптимизациями компилятора

Размерность задачи	Время выполнения, производительность, выигрыш по сравнению с «наивной» реализацией	
	Intel Core 2 Duo E6300, 1,86 ГГц, 2 МБ L2 (Allendale, 2006)	Intel Core i7 4770, 3,4 (3,9) ГГц, 8 МБ L3 (Haswell, 2013)
256×256	27 мс 1,3 GFLOP/s 5,4x	14 мс 2,4 GFLOP/s 3,4x
512×512	278 мс 1,0 GFLOP/s 4,3x	104 мс 2,6 GFLOP/s 4,2x
1024×1024	2,1 с 1,0 GFLOP/s 20x	850 мс 2,5 GFLOP/s 4,1x
2048×2048	16 с 1,1 GFLOP/s 22x	7 с 2,5 GFLOP/s 15,6x

Приведенные в таблице 2 данные позволяют заметить, что при использовании буферизации столбца не происходит существенной деградации реальной производительности с ростом размерности задачи, что подтверждает эффективность использования кэш-памяти. При этом по сравнению с «наивной» реализацией наблюдается существенный выигрыш во времени обработки (от 3 до 20 раз), в особенности в ситуации, когда объем обрабатываемых данных превышает объем доступной кэш-памяти.

Основным действием, лимитирующим время выполнения умножения, является действие накапливающего сложения во внутреннем цикле. Действия сводятся к двум обращениям к (кэш)памяти (для чтения значений a_{ik} и t_k), которые не зависят друг от друга по данным и теоретически могут выполняться параллельно во времени при отсутствии аппаратных ограничений, одному умножению $a_{ik} \times t_k$, зависящему по данным от значений a_{ik} и t_k, и одному сложению $s + a_{ik}t_k$, зависящему по данным от результата умножения.

Таким образом, тело цикла в основном состоит из зависящих друг от друга действий (RAW-зависимости), что приводит к низкому параллелизму на уровне команд (англ. Instruction Level Parallelism, ILP) и низкой загрузке исполнительных устройств процессора. Повысить степень загрузки исполнительных устройств можно путем раскрутки внутреннего цикла программы (англ. loop unrolling) [2].

Пример раскрутки на 4 итерации-приведен ниже:

Результаты влияния указанной оптимизации на время выполнения приведены в таблицах 3 и 4.

Анализ приведенных результатов показывает, что для данной задачи достаточно раскрутки внутреннего цикла на 4 итерации, что обеспечивает дополнительную прибавку в производительности на 30–60% для ядра Allendale и в 2,4 раза для ядра Haswell за счет повышения степени загрузки исполнительных устройств. Раскрутка на большее число итераций приводит к падению производительности и нецелесообразна.

```
        float buf[N];

        for (int j=0; j<N; j++)
        {
            for (int k=0; k<N; k++)
                    buf[k] = B[k][j];

            for (int i=0; i<N; i++)
            {

                    // Раскрутка на 4
                    float s1 = 0.0f;
                    float s2 = 0.0f;
                    float s3 = 0.0f;
                    float s4 = 0.0f;

                    for (int k=0; k<N; k += 4)
                    {
                            s1 += A[i][k]*buf[k];
                            s2 += A[i][k+1]*buf[k+1];
                            s3 += A[i][k+2]*buf[k+2];
                            s4 += A[i][k+3]*buf[k+3];
                    }

                    C[i][j] = s1+s2+s3+s4;
            }
    }
```

Таблица 3

Оценка влияния раскрутки внутреннего цикла на время обработки, реальную производительность и выигрыш по сравнению с реализацией без раскрутки для программной реализации с буферизацией столбца, компилятор Microsoft Visual Studio 2012, с оптимизациями компилятора, ядро Haswell

Размерность задачи	Время выполнения, производительность, выигрыш			
	Без раскрутки	С раскруткой		
		на 2 итерации	на 4 итерации	на 8 итераций
256×256	14 мс 2,4 GFLOP/s	7,9 мс 4,2 GFLOP/s 1,8x	5,9 мс 5,7 GFLOP/s 2,4x	6,2 мс 5,4 GFLOP/s 2,3x
512×512	104 мс 2,6 GFLOP/s	55 мс 4,9 GFLOP/s 1,9x	40 мс 6,7 GFLOP/s 2,6x	44 мс 6,2 GFLOP/s 2,4x
1024×1024	850 мс 2,5 GFLOP/s	442 мс 4,9 GFLOP/s 1,9x	318 мс 6,8 GFLOP/s 2,7x	350 мс 6,1 GFLOP/s 2,4x
2048×2048	7 с 2,5 GFLOP/s	3,7 с 4,6 GFLOP/s 1,8x	2,9 с 5,9 GFLOP/s 2,4x	3,1 с 5,6 GFLOP/s 2,2x

Таблица 4

Оценка влияния раскрутки внутреннего цикла на время обработки, реальную производительность и выигрыш по сравнению с реализацией без раскрутки для программной реализации с буферизацией столбца, компилятор Microsoft Visual Studio 2012, с оптимизациями компилятора, ядро Allendale

Размерность задачи	Время выполнения, производительность, выигрыш			
	Без раскрутки	С раскруткой		
		на 2 итерации	на 4 итерации	на 8 итераций
256×256	27 мс 1,3 GFLOP/s	21 мс 1,6 GFLOP/s +23%	20 мс 1,7 GFLOP/s +31%	21 мс 1,6 GFLOP/s +23%
512×512	278 мс 1,0 GFLOP/s	175 мс 1,5 GFLOP/s +50%	171 мс 1,6 GFLOP/s +60%	199 мс 1,3 GFLOP/s +33%
1024×1024	2,1 с 1,0 GFLOP/s	1,5 с 1,4 GFLOP/s +40%	1,7 с 1,3 GFLOP/s +30%	1,6 с 1,4 GFLOP/s +40%
2048×2048	16 с 1,1 GFLOP/s	12 с 1,4 GFLOP/s +27%	12 с 1,5 GFLOP/s +36%	14 с 1,2 GFLOP/s +9%

Еще одним известным способом, позволяющим повысить локальность обрабатываемых данных, является блочное умножение. При этом результирующая матрица C получается не поэлементно, как в предыдущих примерах, а поблочно, квадратными блоками размером $S \times S$ элементов. При этом для вычисления значений выбранного блока требуется обращение к группе из S строк матрицы A и S столбцов матрицы B, т.е. для текущего блока требуется обращение к $2 \times S \times N$ элементам матриц, которые могут быть размещены в кэше процессора.

Если разбить процесс нахождения результирующих значений на $z = \frac{N}{S}$ стадий (рис. 2), то требование к необходимым для выполнения текущей группы операции элементам может быть дополнительно снижено до $2S^2$.

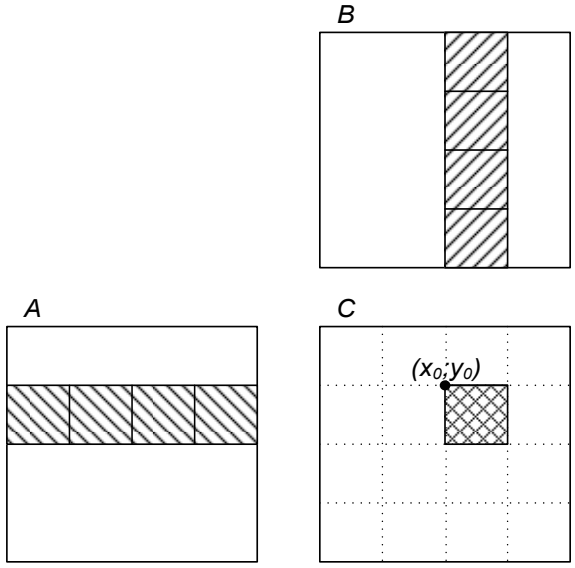


Рис. 2. Иллюстрация в блочному умножению матриц

При этом само умножение фактически выполняется как

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^{N} a_{ik} b_{kj} = \underbrace{\sum_{k=1}^{S} a_{ik} b_{kj} + \sum_{k=S+1}^{2S} a_{ik} b_{kj} + \sum_{k=SB+1}^{3S} a_{ik} b_{kj} + \ldots + \sum_{k=N-S+1}^{N} a_{ik} b_{kj}}_{z=\frac{N}{S}\ \text{сумм}} = \sum_{z=0}^{N/S} \sum_{k=(z-1)S+1}^{zS} a_{ik} b_{kj}. \qquad (3)$$

Программная реализация, соответствующая умножению по формуле (3), приведена ниже:

```
float Az[BLOCK_SIZE][BLOCK_SIZE];
float Bz[BLOCK_SIZE][BLOCK_SIZE];

// Перебор блоков результирующей матрицы
for (int x0 = 0; x0 < N; x0 += BLOCK_SIZE)
   for (int y0 = 0; y0 < N; y0 += BLOCK_SIZE)
   {
            float sum[BLOCK_SIZE][BLOCK_SIZE];

            for (int x = 0; x < BLOCK_SIZE; x++)
                     for (int y = 0; y < BLOCK_SIZE; y++)
                              sum[x][y] = 0.0f;

            // Цикл по подматрицам (z)
            for (int z = 0; z < N/BLOCK_SIZE; z++)
            {
                     int zb = z*BLOCK_SIZE;

                     // Копирование подматриц Az и Bz
                     for (int x = 0; x < BLOCK_SIZE; x++)
                              for (int y = 0; y < BLOCK_SIZE; y++)
                              {
                                       Az[x][y] = A[x0+x][zb+y];
                                       Bz[x][y] = B[zb+x][y0+y];
                              }

                     // Умножение подматриц Az*Bz
                     for (int x = 0; x < BLOCK_SIZE; x++)
                              for (int y = 0; y < BLOCK_SIZE; y++)
                              {
                                       float s = 0.0f;

                                       for (int k = 0; k < BLOCK_SIZE; k++)
                                                s += Az[x][k] * Bz[k][y];

                                       sum[x][y] += s;
                              }
            }

            // Запись результирующей подматрицы
            for (int x = 0; x < BLOCK_SIZE; x++)
                     for (int y = 0; y < BLOCK_SIZE; y++)
                              C[x0+x][y0+y] = sum[x][y];
   }
```

При использовании блочного подхода производится $\frac{2N^3}{S}$ обращений в память и $2N^3$ обращений в кэш. При этом производительность обработки зависит от выбранного размера блока S (табл. 5 и 6).

Анализ приведенных данных показывает, что в каждом конкретном случае (размерность задачи, процессор) имеет место вполне определенный оптимальный размер блока S, при котором время обработки минимально. По-видимому, данный эффект связан с микроархитек-

турными особенностями реализации кэш-памяти для каждого процессора (разбиение на кэши 1, 2 и 3 уровня, их латентность, ассоциативность и пропускная способность, пропускная способность связывающих их шин и т.д.).

Таблица 5

Оценка влияния размера блока S на время обработки (в секундах) по сравнению с программной реализацией с буферизацией столбца, компилятор Microsoft Visual Studio 2012, с оптимизациями компилятора, ядро Haswell

Размерность задачи	Размер блока S							
	2	4	8	16	32	64	128	256
256×256	0,010	0,008	0,007	0,008	0,011	0,011	0,013	0,014
512×512	0,117	0,079	0,057	0,062	0,089	0,086	0,098	0,127
1024×1024	0,971	0,665	0,463	0,504	0,726	0,691	0,784	0,999
2048×2048	28,836	13,628	6,026	4,816	6,207	5,622	6,297	7,952

Таблица 6

Оценка влияния размера блока S на время обработки (в секундах) по сравнению с программной реализацией с буферизацией столбца, компилятор Microsoft Visual Studio 2012, с оптимизациями компилятора, ядро Allendale

Размерность задачи	Размер блока S							
	2	4	8	16	32	64	128	256
256×256	0,031	0,026	0,021	0,025	0,026	0,028	0,049	0,049
512×512	0,329	0,230	0,172	0,207	0,209	0,205	0,391	0,391
1024×1024	9,908	4,997	2,365	2,049	1,764	1,652	3,151	3,106
2048×2048	78,719	41,142	18,822	16,411	14,111	13,226	25,254	24,963

Дополнительного снижения времени выполнения умножения можно добиться путем раскрутки внутреннего цикла. При этом, например, для матриц размером 2048×2048 время обработки для выбранных процессоров сокращается с 5,622 с до 3,090 с (ядро Haswell, оптимальный размер блока S изменился с 16 на 64, $P = 5,6$ GFLOP/s) и с 13,226 с до 6,962 с (ядро Allendale, оптимальный размер блока $S = 64$, $P = 2,5$ GFLOP/s).

Сравнение блочного умножения и умножения с буферизацией столбца позволяет сделать вывод о том, что для ядра Haswell оба варианта приводят к достижению сопоставимой производительности, в то время как для ядра Allendale блочное умножение является предпочтительным. Процессоры семейства Intel Core демонстрируют в поставленной задаче реальную производительность на уровне 2,5–6,8 GFLOP/s при однопоточной обработке данных, что в десятки раз превосходит производительность «наивного» варианта умножения без оптимизации работы с памятью.

1. Ватутин Э.И., Зотов И.В. Построение матрицы отношений в задаче оптимального разбиения параллельных управляющих алгоритмов // Известия Курского государственного технического университета. 2004. № 2. С. 85–89.

2. Intel 64 and IA-32 Architectures Software Developer’s Manual. Volume 1: Basic Architecture. Order number 253665-021.

Получено 01.11.13

E.I. Vatutin, Candidate of Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: evatutin@rambler.ru)

I.A. Martynov, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: morzee@inbox.ru)

V.S. Titov, Doctor of Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: titov-kstu@rambler.ru)

ASSESSMENT OF REAL PRODUCTIVITY OF MODERN PROCESSORS IN THE PROBLEM OF MULTIPLICATION OF MATRIXES FOR ONE-LINE PROGRAM REALIZATION

The description of approaches is provided to performance of operation of multiplication of matrixes, shown that "naive" approach without work optimization with memory is characterized by the low productivity of processing while approaches with buffering of a column and block multiplication allow to use more effectively a cache memory that in total with application of promotion of cycles provides real productivity at the level of 2,5–6,8 GFLOP/s for one-line realization of operation for modern Intel Core processors.

Key words: *multiplication of matrixes, algorithmic optimization.*

УДК 004.75

Д.О. Бобынцев, преподаватель, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: daniel8728@yandex.ru)

Э.И. Ватутин, канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: evatutin@rambler.ru)

В.С. Титов, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: titov-kstu@rambler.ru)

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МАТРИЧНОГО МУЛЬТИПРОЦЕССОРА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ГРАВИТАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ *N* ТЕЛ

Рассмотрено разбиение задачи гравитационного взаимодействия N тел на параллельные фрагменты, произведена оценка пиковой производительности параллельной вычислительной системы при решении задачи в матричном мультипроцессоре в конфигурации 8×8, исследованы результаты планирования размещения параллельных фрагментов алгоритма с применением двух критериев минимизации коммуникационной задержки, оценена получаемая реальная производительность вычислительной системы для каждого из них.

Ключевые слова: *размещение параллельных подпрограмм, матричные мультипроцессоры, задача N тел, коммуникационная задержка в мультипроцессорах, минимаксный критерий, минимаксиминный критерий.*

***

Создание высокопроизводительных вычислительных систем (ВС) является одним из наиболее важных направлений развития вычислительной техники в свете стремления к получению большей производительности в соответствии с законом Мура. Данные системы находят применение при решении различных вычислительных задач, которые характеризуются либо большим объемом вычислений, либо имеют ограничения на время получения результата. Известные частные случаи таких систем – матричные мультипроцессоры (ММП) и суперкомпьютеры с развитой коммуникационной подсистемой, топология межсоединений в которых представляет собой матрицу, тор либо их обобщения на случаи большей размерности (например, подсистема суперкомпьютеров IBM BlueGene представляет собой 5-мерный тор). При интегральном исполнении МПП требование планарности связей и ограничение на число слоев металлизации на кристалле не позволяют реализовать большое число связей, поэтому обычно для них применяется матричная или реже тороидальная

топология межпроцессорных коммуникаций.

Одной из важных задач в МПП является планирование размещения подпрограмм по множеству обрабатывающих процессоров, целью которого является минимизация величин коммуникационных задержек при передаче данных между процессорами, что особенно важно при решении задач, требующих частых обменов данными между отдельными подзадачами (т.н. сильносвязные задачи). Существует целый ряд задач, в которых интегральное время выполнения целиком и полностью лимитируется временем обмена данными (например, моделирование климата, решение систем дифференциальных уравнений с использованием сеточных методов и др.) в соответствии с законом Амдала, что делает актуальной задачу отыскания соответствия между подзадачами и процессорами, которое характеризуется минимальным временем обмена данными и позволяет достичь лучшего масштабирования ВС с ростом числа процессоров. Длинные составные и перекрывающиеся маршруты транзитной передачи данных приводят к возрастанию коммуникационных задержек, что существенно снижает реальную производительность ВС (до 50% от пиковой и более) и приводит к простою процессоров, ожидающих окончания обмена данными.

Для выхода из создавшегося положения известны и с успехом развиваются различные подходы для эвристического планирования размещения подпрограмм, сводящие задачу достижения максимальной производительности ВС к задаче минимизации величины коммуникационной задержки, при этом различные подходы характеризуются как применением различных эвристик, так и различной степенью близости достигаемой реальной производительности по отношению к пиковой. В данной статье показано, что применение различных подходов к оценке коммуникационных задержек в сильносвязных задачах на примере задачи гравитационного взаимодействия N тел характеризуется достижением различной реальной производительности ВС.

Для оценки величины коммуникационной задержки при планировании размещения подпрограмм в работе [1] предложен минимаксиминный показатель, заключающийся в вычислении для каждой пары процессоров минимальной суммарной задержки, что соответствует выбору наименее загруженного пути между двумя процессорами при последующей маршрутизации. После определения минимальных суммарных задержек для всех пар процессоров из них выбирается максимальная, которая лимитирует время обменов данными между процессорами и подлежит минимизации. Так как данный метод вычисления величины задержки оценивает худший случай возможных перекрытий каналов передачи данных, то после маршрутизации задержка не увеличивается больше значения, полученного данным методом.

Известным конкурирующим подходом [2] является минимаксный показатель коммуникационной задержки, который характеризует время обмена данными между выбранной парой процессоров без учета перекрытий (наложений) каналов передачи данных, возникающих при одновременном обмене данными для группы пар процессоров. Наложение маршрутов передачи данных увеличивает время межпроцессорного обмена и снижает реальную производительность мультипроцессора при решении сильносвязных задач, что не учитывается при минимизации минимаксного показателя.

В качестве объекта для исследования выбрана сильносвязная задача гравитационного взаимодействия N тел, так как минимизация коммуникационной задержки наиболее актуальна для данного класса задач. Данная задача является актуальной и активно исследуется для проверки различных космогонических гипо-

тез (например, образования протопланетных дисков по Канту-Лапласу), моделирования динамики планетных систем и звезд в шаровых скоплениях, моделирования распределения и динамики объектов в поясе астероидов, кольцах Сатурна, поясе Койпера и облаке Оорта, моделирования распределения темной материи вокруг Млечного пути и в масштабах Вселенной и др.

В классической постановке (Ньютон) данная задача формулируется следующим образом. В трехмерном пространстве находится N материальных точек, для которых известны массы m_i, начальные на момент времени t=0 положения $r_{i|t=0}=r_{i0}$ и скорости $v_{i|t=0}=v_{i0}$. Попарное взаимодействие материальных точек подчинено закону всемирного тяготения, а сила гравитации, действующая на каждую из материальных точек, представляет собой векторную сумму сил со стороны остальных тел. Необходимо найти положения точек для всех последующих моментов времени. Задача в данной постановке является наиболее простой в своем классе и не учитывает ряд эффектов теории относительности (Эйнштейн), при этом требуется найти ее точное решение (без применения эвристик, введения иррегулярных сил и т.п.). Аналитическое решение задачи затруднительно при $N > 2$, поэтому на практике применяется численное моделирование. Рассмотрим процесс ее решения с использованием постоянного шага по времени Δt без его адаптивной корректировки, при этом время одной итерации моделирования характеризуется асимптотикой $O\left(N^2\right)$, что является серьезным ограничением при моделировании динамики систем из сотен тысяч тел и более.

Численное решение данной задачи выполняется посредством расчёта приращений для скоростей и координат с использованием шага по времени Δt:

$$\vec{v}^{(t)} = \vec{v}^{(t-1)} + \vec{a}^{(t)}\Delta t,$$

$$\vec{x}^{(t)} = \vec{x}^{(t-1)} + \vec{v}^{(t)}\Delta t,$$

где $\vec{v}^{(t)}$ – скорость тела в момент времени t;

$\vec{v}^{(t-1)}$ – скорость тела в предшествующий момент времени t–1;

$\vec{x}^{(t)}$ – координата тела в момент времени t;

$\vec{a}^{(t)}$ – ускорение тела в момент времени t, рассчитываемое по второму закону Ньютона:

$$\vec{a}^{(t)} = \frac{\vec{F}}{m},$$

где $\vec{F}$ – равнодействующая сил, действующих на тело, рассчитываемая как векторная сумма сил притяжения между данным телом и остальными телами. При этом сила притяжения между i-м и j-м телом рассчитывается по закону всемирного тяготения:

$$\vec{F}_{ij} = G\frac{m_i m_j}{r^3}\vec{r},$$

где G – гравитационная постоянная;

r – расстояние между i-м и j-м телом, рассчитываемое по формуле

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2},$$

где $\vec{x}_i = \left(x_i, y_i, z_i\right)$ – вектор координат i-го тела в 3-мерном пространстве.

На основании описанного выше алгоритм расчёта очередного вектора координат i-го тела с указанием требуемого числа операций с плавающей точкой (FLOP) состоит из следующих действий:

1) расчёт расстояния между парой тел (выполняется параллельно для текущего i-го тела и всех остальных тел) – 9 FLOP;

2) расчёт сил притяжения между данным телом и остальными телами

(аналогично п. 1 выполняется параллельно) – 4 FLOP;

3) расчёт равнодействующей сил, действующих на тело (совмещено по времени с п. 2);

4) расчёт ускорения тела – 1 FLOP;

5) расчёт скорости тела в момент времени t – 2 FLOP;

6) расчёт координат тела в момент времени t – 6 FLOP.

Схема последовательно-параллельного решения задачи с разбиением на подзадачи приведена на рис. 1, при этом в составе каждой подзадачи производится вычисление физических характеристик одного тела, а общее число подзадач составляет N.

Представляется возможным параллельное решение данной задачи в матричном мультипроцессоре, при котором каждый процессор выполняет цикл расчёта координат одного тела и передаёт результат всем остальным процессорам, выполняющим расчёты для других тел, после чего производится переход к следующей итерации. В соответствии с изложенным выше граф взаимодействия подзадач для рассмотренного параллельного алгоритма решения задачи является полносвязным, а весами дуг являются объёмы данных, необходимые для следующей итерации.

С учетом специфики разбиения на подзадачи между итерациями моделирования требуется обмен векторами координат ($3\times 8 = 24$ байт для вещественных чисел двойной точности), в то время как векторы скоростей тел хранятся в памяти процессоров и не передаются между процессорами, снижая нагрузку на коммуникационную подсистему.

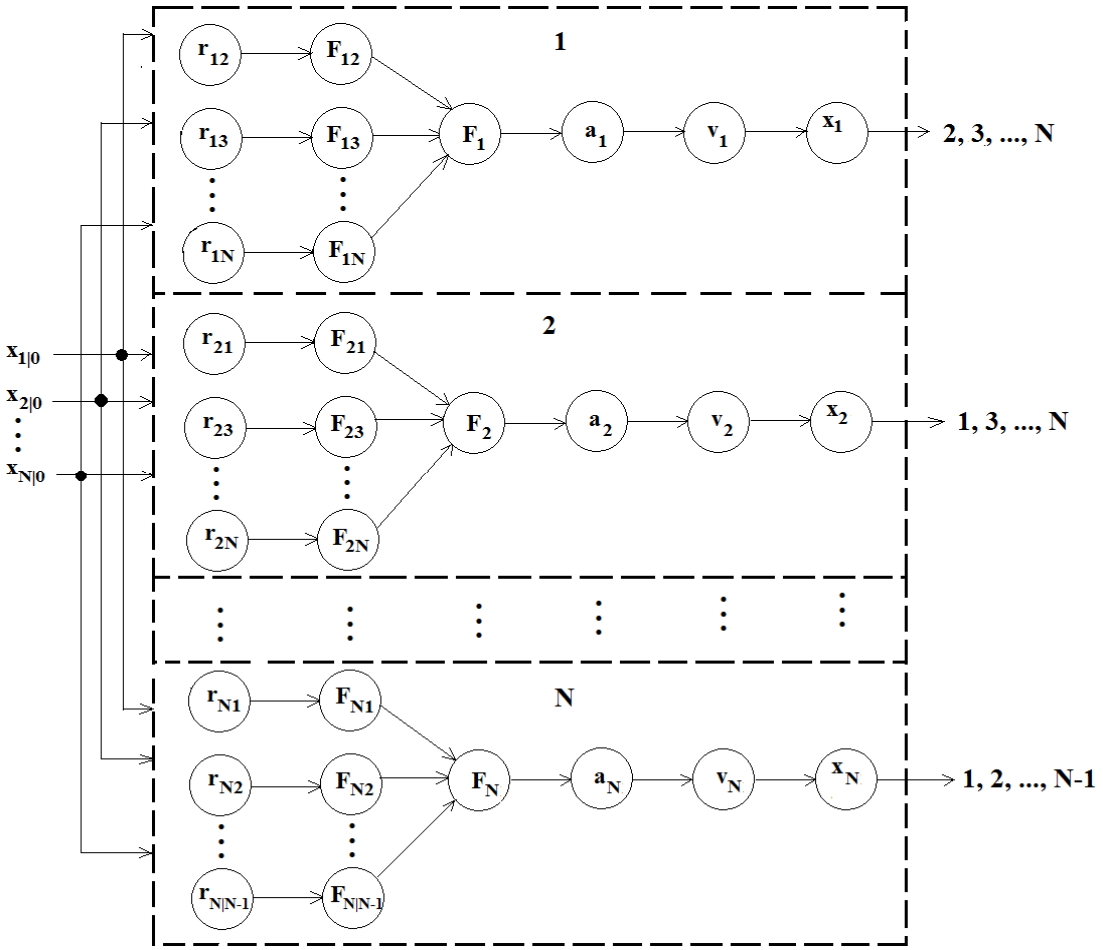


Рис. 1. Схема параллельного решения задачи N тел

На примере описанной выше задачи произведена оценка реальной производительности матричного мультипроцессора Tile64Pro [3] в конфигурации 8×8 процессоров с применением средств планирования размещения, позволяющих оптимизировать задержку в линиях связи между процессорами. Для этого будем производить оценку реальной производительности мультипроцессора как

$$P = \frac{V_{\text{выч}}}{T_{\text{выч}} + T_{\text{ком}}},$$

где $V_{\text{выч}}$ – объём вычислений (необходимое число операций с плавающей точкой, FLOP);

$T_{\text{выч}}$ – время вычислений, с;

$T_{\text{ком}}$ – время передачи данных, которое оценивается как максимальное время передачи данных в любой паре процессоров и зависит от результата планирования размещения подпрограмм.

В соответствии с алгоритмом расчёта координат тел объём вычислений определяется как

$$\begin{aligned} V_{выч} &= 9(N-1)N + 4(N-1)N + \\ &+ (N-1)N + N + 2N + 6N = \\ &= 14N^2 - 5N. \end{aligned} \quad (1)$$

Так как мультипроцессор является однородной вычислительной системой, в которой каждое процессорное ядро выполняет цикл расчёта координат для одного тела, интегральное время моделирования определяется произведением времени выполнения одного цикла расчёта координат на число итераций моделирования. В соответствии с характеристиками процессора Tile64Pro максимальная частота ядер составляет 1 ГГц, поэтому время выполнения цикла расчёта координат в наносекундах равно количеству тактов на выполнение операций с плавающей точкой, составляющих цикл:

$$\begin{aligned} T_{\text{выч}} &= \frac{(N-1)c_1 + (N-1)(c_2 + c_3)}{10^9} + \\ &= \frac{+c_4 + c_5 + 3c_6}{10^9}, \end{aligned} \quad (2)$$

где c_1=54 такта – вычисление расстояния между телами;

c_2+c_3 = 116 тактов – вычисление силы притяжения между парой тел и модификация равнодействующей;

c_4 = 80 тактов – вычисление ускорения тела;

c_5 = 14 тактов – вычисление скорости тела;

c_6 = 14 тактов – вычисление координаты тела.

Время передачи данных между процессорами при условии, что все обмены данными можно выполнять одновременно, лимитируется худшей попарной задержкой между процессорами, вычисляемой в результате выполнения алгоритма планирования размещения. При последовательном побайтном обмене время передачи данных между парой процессоров без учёта перекрытий маршрутов передачи данных определяется как

$$m \cdot d \cdot c,$$

где m – количество передаваемых байтов;

d – количество последовательно соединённых линков (англ. hop) между данной парой процессоров;

c – постоянный сомножитель, равный времени передачи одного байта по одному линку.

Возможные перекрытия маршрутов, требующие суммирования времён передачи данных, учитываются в минимаксиминном показателе, как описано выше. При этом время $T_{\text{ком}}$ определяется как максимальное время передачи данных в любой паре процессоров, вычисленное по минимаксиминному показателю с использованием оценочного значения c=10 нс, учитывающего возможности коммуникационной подсистемы мультипроцессора Tile64Pro.

Так как при полной загрузке мультипроцессора в выбранной конфигурации 8×8 (задача 64 тел) и одинаковых объёмах передаваемых данных оптимизация размещения подпрограмм с целью

уменьшения задержки в линиях связи между процессорами не представляется возможной ввиду равноправности различных вариантов размещения, в качестве тестового примера выбрано заполнение ¼ мультипроцессора, что соответствует решению задачи 16 тел.

Представляется возможным теоретически оценить пиковую производительность мультипроцессора при решении поставленной задачи, если принять $T_{ком} \to 0$ (коммуникационная подсистема работает мгновенно и не оказывает влияния на интегральное время обработки данных, лимитируемое только временем вычислений). В данном случае с использованием формул (1) и (2) получаем, что $V_{выч}$ = 3504 FLOP, а $T_{выч}$ = 2686 нс.

Тогда пиковая производительность мультипроцессора в указанной задаче

$$P_{peak} = \frac{V_{выч}}{T_{выч}} = 1{,}3 \text{ GFLOP/s}.$$

Алгоритм планирования размещения подпрограмм выполнен с применением минимаксиминного [1] и минимаксного показателей [2] с целью сравнения эффективности их применения.

На рис. 2, *а* показано начальное размещение 16 подпрограмм расчёта координат тел, при котором максимальное расстояние между процессорами, обрабатывающими данные подпрограммы, совпадает с Манхэттенской нормой и составляет 6 линков (выделены жирным). Данное размещение является оптимальным с точки зрения максимального расстояния между процессорами, однако приводит к резкому возрастанию коммуникационной задержки при маршрутизации по кратчайшим путям, вызванному полносвязностью графа обмена данными между подпрограммами и значительными перекрытиями каналов передачи данных. При этом все кратчайшие пути между занятыми процессорами лежат в пределах выделенного на рис. 2, *а* блока.

С целью улучшения исходного решения было проведено моделирование работы алгоритмов с использованием указанных выше минимаксного и минимаксминного показателей оценки коммуникационной задержки и получены следующие результаты. Максимальное время обмена данными в любой паре процессоров для начального размещения (рис. 2, *а*) по минимаксному показателю и в соответствии с описанным выше способом вычисления времени передачи данных между двумя процессорами без учета перекрытия каналов составляет 1920 нс, тогда как в действительности имеют место множественные перекрытия, и худшее время обмена составляет 13440 нс. Данное время соответствует обмену между парой процессоров 1–28.

Между двумя процессорами, расположенными на одной горизонтали или одной вертикали процессорной матрицы, существует только один кратчайший путь, что позволяет оценить минимальное количество перекрытий на любом кратчайшем пути при описанном выше условии маршрутизации.

Рассмотрим вариант кратчайшего пути между 1 и 28 процессорами:

1-2-3-4-12-20-28.

В приведенном выше варианте кратчайшего пути можно выделить следующие кратчайшие каналы меньшей длины, имеющие только один вариант кратчайшего пути (табл.).

Перечень кратчайших каналов, имеющих только один вариант кратчайшего пути

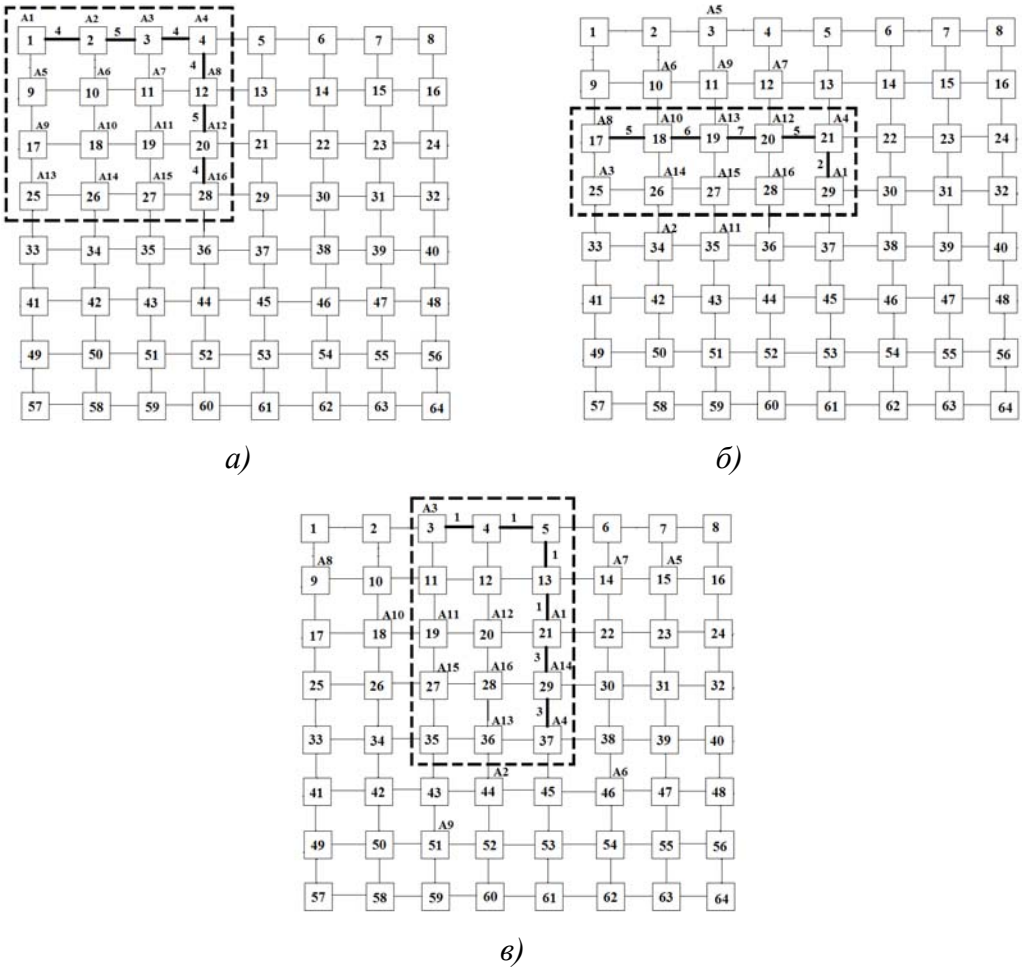
Пара процессоров одной горизонтали/ вертикали	Длина канала	Пары процессоров на разных горизонталях и вертикалях	Длина канала
1-2	1	1-12	4
1-3	2	1-20	5
1-4	3	2-12	3

Окончание табл.

Пара процессоров одной горизонтали/ вертикали	Длина канала	Пары процессоров на разных горизонталях и вертикалях	Длина канала
2-3	1	2-20	4
2-4	2	2-28	5
3-4	1	3-12	2
4-12	1	3-20	3
4-20	2	3-28	4
4-28	3		
12-20	1		
12-28	2		
20-28	1		

В соответствии с таблицей рассчитаем минимально возможную суммарную задержку данного кратчайшего пути с учётом однонаправленного обмена данными между 1 и 28 процессорами, кратчайшее расстояние между которыми равно 6:

$$T_{SUM} = (24\cdot1\cdot6+24\cdot2\cdot4+24\cdot3\cdot2+24\cdot6\cdot1)\cdot10 = 24\cdot10\cdot(6+8+6+6) = 6240 \text{ нс}.$$



а) *б)* *в)*

Рис. 2. Начальное размещение задачи 16 тел в матричном мультипроцессоре конфигурации 8×8 (*а*), вариант субоптимального размещения с использованием минимаксного (*б*) и минимаксиминного (*в*) показателей

На рис. 2, *а* выделен описанный кратчайший путь между процессорами 1 и 28 с указанием количества накладывающихся на каждый межпроцессорный канал обменов данными.

Для получения худшего случая коммуникационной задержки допустим, что приведенные в таблице однонаправленные обмены данными между процессорами, расположенными на разных горизонталях и вертикалях, будут проложены по указанному выше кратчайшему пути, и прибавим суммарную задержку для них к минимально возможной:

$$T_{\mathrm{SUM}} = \\ = 6240+(24\cdot2\cdot1+24\cdot3\cdot2+24\cdot4\cdot3+24\cdot5\cdot2)\cdot10 = \\ = 6240+240\cdot(2+6+12+10) = 13440 \text{ нс}.$$

На рис. 2, *б* показан вариант субоптимального размещения, полученный с применением минимаксного показателя для оценки качества размещения, на рис. 2, *в* – с применением минимаксиминного показателя.

Так как ни один из полученных вариантов не гарантирует наличия в любой паре взаимодействующих процессоров хотя бы одного кратчайшего пути, освобождённого от перекрытий, целесообразно оценивать коммуникационную задержку в полученных субоптимальных вариантах размещения по минимаксиминному показателю.

В соответствии с описанным выше получено максимальное время передачи данных для рис. 2, *б* – 8400 нс для процессоров 17 – 29 и для рис. 2, *в* – 4560 нс для процессоров 3 – 37.

Аналогично первоначальному размещению оценим минимально возможную суммарную задержку для кратчайших путей описанных выше пар процессоров. Кратчайшие пути между процессорами 17 и 29 лежат в пределах выделенного на рис. 2, *б* блока.

Из рис. 2, *б* следует, что в полученном с применением минимаксного критерия варианте размещения ни один процессор из выделенного блока не остался свободным, поэтому при полносвязности обмена данными между подпрограммами любой кратчайший путь между процессорами 17 и 29 может иметь максимальную степень перекрытий.

Рассмотрим вариант кратчайшего пути 17-18-19-20-21-29 длиной 5. В нём можно выделить пары процессоров, лежащие на одной горизонтали или одной вертикали: 17-18, 17-19, 17-20, 17-21, 18-19, 18-20, 18-21, 19-20, 19-21, 20-21, 21-29.

Рассчитаем минимально возможную суммарную задержку при таком списке фактических перекрытий в соответствии с длинами вышеуказанных каналов передачи данных:

$$T_{\mathrm{SUM}} = \\ = (24\cdot1\cdot5+24\cdot2\cdot3+24\cdot3\cdot2+24\cdot4\cdot1+24\cdot5\cdot1)\cdot10 = \\ = 6240 \text{ нс}.$$

Аналогично рис. 2, *а* на рис. 2, *б* показано минимальное количество перекрывающихся обменов данными на межпроцессорных каналах выделенного пути.

Полученное минимально возможное значение суммарной задержки совпадает с аналогичным значением для начального размещения, поэтому размещение, полученное с применением минимаксного критерия, гарантирует уменьшение только худшего случая перекрытий кратчайших каналов передачи данных.

Кратчайшие пути между процессорами 3 и 37, для которых при имитационном моделировании получено максимальное время передачи данных, лежат в пределах выделенного на рис. 2, *в* блока. Наименьшее количество загруженных процессоров – 4 – входит в кратчайшие пути 3-4-5-13-21-29-37, 3-4-12-13-21-29-37, 3-11-12-13-21-29-37, поэтому вероятность того, что данные пути окажутся наименее загруженными, наиболее высокая.

В любом из описанных выше вариантов кратчайших маршрутов занятыми являются только процессоры 3, 21, 29 и 37, из которых процессоры 21, 29 и 37 лежат на одной вертикали.

Рассчитаем минимально возможную суммарную задержку между 3 и 37 про-

цессорами с учётом длин перекрывающихся каналов 3-37, 21-29, 21-37 и 29-37:

$$T_{SUM} = (24\cdot6\cdot1+24\cdot1\cdot2+24\cdot2\cdot1)\cdot10 = \\ = 240\cdot(6+2+2) = 2400 \text{ нс}.$$

Аналогично рис. 2, *а* и *б*, на рис. 2, *в* показано минимальное количество перекрывающихся обменов данными на межпроцессорных каналах выделенного пути.

Рассчитаем худший случай перекрытий пути 3-4-5-13-21-29-37 при допущении, что все однонаправленные обмены между 3, 21, 29 и 37 процессорами будут проложены по данному пути. Тогда фактический список перекрытий данного пути будет следующим:

3-21, 3-29, 3-37, 21-29, 21-37, 29-37 и

$$T_{SUM} = (24\cdot4+24\cdot5+24\cdot6+24\cdot1\cdot2+24\cdot2)\cdot10 = \\ = 240\cdot(4+5+6+2+2) = 4560 \text{ нс}.$$

Так как оба полученных результата меньше минимально возможной суммарной задержки, полученной для пары процессоров 17-29 в варианте размещения, полученном с применением минимаксного критерия, можно сделать вывод о целесообразности применения минимаксиминного критерия при планировании размещения параллельных подпрограмм в матричных мультипроцессорах.

На основании полученных значений коммуникационной задержки для худших случаев перекрытий получена минимальная оценка реальной производительности мультипроцессора: при использовании минимаксного критерия – 0,32 GFLOP/s, при использовании минимаксиминного критерия – 0,48 GFLOP/s. Данные результаты позволяют сделать вывод, что применение минимаксиминного показателя позволяет получить на 50% большую реальную производительность по сравнению с применением минимаксного показателя в рассматриваемой задаче.

Список литературы

1. Бобынцев Д.О., Борзов Д.Б. Минимаксиминный критерий оценки качества размещения параллельных подпрограмм в матричных мультиконтроллерах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». 2012. № 2. Ч. 1. С. 27–31.

2. Борзов Д.Б., Марят Б.И. Методика планирования размещения задач в матрично-торроидальных базовых блоках кластерных мультиконтроллеров. Деп. в ВИНИТИ 18.07.06 г., № 961-В 2006.

3. Калачёв А. Высокопроизводительные многоядерные процессоры для встраиваемых систем // Компоненты и технологии. 2010. № 2. С. 92–102.

Получено 11.11.13

D.O. Bobyntsev, Senior Lecturer, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: daniel8728@yandex.ru)

E.I. Vatutin, Candidate of Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: evatutin@rambler.ru)

V.S. Titov, Doctor of Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: titov-kstu@rambler.ru)

ESTIMATION OF MATRIX MULTIPROCESSOR PERFORMANCE USING PARALLEL ALGORITHM FOR THE N-BODY PROBLEM SOLVING

The partitioning of N-body problem to the group of parallel tasks is showed. The peak and real performances estimation for parallel computing system implementing parallel N-body problem solving algorithm using 8×8 matrix multiprocessor is given. Results of computing experiment with of scheduling parallel tasks using two different criteria of communication delay estimation is obtained.

Key words: *parallel tasks scheduling, matrix multiprocessors, N-body problem, communication delay, MinMax criterion, MinMaxMin criterion.*

УДК 004.912

С.Н. Михайлов, канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск) (e-mail: tk_kursk@mail.ru).

С.С. Хотынюк, канд. физ.-мат. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск) (e-mail: sergeifmf@mail.ru)

А.М. Потапенко, канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск) (e-mail: pam1952@mail.ru)

ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРАКТИВНОГО ВЫЯВЛЕНИЯ СМЫСЛОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ТЕКСТОВ В ЦЕЛЯХ ОРГАНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В статье рассматриваются две основные технологии визуализации результатов поиска, осуществляемого поисковыми системами в сети Интернет: традиционного и с построением понятийного графа. Рассматриваются особенности построения понятийного графа текста. Производится анализ, сравнение данных технологий, предложено совместное применение рассмотренных технологий при организации информационно-аналитического обеспечения научных исследований вуза.

Ключевые слова: *инфологическая система, информационно-аналитическое обеспечение, информационно-поисковая система, семантическое содержание текстов.*

***

Проведение научного исследования предполагает составление тематической антологии – сборника научных текстов, относящихся к данной тематике. Данный этап очень важен в начале исследования, поскольку на нем происходит составление тезаурусов и глоссариев – тематических словарей. Однако построение антологии требует значительных временных ресурсов – научный поиск может занимать до 30% от полного времени проведения исследования. При этом реализация принципа упреждающего обеспечения исследовательских коллективов и подразделений требуемой тематической информацией неразрывно связана с формированием антологии [1].

Популярные поисковые системы (Google, Yahoo и т.п.) обладают рядом недостатков. В частности, количество ссылок, предлагаемых пользователю в качестве ответа на запрос, зачастую крайне велико (до нескольких миллионов). Кроме того, эти ссылки могут относиться к разнообразным категориям (энциклопедические сведения о предмете запроса, ссылки на интернет-магазины, мнения неспециалистов, выложенные на форумах, и т.д.) и располагаться хаотично для обзора. Наконец, релевантность (адекватность) предлагаемых поисковой системой документов запросу зачастую крайне низка, а сама поисковая система зачастую становится источником поискового спама [2]. Причины данной проблематики заложены в алгоритмах, по которым строятся многие поисковые системы сети Интернет. В свою очередь, технологии интерактивного выявления смыслового содержания текстов позволяют целенаправленно выделять наиболее релевантные запросу пользователя документы и отсеивать комбинации рекламных объявлений с наборами несвязных фрагментов различных текстов.

Подавляющее большинство поисковых систем осуществляет индексацию текста на основе многоагентных технологий. Результаты индексации хранятся в базе данных системы, и информационный поиск производится именно по этим данным. После индексации система осуществляет кластеризацию документов – выявление групп семантически похожих документов среди заданного фиксированного множества документов, причем данные группы формируются только на основе попарной схожести описаний документов, и никакие характеристики этих групп не задаются заранее.

Пользователь, осуществляющий поиск в Сети, посещает страницу поисковой системы и заполняет форму, детализирующую информацию, которая ему необ-

ходима (ключевые слова, даты и другие критерии). Критерии в форме поиска должны соответствовать критериям, используемым агентами при индексации информации, которую они нашли при перемещении по Сети. Поисковая машина определяет в базе данных страницы, соответствующие предмету запроса, основываясь на информации, указанной в заполненной форме, и формирует xml-файл, содержащий построенный ответ на запрос в виде списка соответствующих ссылок. Чтобы определить порядок, в котором список документов будет показан, база данных применяет один из алгоритмов ранжирования. В идеальном случае документы, наиболее соответствующие пользовательскому запросу, будут помещены первыми в списке. Пользователь выбирает ссылку, представляющую для него наибольший интерес, переходит по ней, в результате документ запрашивается у того сервера, на котором он находится.

Многие современные популярные поисковые системы определяют релевантность документов и запросов синтаксическим методом, т.е. путем вычисления встречаемости ключевых слов в документе, без учета их семантических (смысловых) особенностей. Системы, основанные на таком подходе, обладают рядом недостатков, описанных выше.

В последние годы большое внимание стало уделяться поиску информации на основе работы с семантикой. Методы семантического поиска так же известны, как смысловой поиск или поиск по смыслу текстов. В системах, использующих данный метод, релевантными результатами являются документы, удовлетворяющие информационным потребностям пользователей, и релевантность оценивается по смыслу текстов [3].

Главным недостатком подходов семантического поиска по сравнению с традиционными (синтаксическими) подходами поиска является тот факт, что алгоритмы обработки смысла текстов зависят от особенностей конкретного анализируемого естественного языка, т.е. требуется создание специальных алгоритмов для разных естественных языков. При этом для каждого естественного языка должны учитываться его синтаксические и семантические особенности, отношения между словами и т.п. В связи с этим реализация подходов семантического поиска в многоязычных системах является достаточно сложной и трудоемкой.

В настоящее время основными используемыми системами информационного поиска являются представители традиционных подходов поиска по ключевым словам (Google, Bing, Yahoo и т.д.). Это говорит о несомненной эффективности таких подходов для решения данной задачи. Однако даже крупнейшим компаниям, предоставляющим сервисы информационного поиска, трудно отказаться от огромных возможностей, которые могут дать семантические поисковые системы. Примерами применения семантических технологий в глобальных масштабах можно считать проекты SearchMonkey от Yahoo, RichSnippets от Google, или BingPowerset. Такие системы подтверждают тот факт, что семантический метод является перспективным направлением развития поиска информации.

Потребности научного сообщества при осуществлении научного информационного поиска поисковыми системами, использующими даже самые современные методы поиска, удовлетворяются далеко не сполна. Дело в том, что информационный поиск – в широком смысле – последовательность операций, направленных на предоставление информации заинтересованным лицам. Работа с информацией предполагает не только ее сохранение, но и обработку. В связи с этим одним из путей реализации информационного поиска и фильтрации поискового спама является применение информационно-логических (инфологических) систем. Инфологические системы не только выдают по требованию ранее введенную в них информацию, но выполняют, если это необходимо, логическую переработку этой информации с целью ее преобразо-

вания и получения новой информации, которая в явном виде в систему не вводилась.

В инфологических информационных системах реализуются принципы адекватного восприятия коммуникаций как согласованного процесса между средой и интерпретированным текстологическим содержанием. Для коммуникативного акта в меньшей степени важна грамматика и прагматика текста. Онтология предметной области проявляется не в словах, а в связях между понятиями. Словом в любой онтологии могут служить любые идентификаторы, а способ их связи определяется структурой языка.

Формализация многих предметных областей, а также построение естественно-языковых интерфейсов позволили выявить механизмы, основанные на параметрах типа частоты использования некоторого термина в тексте или его постоянного использования совместно с другим термином, позволяющие производить переупорядочение связей и выделение иерархических уровней, тем самым формировать тезаурус предметной области. Характеристикой этих связей между терминами является возможность их изменения при развитии предметных областей. Это означает перераспределение отношений и создание новых понятий или изменений смысла уже имеющихся терминов [4]. В связи с бурным развитием областей знания глоссарий должен быть оперативно и динамично обновляемым.

Визуальное представление полученного глоссария требует наличия визуального интерфейса, являющегося связующим звеном между результатами работы инфологической системы и знаниями пользователя.

Дополнение информационной системы визуальным интерфейсом формирует интерактивную среду для быстрого ознакомления с предметной областью.

Глоссарием в рамках инфологической системы является множество терминов, являющееся базисом предметной области, в котором для каждого элемента построены его связи с другими терминами предметной области [4].

Основными этапами выявления семантического содержания текстов в инфологической системе являются: нормализация текста (путем приведения всех его слов в базовую форму), структурная декомпозиция текста, которая включает в себя построение визуального графа текста, а также выявления тезауруса и глоссария текста.

На рисунке 1 приведен пример визуального графа текста.

Рис. 1. Визуальный граф текста

Визуальный граф отражает понятийную иерархию текста и может быть использован для оценки логической связности текстов в принятой антологии, а также позволяет воспринимать содержимое текста не последовательно, а одномоментно. Это обеспечивает восприятие пользователем структуры связей предметной области в комплексе, притом именно в том, который соответствует связям, сформированным специалистом или разработчиком системы, а не формировать его самостоятельно при прочтении груды технической документации.

Построение описанной системы анализа текстов позволяет реализовать ассоциативный поиск текстов как основную функцию инфологической системы.

Кроме наглядного представления связей предложенный подход позволяет оценивать качество текстов антологии. В идеале в графе не должно быть распавшихся (бессвязных) областей, все понятия должны быть связаны друг с другом. Критерием качества логической связности документа является отношение количества распавшихся областей к общему количеству слов в документе. Этот подход может быть положен в основу технологии интерактивного анализа смыслового соответствия нового документа и сформированной антологии. Критерием соответствия здесь может выступать наличие отдельного терминологического ядра, не соответствующего терминам антологии.

На рисунке 2 показан вариант представления визуального графа антологии и нового документа, смысловое содержание которого не соответствует семантике антологии.

Для случая смыслового соответствия содержания нового документа и имеющейся антологии визуальный граф, полученный в результате инфологической обработки этих двух текстов, не будет распадаться на отдельные терминологические ядра даже при увеличении масштабного уровня представления понятийной иерархии (рис. 3).

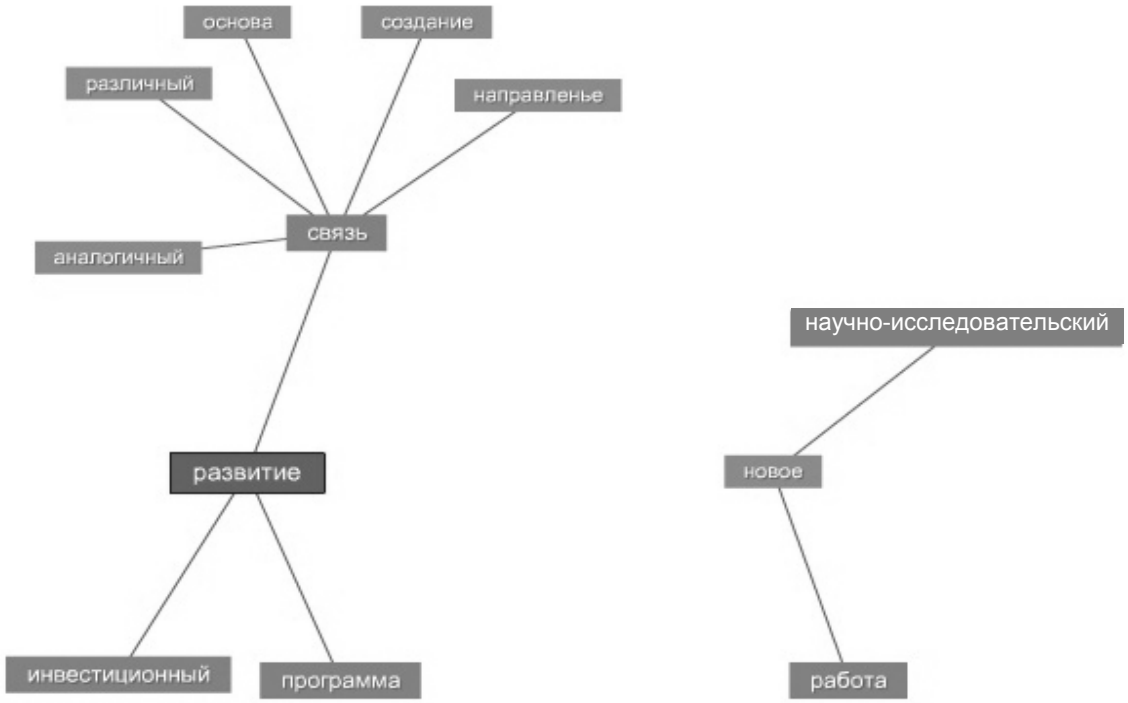
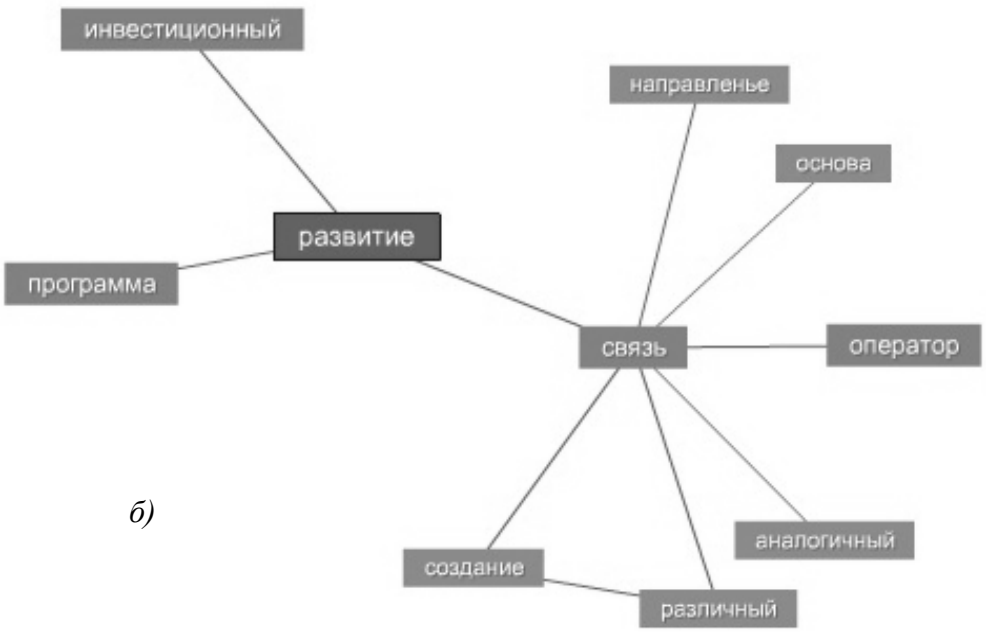
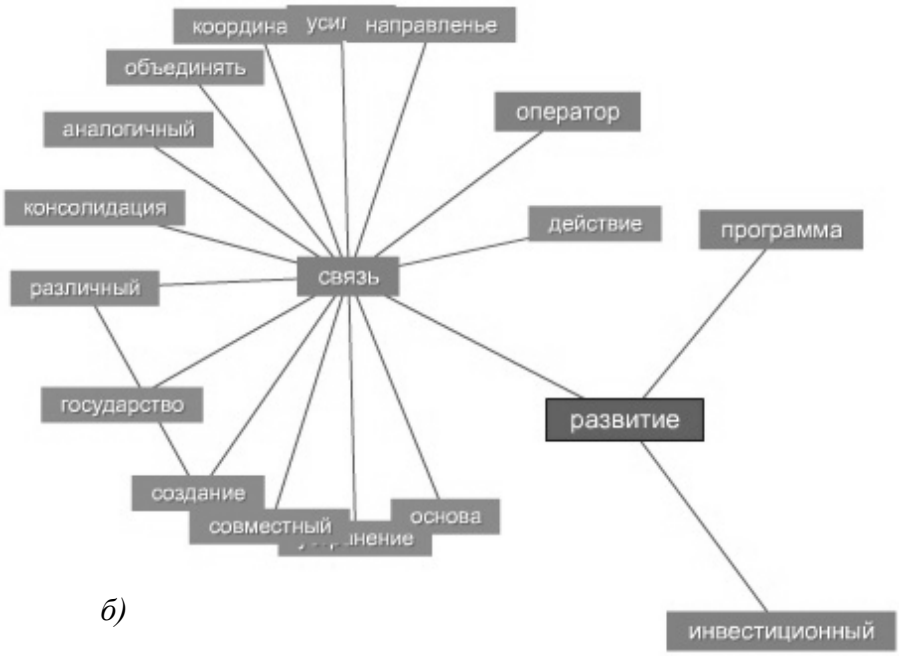


Рис. 2. Наличие отдельного терминологического ядра в визуальном графе антологии и нового документа



б)



б)

Рис. 3. Визуальный граф соответствия смыслового содержания антологии и нового документа на разных масштабных уровнях: *а* – увеличенный; *б* – подробный

Другим показателем качества является скорость развития текста – величина, показывающая скорость введения новых терминов и понятий в тексте [4].

Сегодня становится очевидным, что совместный прогресс телекоммуникационных каналов связи и компьютерная обработка, систематизация и представление информации дают возможность создать новый научный подход, а также эффективный инструмент систематизации знаний, который был реализован в виде интернет-проекта VisualWorld.ru [5]. Инфологический механизм, реализуемый сервисом VisualWorld.ru, опирается на потребности человека, исходя из задач систематизации знаний в той форме, которая удобна человеку. Проект VisualWorld.ru представляет развитый интерактивный интерфейс для получения

«выборки знаний» из актуального набора документов, доступных в Интернете. Принцип работы системы основан на инфологическом подходе к исследованию текущего состояния информационных ресурсов (Интернет, базы данныхи др.) и его востребованности различными социальными группами. Предполагается, что собранная информация поможет при решении существующих проблем и позволит предотвратить информационный хаос.

Таким образом, можно выделить две существующие технологии интерактивного выявления смыслового содержания текстов. Первая – традиционная, в которой результат поиска представляется в виде списка ссылок на документы. Вторая – визуальная, в которой результат поиска представляется в виде понятийного графа, позволяющего пользователю принимать решение о соответствии смыслового содержания текста.

В ходе организации информационно-аналитического обеспечения научных исследований заслуживает внимания вариант совместного использования данных технологий: предварительный (быстрый) поиск посредством традиционной технологии и уточненный – с построением понятийного графа с целью выявления смыслового содержания текста.

Список литературы

1. Михайлов С.Н. Методика формирования архитектуры инфокоммуникационной среды информационно-аналитического обеспечения научных исследований технического вуза // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8, № 7. С. 27–29.

2. Кокорин П.П. Инфологическая система аналитического мониторинга научно-технических фондов библиотек // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7, № 4. С. 11–15.

3. Christopher D.M., Prabhaka R., Hinrich S. Introduction to information retrieval. Cambridge University press, 2008.

4. Методы построения информационно-логических систем / В.В. Александров, Н.А. Андреева, С.В. Кулешов, Н.А. Андреева. СПб.: Анатолия, 2005. 109 с.

5. Визуальный словарь [Электронный ресурс]: On-line версия. URL: http:// www. vslovar.org.ru.

Получено 11.11.13

S.N. Mikhailov, Candidate of Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: tk_kursk@mail.ru)

S.S. Hotynyuk, Candidate of Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: sergeifmf@mail.ru)

A.M. Potapenko, Candidate of Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: pam1952@mail.ru)

TECHNOLOGIES OF INTERACTIVE IDENTIFICATION THE SEMANTIC CONTENT OF THE TEXTS

There is a review of two major visualization technologies of search results, carried out by the search engines on the Internet: the traditional and with the construction of the conceptual graph in this paper. There is a review of the features of the construction of the conceptual graph text. There is the analysis and the comparison of these technologies, concludes on the possible use of technology in conducting information and analytical support research university.

Key words: *infological system, information and analytical support, information retrieval system, the semantic content of the texts.*

УДК681.3

Д.Б. Борзов, канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: borzovdb@kursknet.ru)

К.А. Гуляев, студент, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: tumbler06@mail.ru)

А.И. Башмаков, аспирант, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: bashmakov.aleksey@gmail.com)

ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ СЖАТИЯ ВИДЕОПОТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ RGB-МОДЕЛИ И ЕГО АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В данной работе рассмотрен один из подходов для кодирования видеосигнала в системе RGB, показана необходимость снижения трафика при передаче данных на большие и сверхбольшие расстояния, представлено схемотехническое решение для данного алгоритма.

Ключевые слова: *видеопоток, сжатие, трафик, модель, кодек, расстояние.*

***

В современном обществе управление различными проектами требует оперативного управления подчинёнными и подразделениями, находящимися как в близлежащих так и удаленных регионах. Одним из инструментов управления и контроля являются корпоративные видеоконференции. Используя современные технологии, каждый участник конференции в режиме реального времени может проводить беседу с сотрудниками, расположенными в любой точке планеты в различных часовых поясах. Исходя из этого разработка программно-аппаратного обеспечения для сжатия потоковых данных в режиме реального времени является одним из перспективных направлений, обусловленных развитием сети Интернет и современных линий связи [1].

Видеоконференция применяется как средство оперативного принятия решения в различных ситуациях; для сокращения командировочных расходов в территориально распределенных организациях; проведения судебных процессов с дистанционным участием осужденных, а также как один из элементов технологий телемедицины и дистанционного обучения [1].

Для общения в режиме видеоконференции абонент должен иметь терминальное устройство (кодек) видеоконференц-связи и видеотелефон или иное цифровое устройство видеозахвата. В комплекс устройств для видеоконференц-связи входит:

– центральное устройство – кодек с видеокамерой и микрофоном, обеспечивающее кодирование/декодирование аудио- и видеоинформации, захват и отображение контента;

– устройство отображения информации и воспроизведения звука.

Большую роль в видеоконференции играют каналы связи, то есть транспортная сеть передачи данных. Для подключения к каналам связи используются сетевые протоколы IP или ISDN, что позволяет передавать данные с пропускной способностью от 1536 Кбит/с до 600 Мбит/с в зависимости от пропускной способности линии связи.[2]

При кодировании видеосигнала наибольшее распространение получили различные методы сжатия с использованием словаря.

В наиболее распространенном варианте реализации словарь постепенно пополняется словами из исходного блока данных в процессе сжатия [3].

Параметром словарного метода является размер словаря [3]. Чем больше словарь, тем больше эффективность. Для неоднородных данных чрезмерно большой размер может быть вреден, так как при резком изменении типа данных словарь будет заполнен неактуальными словами. Для эффективной работы данных методов при сжатии требуется дополни-

тельная память. Существенным преимуществом словарных методов является простая и быстрая процедура распаковки. Такая особенность крайне важна, если необходим оперативный доступ к данным.

К методам сжатия с использованием словаря относятся следующие алгоритмы: LZ77/78, LZW, LZO, DEFLATE, LZMA, LZX, ROLZ [4].

Было выявлено широкое разнообразие решений по сжатию видео, однако все они используют одинаковый набор алгоритмов сжатия видео в различных вариантах [5].

Рассмотренный ниже алгоритм написан с использованием системы RGB-модели в контексте «Теории цвета». Его цель и задачи – уменьшение объема передаваемого кадра без видимого ухудшения качества изображения в режиме передачи данных в реальном времени, а также передача данных видеопотока на большие и сверхбольшие расстояния с использованием каналов связи различной пропускной способности, способность взаимодействовать с алгоритмами, составляющими стандарты высокого уровня (H.264) (для создания собственного кодека).

Для написания алгоритма авторы выбрали RGB-модель, в которой цвет кодируется 24 битами, общий объем палитры равен 2 в 24 степени, 16 777 215 цветовых оттенков [5].

Программный кодек имеет блочную структуру:

– База данных «DB_RGB» (или файл Map.txt)

– Программный блок «СЕРВЕР».

– Программный блок «КЛИЕНТ».

Программные блоки используют базу данных, в которую входят 4096 таблиц, содержащих по 4096 значений в диапазоне RGB-цвета. Каждую таблицу можно рассматривать как независимую RGB палитру, отличающуюся только смещением второго октета каждого из трех байтов (рис. 1).

Функционально каждую таблицу можно представить в виде радужного кольца, иллюстрированного на рисунке 2.

Работа программы начинается с подключения буфера обмена к видеопотоку и копирования кадра. Далее идет опрос одной из таблиц базы данных, на её основе создается ассоциативный массив в оперативной памяти, где ключ – 12-битный «усечённый» код, значение – полный, 24-битный, код. Сканирование буфера идет с шагом в 24 бита, что соответствует длине пиксела. Эти значения подвергаются обработке – удалению младших октетов каждого из трёх байтов [6].

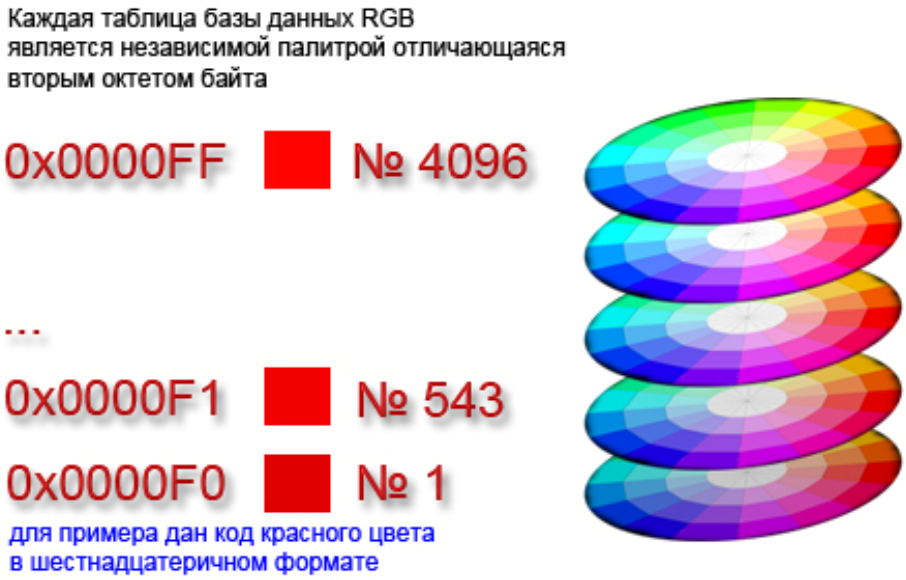


Рис. 1. Графическое представление базы данных RGB

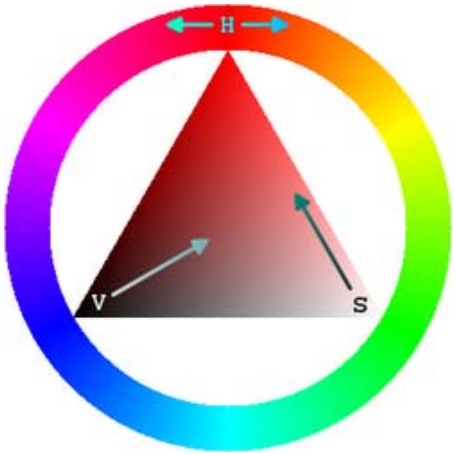


Рис. 2. Функциональное представление таблицы RGB

По предварительным расчетам, удаление младших октетов увеличивает энтропийность на порядок, что должно увеличить коэффициент сжатия, если дополнительно подключить алгоритм Хаффмана. На этом этапе сжатие проходит с коэффициентом, равным 2, без потери качества изображения. Полученный код хранится в контейнере векторов в оперативной памяти, который передается функции обрабатывающей его по алгоритму «флагового» сжатия [6]. Создаётся второй контейнер для результирующего кодирования. В него помещается результат второго этапа сжатия.

Коэффициент различный и зависит от двух параметров:

1) энтропии;

2) размера кадра.

В статье авторами предлагается следующая аппаратная реализация вышеописанного алгоритма.

Устройство для аппаратного кодирования видеосигнала (кодек) может быть спроектировано по следующей схеме:

1) на вход блока обработки сигнала подаются данные с видеокамеры в двоичном коде;

2) данные побитно поступают из памяти в матрицу, состоящую из m элементов (m = 24 в нашем случае, т.к. длина RGB-кода 3 байта);

3) по положительному фронту генератора тактовых импульсов происходит переключение регистров RG1-RG3, вследствие чего происходит разбиение кода на 3 октета, для составляющих B, G и R соответственно;

4) по уровню тактирующего сигнала переключается регистр RG4, в результате переключения которого происходит «отсечение» четырех старших разрядов каждого октета, и на выходах этого регистра формируется выходной код, который и будет передаваться по сети.

Структурная схема устройства, алгоритм которого описан выше, представлена на рисунке 3.

Для оценки сложности такого устройства посчитаем степень интеграции схемы в эквивалентных вентилях. Так как основной частью устройства являются регистры, каждый из 8-разрядных регистров RG1-RG3 содержит в себе 8 B-триггеров, следовательно, 32 элемента И в каждом регистре, а регистр RG4 включает в себя 12 D-триггеров, соответственно, число элементов И в данном регистре равно 48. Таким образом получаем 80 эквивалентных вентилей на схему.

Данное устройство является оптимальным для решения поставленной задачи, т.к. имеет достаточно простую схемотехническую реализацию и в полной мере решает поставленную задачу.

Для того чтобы убедиться в эффективности разрабатываемого алгоритма, была создана программная модель, результаты работы которой представлены на рисунке 4.

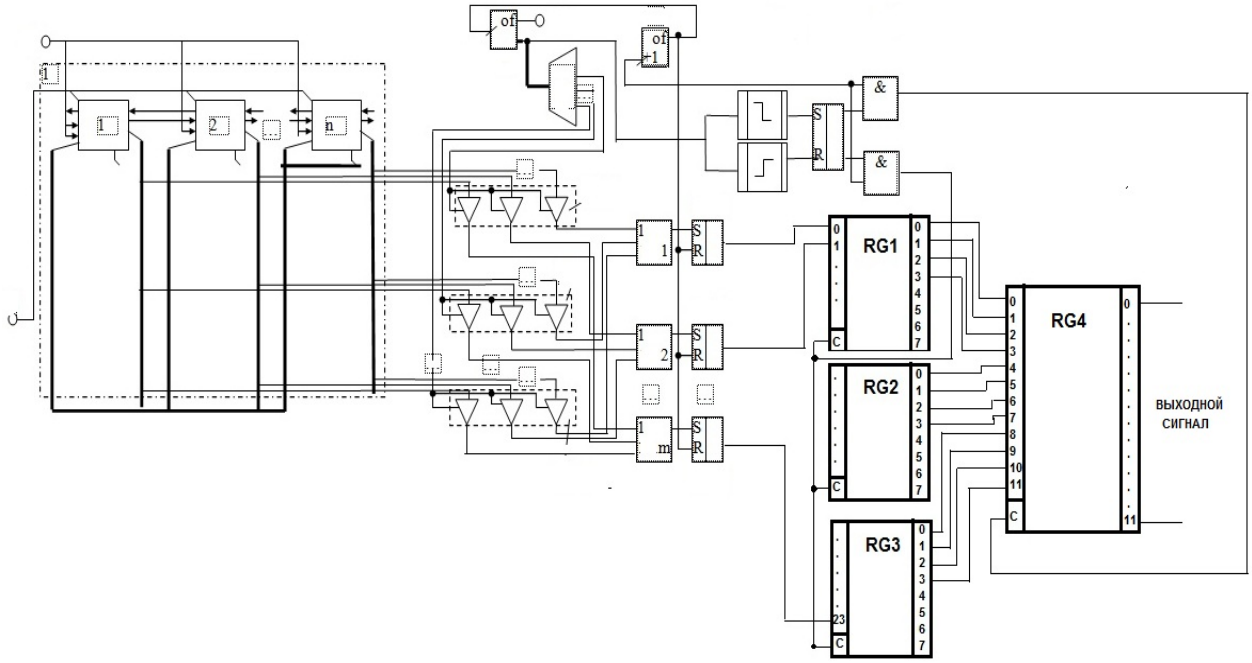


Рис. 3. Структурная схема устройства для кодирования видеосигнала

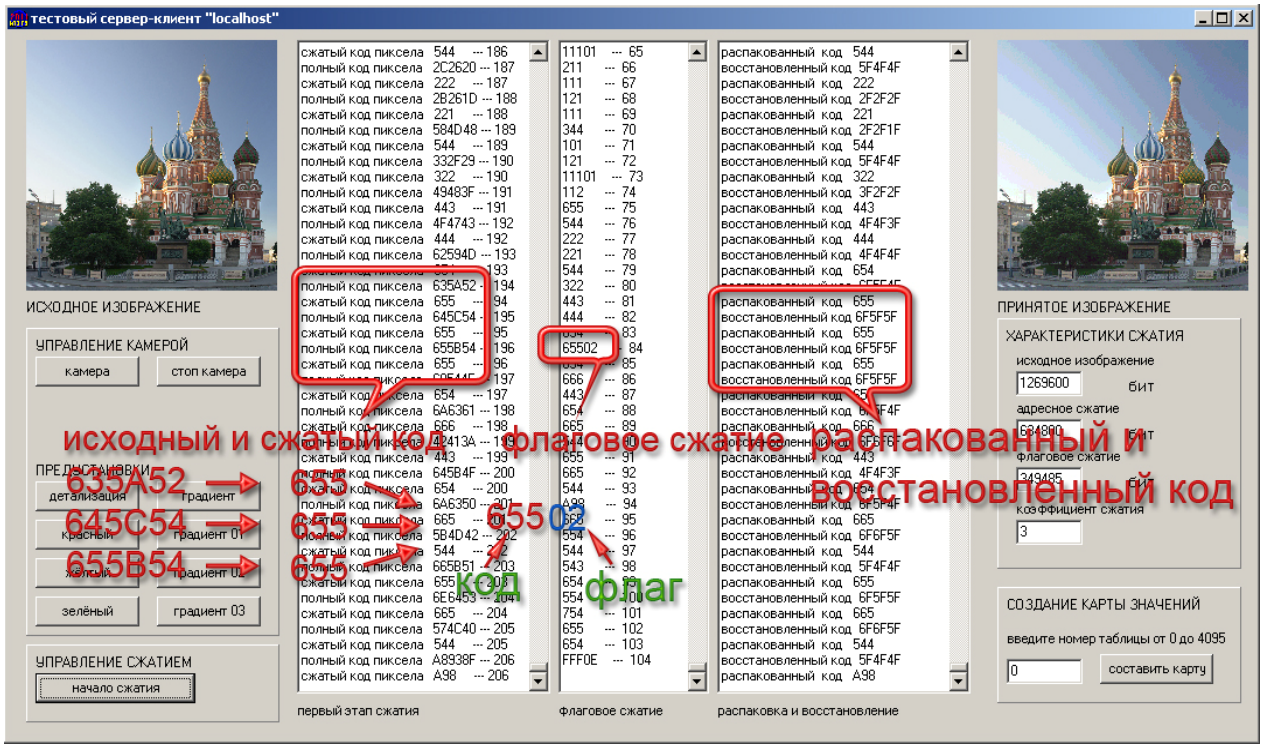


Рис. 4. Результаты работы программной модели

Из рисунка 4 видно, что видеосигнал, сжатый и распакованный по данному алгоритму, передается практически без искажений, основные потери приходятся на спектр побочных оттенков, которые практически никак не влияют на качество изображения при разрешении 1280x720 пикселей, т.е. стандарт HD видео 720p.

Недостатком кодека для кодирования видеосигнала, созданного по этой схеме, является отсутствие модуля для реализации "увеличенного сжатия" при статическом положении кадров. Данный

модуль должен аппаратно реализовать алгоритм Хаффмана, основанный на поиске повторений и создании дополнительного словаря. Такое введение позволит увеличить степень сжатия в несколько раз, в зависимости от энтропии кадров, но увеличит время. Последний показатель решено не учитывать, т.к. ожидаемые временные потери будут незначительно малыми по сравнению с увеличением степени сжатия потока данных.

Основываясь на анализе проблемной области, можно сделать вывод, что предложенный подход может являться решением рассмотренной задачи, так как позволяет сократить объем передаваемых данных до допустимого размера при передаче на большие расстояния, а так как процесс вещания происходит в реальном времени, то необходимо применение альтернативных аппаратных средств, так как существующие программно-аппаратные реализации не подходят или не способны полностью обеспечить необходимый результат.

Список литературы

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: [пер. с англ.]. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.

2. ISDN. Просто и доступно: [пер. с англ.] / Э. Титтель, С. Джеймс, Д. Пискителло, Л. Пфайфер. М.: ЛОРИ, 2000. 263 с.

3. Балашов К.Ю. Сжатие информации: анализ методов и подходов: учебное пособие для вузов. СПб.: Питер, 2004. 234 с.

4. Фомин А.А. Основы сжатия информации: учебное пособие. СПб.: Питер, 2006. 210 с.

5. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юркин. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 384 с.

6. Борзов Д.Б., Гуляев К.А. Видеоконференц-связь: общая организация, метод сжатия с использованием словаря // Инженер: студенческий научно-технический журнал. 2013. № 14. С. 83–86.

7. Борзов Д.Б., Зотов И.В., Минайлов В.В. Акселераторные средства составления плана топологии программируемых логических интегральных схем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». 2013. Ч. 2. № 2. С. 95–98.

Получено 18.11.13

D.B. Borzov, Doctor of Sciences, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: borzovdb@kursknet.ru)

K.A. Gulyaev, Student, Southwest State University (Kursk) (e-mail: tumbler06@mail.ru)

A.I. Bashmakov, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: bashmakov.aleksey@gmail.com)

GENERIC ALGORITHMS COMPRESSED VIDEO USING RGB-MODELS AND ITS HARDWARE IMPLEMENTATION

In this paper we consider one approach for video encoding system in RGB, shows the need to reduce traffic in the transmission of data on large and very large distances, presented circuit solution for the algorithm.

Key words: *video stream compression, traffic model, codec distance.*

УДК 681.5.01

В.С. Титов, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: titov-kstu@rambler.ru)

В.В. Вакун, аспирант, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: tarrkstu@yandex.ru)

А.В. Полунин, аспирант, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: tarrkstu@yandex.ru)

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Представлено автоматическое устройство обнаружения и распознавания объектов муниципального транспорта. Процесс функционирования устройства описывается разработанной математической моделью. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: *устройство обнаружения, автоматический контроль, классификация объектов.*

***

В связи с постоянным увеличением количества наземного транспорта актуальность приобретает задача автоматического контроля идентификации типов транспортных средств в городских условиях и на автомагистралях.

Для решения задачи классификации транспортных средств на автобусы, троллейбусы, микроавтобусы в реальном времени предлагается использование оптико-электронного устройства, реализующего выделение и классификацию движущегося объекта. Оптико-электронное устройство позволяет локализовать движущиеся объекты, находящиеся в зоне видимости, после чего изображение фильтруется и производится предварительное распознавание, позволяющее отделить и исключить из дальнейшей обработки объекты, не представляющие интерес в рамках текущей задачи [1].

Оптико-электронное устройство (рис. 1) включает в себя видеодатчик ВД, на который поступает видеопоток изображений, вычитатель для обнаружения движущихся объектов, бинаризатор, выполняющий уточнение границ объекта, бинаризацию и формирование векторов, описывающих границы объекта, ОЗУ эталонов (ОЗУ-Э), в котором хранятся эталонные модели объектов, сравниватель эталонов, ОЗУ, контроллер передачи [2].

Отличительной особенностью принципа функционирования данного устройства является формирование трехмерных векторных моделей, используемых для предварительной классификации объектов на основе сравнения с эталонами, которые затем посредством генерации минимально необходимого набора проекций, хранящихся в ОЗУ-Э, позволяют выполнить окончательное распознавание объекта [3].

Алгоритм функционирования предлагаемого оптико-электронного устройства представлен на рис. 2.

В процессе функционирования устройства изображение, получаемое видеодатчиком ВД, подается на вычитатель, где происходит обнаружение движущихся объектов. Каждый обнаруженный движущийся объект поступает далее в бинаризатор, где производится построение векторного описания обнаруженного объекта для его последующего распознавания и сохранение описания в ОЗУ. Сравниватель эталонов извлекает векторные описания объектов и посредством перебора двумерных проекций эталонов находит наиболее близкий эталон.

Особенностью процесса распознавания обнаруженного объекта является использование сокращенного набора проекций эталонов при их сравнении с обнаруженным объектом.

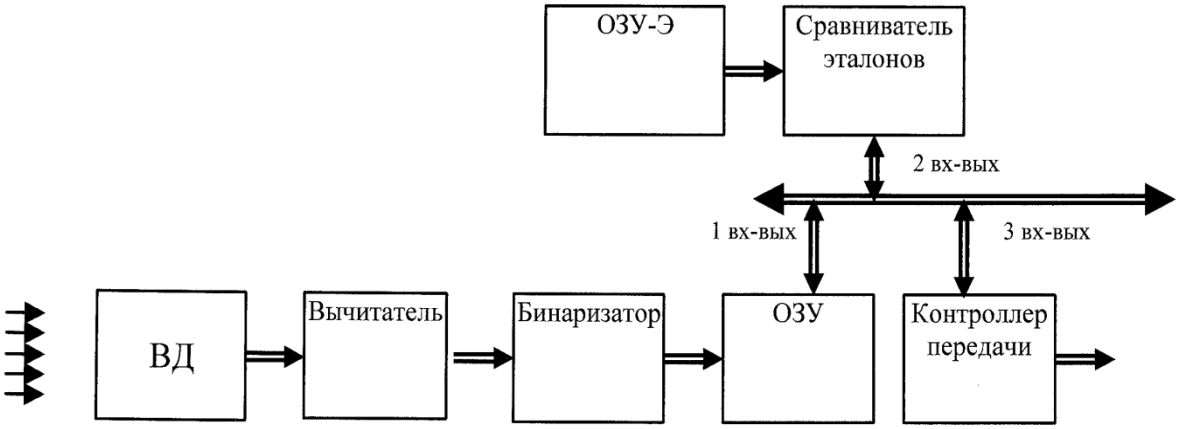


Рис. 1. Структурная схема автоматического устройства обнаружения и распознавания объектов

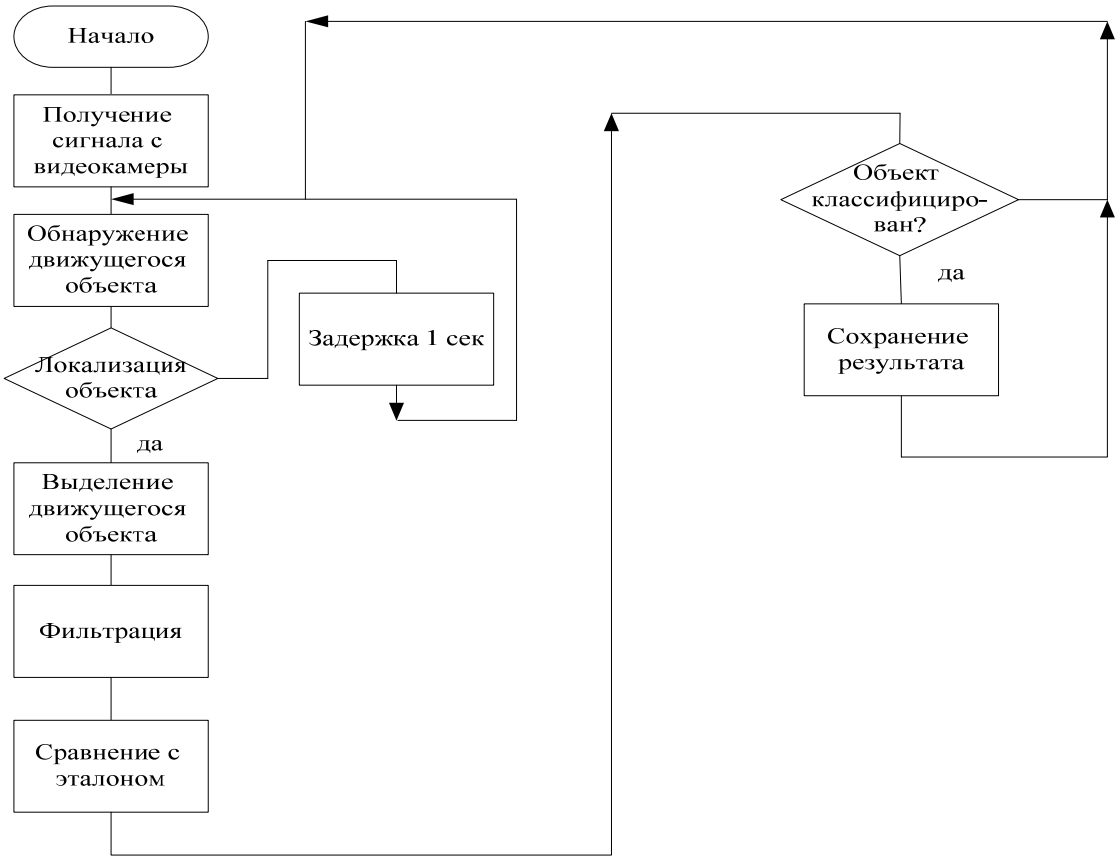


Рис. 2. Обобщенный алгоритм распознавания

Расчет проекций производится в сравнивателе эталонов следующим образом.

Введем вектор Pt2(l), $l = \overline{1, H_1}$, элементами которого являются координаты точек объекта. Осуществляется формирование матрицы M, элементы которой содержат информацию о количестве пикселов с яркостью, большей q в каждой зоне матрицы $O_3(n_3, m_3)$, таких что $O_{3ij} > q$, где q – пороговое значение, n_3, m_3 – размерность матрицы.

Затем осуществляется кодирование, посредством формирования матрицы Cd кода проекции. При распознавании сравниватель эталонов выполняет предварительный анализ имеющихся проекций эталона с тем, чтобы исключить полный

перебор и уменьшить вычислительные затраты. Производится циклический анализ обнаруженных объектов Mdl [4] на предмет соответствия элементов Cd и габаритного контейнера GB с заданными ограничениями.

Для обозначения разницы в соотношении сторон габаритных контейнеров вводится параметр q_1:

$$\mathrm{mdl}_i \longrightarrow \mathrm{prg}_j \longrightarrow \mathrm{GB} - \frac{n_1}{m_1} \le q_1.$$

Сравнение границ очередного обнаруженного объекта $F_{\text{сг}}$ осуществляется на основе выражения $F_{\text{ск}}(\mathrm{MDL},\ F_{\text{кд}},\ q_1) = f(\mathrm{MDL},\ f(F_{\text{ВИ}},\ q),\ q_1)$.

Для определения разницы кодов вводится дополнительный параметр q_2, обозначающий допустимое количество различных зон матрицы кодов проекции эталона и изображения объекта:

$$S \le q_2,$$

где

$$S = \sum_{l=1,m=1}^{11,11} \xi_{lm};$$

$$\xi = \begin{cases} 1, \text{ если } K1_{lm} = K_{lm}, \\ 0, \text{ иначе.} \end{cases}$$

При распознавании определяются весовые коэффициенты каждой зоны матрицы $O_2(n_2, m_2)$, а также вычисляют входные данные. Каждая из 121 зоны матрицы $O_2(n_2, m_2)$ заполнена определенным количеством элементов отличных от фона на значение q. Общее количество элементов, удовлетворяющих вышеуказанному условию, принимается за единицу. Вес зоны является отношением элементов, отличных от фона на значение q, находящимся внутри зоны, к общему количеству этих элементов во всей матрице $O_2(n_2, m_2)$. Таким образом, суммарный вес всех зон будет равен единице.

Построение матрицы весов представляет собой подсчет количества элементов, отличных от цвета фона в каждой из 121 зоны матрицы $O_2(n_2, m_2)$:

$$W_{ij} = \frac{1}{Sm} \sum_{l=1,\ k=1}^{\frac{n_2}{11};\ \frac{m_2}{11}} \mathrm{Px1},$$

где

$$\mathrm{Px} = \begin{cases} 1, \text{ если } O_2\left[l + i\frac{n_2}{11};\ \ k + j\frac{m_2}{11}\right] > q, \\ 0, \text{ иначе.} \end{cases}$$

здесь S_m – суммарное количество элементов, отличных от фона на значение q, в матрице $O_2(n_2, m_2)$ [5].

Экспериментальные исследования разработанного оптико-электронного устройства проводились на базе созданной трехмерной модели и по реальным записанным в видеофайлы изображениям. Входные данные содержали 24 троллейбуса, 15 автобусов, 25 микроавтобусов, съемка производилась в разных погодных и временных условиях. Результат верного распознавания составил: 24 микроавтобуса, 12 автобусов, 18 троллейбусов. Обработка видеопотока изображений осуществлялась со скоростью 30 кадров/с при разрешении оптико-электронного датчика 960×720 пикселей.

Список литературы

1. Оптико-электронное устройство распознавания изображений объектов на основе трехмерных векторных эталонов / В.С. Титов, М.И. Труфанов, С.И. Коростелев, А.В. Медведев // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 4. С. 59–63.

2. Пат. 1008672 Российская Федерация, МПК G06K9. Оптико-электронный датчик-обнаружитель людей на пути движения транспортного средства / Титов В.С., Прилуцкий С.В., Труфанов М.И., Вакун В.В. № 2011111473; заявл. 25.03.2011; опубл. 20.08.11.

3. Коростелев С.И., Панищев В.С. Использование трехмерных эталонов в

задаче распознавания // Всероссийская конференция по проблемам информатики, физики и химии: материалы Всероссийской конференции (18–25 апреля 2005 г., Москва) / Российский университет Дружбы народов. М., 2005. С. 106–108.

4. Вакун В.В. Алгоритм выделения подвижного объекта в видеопотоке и построения его 3D-модели // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание-2012: сборник материалов X Международной конференции. Курск, 2012. С.82–84.

5. Бугаенко Е.И., Труфанов М.И. Способ автоматического определения и коррекции радиальной дисторсии на цифровых изображениях // Известия вузов. Серия «Приборостроение». 2008. № 2. С. 16–22.

Получено 05.11.13

V.S. Titov, Doctor of Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: titov-kstu@rambler.ru)

V.V. Vakun, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: tarrkstu@yandex.ru)

A.V. Polunin, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: tarrkstu@yandex.ru)

AN OPTOELECTRONIC DEVICE FOR DETECTION AND IDENTIFICATION OF URBAN TRANSPORTATION

Submitted by automatic device detection and recognition of objects of public transport. The process of operation of the device described the developed mathematical model. The results of experimental studies.

Key words: *detection device, automatic control, object classification, mathematical model.*

УДК 621.391.7, 681.3.01, 004.056.5

А.С. Сизов, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(тел.: (4712) 58-19-16)

Е.И. Никутин, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский центр Федерального государственного унитарного предприятия «18 ЦНИИ» МО РФ (Курск)
(e-mail: 534_nik@mail.ru)

С.В. Котенко, аспирант, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: wildziraeI@gmail.com)

ОБЗОР И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ СООБЩЕНИЙ

Приведен обзор основных методов анализа стеганографических сообщений и определены тенденции их развития. Рассмотрены особенности на примере методов анализа графических изображений в формате JPEG.

Ключевые слова: *обзор, стеганография, стеганографический анализ.*

***

Подходы к решению задачи надежной защиты авторских прав, прав интеллектуальной собственности и других конфиденциальных данных от несанкционированного доступа требуют постоянного совершенствования. Развитие методов цифрового представления информации обусловило поиск новых методов ее защиты и, как следствие, разработку методов стеганографической защиты информации.

Об увеличении темпов развития стеганографии свидетельствует увеличение количества публикуемых работ и патентуемых решений, связанных с данной наукой. Однако существующие методы не вполне удовлетворяют требованиям практических задач, что обусловливает

дальнейшее развитие стеганографических систем и методов стегоанализа.

Анализ публикаций, рассматривающих вопросы разработки методов стегоанализа, показал, что абсолютное большинство авторов ставят перед собой задачу обнаружения факта присутствия скрытой информации. Предлагая новые методы стегоанализа, чаще всего авторы имеют в виду именно методы, предназначенные для решения первичной задачи стегоанализа – *задачи обнаружения факта присутствия скрытой информации*. В связи с этим обзор методов стеганографического анализа целесообразно проводить, опираясь на следующую классификацию по использованию априорной информации:

– статистические;
– сигнатурные;
– целенаправленные;
– слепые;
– количественные.

Статистические методы стегоанализа основываются на анализе таких статистических характеристик, как коэффициенты корреляции, оценки энтропии, условные распределения, вероятности появления и зависимости между элементами последовательностей и др. Метод, основанный на оценке статистики Хи-квадрат [1], является одним из первых подобных методов. К ним же относится и метод анализа закономерностей в вероятностях появления соседних значений интенсивности цвета пикселей. Отсутствие возможности с их помощью идентифицировать стегосистему, которой выполнено скрытие информации, является существенным ограничением применимости методов данного класса.

Сигнатурные методы стегоанализа лишены вышеупомянутого недостатка и основываются на поиске предопределённых сигнатур – последовательностей битов, с высокой вероятностью указывающих на присутствие в анализируемом файле информации, скрытой соответствующей стегосистемой. Поиск сигнатур выполняется аналитиком в процессе исследования стегосистемы, преимущественно вручную, с применением сравнительного визуального или автоматизированного анализа машинного представления содержимого немодифицированного контейнера и полученного на его основе стеганографического сообщения, сравнительного анализа группы файлов с одинаковыми или различными вложениями, а также методов восстановления исходных текстов стеганографической программы. Наличие статических сигнатур может являться следствием недостаточности подготовки разработчиков стегосистемы или их заинтересованности в доступе к защищаемой информации со стороны нарушителя по предварительному или планируемому сговору.

Целенаправленные методы стегоанализа используют знания о методах стеганографического скрытия информации [3] и опираются на концепцию различающих статистик. При этом подходе путём анализа алгоритма скрытия информации определяют показатели (различающие статистики), которые значительно зависят от длины скрытого сообщения и могут быть оценены для пустых изображений. Для формата JPEG такая оценка выполняется после последовательного декодирования, усечения на несколько пикселей в каждом направлении и вновь кодирования стегоизображения с использованием той же таблицы квантования. Различающая статистика, рассчитанная для кадрированного (усечённого) изображения, используется как оценка этой статистики для пустого изображения.

Методы этой группы не ограничиваются отдельным типом скрывающих преобразований и также хорошо работают с сообщениями, рассеянными в контейнере случайным образом. Необходи-

мость предварительного поиска высокоинформативных признаков распознавания для отдельных стегосистем ограничивает возможность применения целенаправленных методов.

Примерами реализаций целенаправленных методов являются алгоритмы поиска координат элементов и определения размера стеганографического вложения в изображении формата JPEG для стегосистем F5 и Outguess [7, 8]. Однако разработанные алгоритмы не являются реализациями методов стегоанализа, которые в привычном понимании указывают на наличие скрытой информации, т.к. действуют с существенным ограничением, суть которого в необходимости их применения только при условии, что исследуемый файл модифицирован стегосистемой F5 или Outguess.

Слепые методы стегоанализа используют некоторые парадигмы скрытия информации [4-6] и основываются на предположении о том, что естественное изображение может быть охарактеризовано некоторым набором численных характеристик. Распределение векторов признаков для немодифицированных контейнеров определяется путём вычисления признаков для большой базы контейнеров. При распознавании стегоконтейнеров используются методы распознавания образов. Важное преимущество слепых методов заключается в том, что они имеют потенциальную возможность обнаруживать факты применения априорно неизвестных стегосистем и способны распознавать стегосообщения (СС) по расположению вектора признаков в пространстве признаков.

Этап распознавания СС является важным шагом к извлечению скрытых сообщений, поскольку знание использованной для передачи сообщения стегосистемы даёт возможность применить методы перебора для поиска ключа. Тем не менее есть основания полагать, что в точности распознавания слепые методы стегоанализа должны уступать целенаправленным методам, основанным на высокоточных моделях стеганографических изображений [6]. Это предположение тем более верно, если учитывать определение целенаправленных методов, приведенное в диссертации Томаса Пьюни (T. Pevny), где целенаправленные распознаватели – это двуальтернативные распознаватели, предназначенные для разделения сообщений на классы пустых и заполненных контейнеров одной стегосистемой. Достоверность двуальтернативного распознавания выше достоверности многоальтернативного распознавания из-за характерных для последнего ошибок трансформации (отнесения СС одной системы к классу СС другой системы).

Наиболее значимые результаты в области разработки слепых методов для стегоанализа изображений JPEG впервые получены с применением обучаемого устройства на основе метода опорных векторов [2].

Количественные методы стегоанализа основываются на оценке количества изменений контейнера, вызванных встраиванием стегосообщения. Методы данного класса позволяют не только обнаруживать сам факт наличия скрытого сообщения, но и получать информацию о его длине. Первые методы количественного стегоанализа имели ограниченную применимость, поскольку требовали необходимость знания алгоритма встраивания. В [9] представлен метод количественного стегоанализа, использующий построение оценочной функции, описывающей расположение вектора признаков в пространстве признаков для некоторого набора контейнеров. Основным преимуществом предложенного подхода является отсутствие знания алгоритма встраивания, что существенно расширяет возможности его использования.

Анализ публикаций последних лет, рассматривающих вопросы синтеза и анализа стегосистем, позволяет сделать вывод о том, что усилия учёных в настоящее время сосредоточены на разработке слепых методов стегоанализа и множеств признаков распознавания для них. В наиболее цитируемых в данной области работах [10-17] представлены около 40 признаков, рассчитываемых в пространственной области изображения и в области коэффициентов дискретного косинусного и вейвлет-преобразований, позволяющих формировать векторы из более чем 7·104 параметров распознавания. Тенденции развития данного направления включают поиск новых:

– информативных признаков распознавания [18];

– подходов к формированию оценочных изображений и расчёту функционалов разности между статистиками анализируемых и исследуемых изображений, обеспечивающих повышение информативности существующих признаков распознавания СС [15, 17];

– подходов к совместному использованию признаков для повышения достоверности распознавания СС [14, 16, 17].

Указанные тенденции становятся очевидными при анализе подходов к распознаванию СС и признаковых пространств, предложенных за период с 2007 по 2013 гг. [19]. В соответствующих работах предложены подходы к получению оценочных изображений для слепого стеганографического анализа и признаковые пространства, включающие статистики первого и второго порядков FBS (Feature Based Steganalysis), и характеристики представления пространственной области изображения и области ДКП в виде марковского процесса MP (Markov Process) и CHEN (по фамилии автора Chen), а также CHEN, полученные с использованием различных функционалов разности между статистиками анализируемого и оценочного изображений CC-CHEN и последнее направление, условно отождествляемое с построением «объемлющих» моделей изображений CC-JRM (от слов JPEG Rich Model) путём объединения подпространств различных признаковых пространств.

Результаты применения новых подходов и множеств признаков распознавания свидетельствуют о росте уровня достоверности даже для стеганографических контейнеров с относительно короткими встроенными сообщениями. Это ставит перед разработчиками стеганографических методов задачу сохранения статистик, используемых при анализе в качестве наиболее информативных признаков распознавания [6].

Таким образом, существующая практика стеганографического анализа показывает, что для получения доступа к скрываемой информации в каждом конкретном случае помимо точного знания алгоритмов защиты информации, реализованных в указанной стеганографической системе, требуется наличие априорной информации о её применении или средство анализа, обеспечивающее высокую достоверность распознавания её сообщений. Поэтому при разработке средств стеганографической защиты информации необходимо учитывать возможности по достоверному распознаванию методами целенаправленного и слепого анализа.

Список литературы

1. Westfeld A., Pfitzmann A. Attacks on Steganographic Systems // 3rd International Workshop. Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York. 2000. Vol. 1768. P. 61−75.

2. Fridrich J., Pevny T. Multi-class Blind Steganalysis for JPEG Images // In E. J. Delp and P. W. Wong, editors, Proceedings SPIE, Electronic Imaging, Securi-

ty, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VIII. 2006. Vol. 6072. P. 257–269.

3. Fridrich J., Goljan M., Hogea D. Quantitative Steganalysis: Estimating Secret Message Length. ACM Multimedia Systems Journal. Special Issue on Multimedia Security. 2003. № 9(3). P. 288–302.

4. Avcibas I., Memon N., Sankur B. Steganalysis Using Image Quality Metrics. In Proceedings of SPIE Electronic Imaging, Security and Watermarking of Multimedia Contents III. San Jose. CA. 2001. Vol. 4314. P. 523–531.

5. Farid H., Siwei L. Detecting Hidden Messages using High-order Statistics and Support Vector Machines // In F.A.P. Petitcolas, editor, Information Hiding. 5th International Workshop, Springer-Verlag. 2003. Vol. 2578. P. 340–354.

6. Fridrich J. Feature-based Steganalysis for JPEG images and its implications for future design of steganographic schemes // In J. Fridrich, editor, Information Hiding. 6th International Workshop, Springer-Verlag. 2005. Vol. 3200. P. 67–81.

7. Fridrich J., Goljan M., Hogea D. Steganalysis of JPEG Images: Breaking the F5 Algorithm // Information Hiding. 2002. P. 310–323.

8. Fridrich J., Goljan M., Hogea D. Attacking the OutGuess // Proceedings of the ACM Workshop on Multimedia and Security 2002. URL: http://www.ws.binghamton.edu//fridrich/Research/acm_outguess.pdf.

9. Pevný T., Ker A. From Blind to Quantitative Steganalysis, Electronic Imaging, Media Forensics and Security XI, San Jose, CA, 2009. P. 0C1-0C14.

10. Image steganalysis with binary similarity measures / I. Avcibas, M. Kharrazi, N. Memon, B. Sankur // EURASIP Journal on Applied Signal Processing. 2005. Vol. 17. P. 2749–2757.

11. Avcibas I., Memon N., Sankur B. Steganalysis Using Image Quality Metrics // IEEE Transactions on image processing, 2003. № 12(2).

12. Farid H., Lyu S. Steganalysis using higher-order image statistics // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2006. № 1(1). P. 11–119.

13. Chen C., Shi Y.Q. JPEG image steganalysis utilizing both intrablock and interblock correlations // Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS. 2008. P. 3029–3032.

14. Fridrich J., Pevny T. Merging Markov and DCT features for multi-class JPEG steganalysis // Proceedings of SPIE Electronic Imaging, Photonics West, USA. 2007. January. P. 03–04.

15. Fridrich D., Kodovsky J. Calibration Revisited, Proc. ACM Multimedia and Security Workshop, Princeton, NJ. 2009. September 7–8. P. 63–74.

16. Fridrich J., Kodovsky J. Steganalysis in high dimensions: fusing classifiers built on random subspaces // Electronic Imaging, Media, Watermarking, Security and Forensics XIII, San Francisco, CA. 2011. January 23–26.

17. Fridrich J., Kodovsky J. Steganalysis of JPEG Images Using Rich Models, To appear in Proc. SPIE // Electronic Imaging, Media Watermarking, Security, and Forensics XIV, San Francisco, CA. 2012. January 23-25.

18. Fridrich J., Kodovsky J., Pevny T. Modern Steganalysis Can Detect YASS // Electronic Imaging, Media Forensics and Security XII, San Jose, CA. 2010. January 17–21. P. 02-01-02-11.

19. Котенко С.В., Никутин Е.И., Урясьева М.В. Тенденции развития методов анализа стенографических сообщений // Информационные системы и технологии: сборник докладов I-й региональной научно-технической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т, Курск, 2012. С. 42–44.

Получено 18.11.13

A.S. Sizov, Doctor of Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk)
(tel.: (4712) 58-80-96)

E.I. Nikutin, Senior Researcher, Federal State Unitary Enterprise «18 Central Scientific Research Institute» of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Kursk)
(e-mail: g534_nik@mail.ru)

S.V. Kotenko, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: wildzirael@gmail.com)

OVERVIEW AND TRENDS OF THE ANALYSIS METHODS OF STEGANOGRAPHIC MESSAGES DEVELOPMENT

An overview of the main analysis methods of steganographic messages and the tendencies of their development is proposed. The analysis methods considered on the example of graphic images in JPEG.

Key words: *review, steganography, steganalysis.*

УДК 621.396.677.3

Н.С. Архипов, д-р техн. наук, доцент, Академия ФСО России (Орел) (e-mail: van341@mail.ru)

И.С. Полянский, канд. техн. наук, Академия ФСО России (Орел) (e-mail: van341@mail.ru)

Г.А. Ермишин, сотрудник Академии ФСО России (Орел)
(e-mail: van341@mail.ru)

СИНТЕЗ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО РЕФЛЕКТОРА ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН ЗОНТИЧНОГО ТИПА, ПОСТРОЕННЫХ ПО СХЕМЕ СО СМЕЩЕННОЙ ОБРАЗУЮЩЕЙ (СХЕМА АДЭ)

В статье предложен алгоритм синтеза корректирующего рефлектора двухзеркальной антенны зонтичного типа, построенной по схеме со смещенной образующей. Алгоритм основан на численном решении сформированной экстремальной задачи градиентными методами. Решение выполнено в приближении методов геометрической оптики при минимизации фазовых ошибок, вносимых основным рефлектором. Работоспособность алгоритма проверена на конкретных примерах.

Ключевые слова: *двухзеркальная антенна зонтичного типа по схеме со смещенной образующей, алгоритм синтеза корректирующего зеркала, минимизация фазовых ошибок.*

***

Введение

Существенным недостатком зеркальных антенн зонтичного типа (ЗЗА – зеркальных зонтичных антенн) является периодическое отклонение профиля рефлектора от идеального параболоида вращения (эффект обратной выпуклости), приводящее к появлению фазовых ошибок [1]. В работах [2, 3, 4] высказано предположение о том, что форма корректирующего вспомогательного зеркала должна представляться совокупностью треугольных вырезок из эллиптического (схема АДЭ [5], Грегори) или гиперболического (схема Кассегрена [4]) цилиндров по числу клинов основного рефлектора. Учитывая, что решение задачи согласования поле облучателя с полем в фокальной области рефлектора в окончательном виде не сформировано, а в качестве наиболее удачной компоновки признается схема со смещенной параболической образующей (схема АДЭ), целью статьи является разработка алгоритма синтеза поверхности контррефлектора развертываемых ЗЗА по схеме АДЭ.

Синтез контррефлектора зонтичной антенны по схеме АДЭ

Профиль основного зеркала будем задавать четырьмя параметрами: диаметром рефлектора D, углом раскрыва $2\psi_0$; числом ребер N_p; радиусом r_1 ступицы (центральной втулки). Аналитические выражения, описывающие геометрию зонтичного рефлектора для указанных параметров, заданы в [2].

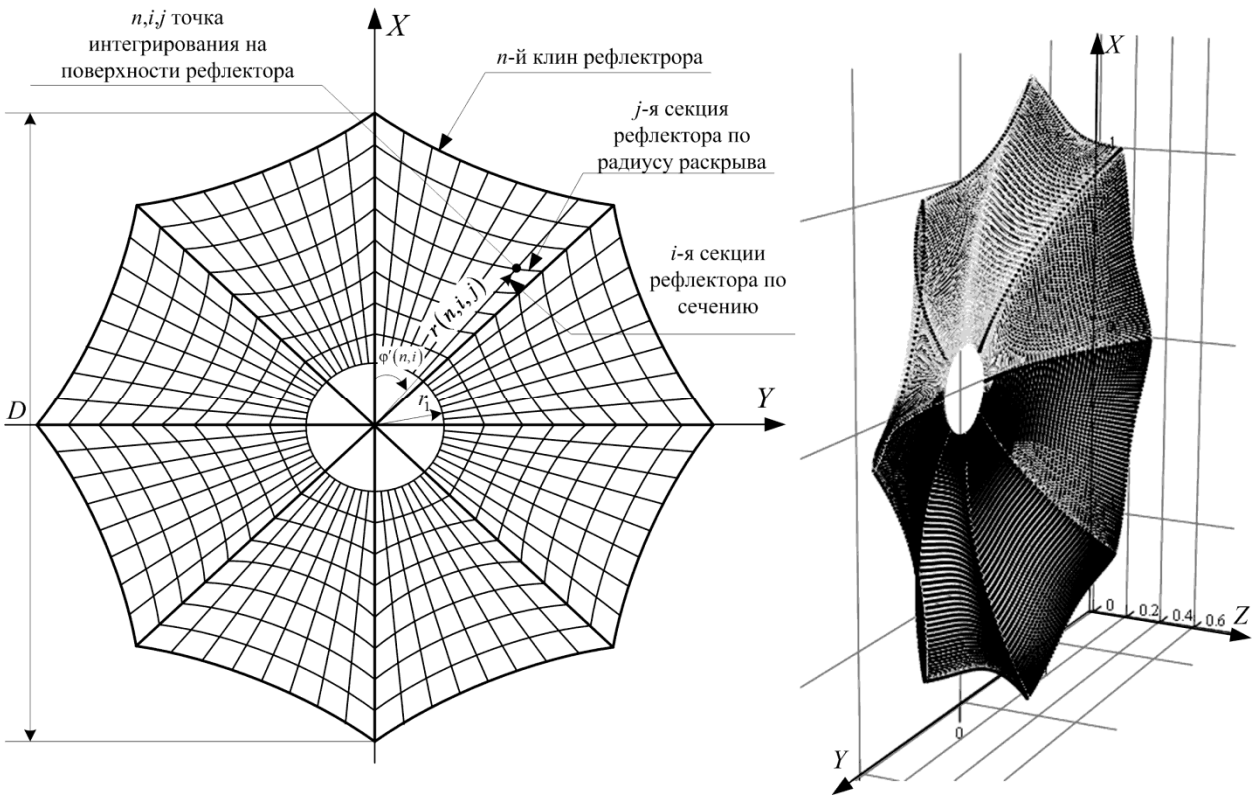


Рис. 1. Геометрическое представление поверхности рефлектора зонтичной антенны

Для удобства представления и последующего численного расчета интеграла излучения ЗЗА токовым методом разобьём поверхность рефлектора $Z(n,i,j)$, где $n=\overline{1,N_p}$ – номер клина зонтичного рефлектора; i и j – номера секций рефлектора по сечению и радиусу раскрыва соответственно (рис. 1) на точки интегрирования, координаты которых задаются нулями полинома Лежандра [6] степени N.

Координаты точек поверхности зонтичного рефлектора определяются соотношениями

$$\begin{aligned} X(n,i,j) &= \left(r(n,i,j)+r_1\right)\cdot\cos\left(\varphi'(n,i)\right); \\ Y(n,i,j) &= \left(r(n,i,j)+r_1\right)\cdot\sin\left(\varphi'(n,i)\right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$Z(n,i,j) = \frac{\left[\begin{pmatrix} X(n,i,j)\cdot\cos\left(\beta_0(n)\right)+ \\ +Y(n,i,j)\cdot\sin\left(\beta_0(n)\right)-r_1\cos\left(\pi/N_p\right)\end{pmatrix}^2-\begin{pmatrix} Y(n,i,j)\cdot\cos\left(\beta_0(n)\right)- \\ -X(n,i,j)\cdot\sin\left(\beta_0(n)\right)\end{pmatrix}^2\cdot\cos^2(\chi)\right]\cdot\cos^2(\phi_0)}{4f\cos^2\left(\pi/N_p\right)\cdot\cos(2\phi_0)}, \quad (2)$$

где значения углов χ,ϕ_0 и вспомогательных функций $r(n,i,j)$, $\varphi'(n,i)$, $\beta(n)$ задаются соответствующими равенствами:

$$\chi = \arctan\left(\frac{(D/2)\cdot\cos\left(\pi/N_p\right)-r_1}{4f\cos^2\left(\pi/N_p\right)}\right);$$

$$\phi_0 = \arctan\left(\frac{\sin\left(\pi/N_p\right)\cdot\cos(\chi)}{\cos\left(\pi/N_p\right)-(2r_1/D)}\right);$$

$$\varphi'(n,i) = \pi\cdot\left(t_i+2\cdot n-1\right)/N_p;$$

$$r(n,i,j) = r_{\max}(n,i)\cdot\left(1+t_j\right)/2;$$

$$r_{\max}(n,i)=\left(\frac{D}{2}-r_1\right)\times$$

$$\times\left[1-2\cdot\sin\left(\frac{\pi(t_i+1)}{2N_p}\right)\cdot\sin\left(\frac{2\pi}{N_p}\cdot\left(1-\frac{(t_i+1)}{2}\right)\right)\right];$$

$$\beta_0(n)=\pi/N_p+(n-1)2\pi/N_p, \qquad (3)$$

где t_i – нули полинома Лежандра N-й степени $\left(i=\overline{1,N}\right)$.

Из [5] известно, что образующая фигуры вращения корректирующего зеркала в классической схеме антенны АДЭ является эллипсом со следующими параметрами:

эксцентриситет

$$e=\sin(\psi/2)/\sin(\psi/2+\varphi);$$

большая полуось

$$a=d\left(\mathrm{ctg}(\psi/2)+\mathrm{ctg}(\varphi)\right)/4;$$

фокальный радиус $c=d/4\sin(\varphi)$,

где $d=2r_1$ – диаметр контррефлектора;

ψ и φ – углы, характеризующие раствор образующей параболы основного зеркала и раскрыв вспомогательного рефлектора (угол облучения источником краев малого зеркала).

Величины углов ψ и φ при заданных диаметре основного зеркала D и фокусном расстоянии f определяются в соответствии с выражениями [5]

$$\psi=2\cdot\arctan\left[(D-d)/(4f)\right];$$

$$\varphi=2\cdot\arctan\left(d/\left[2(f-\Delta z)\right]\right). \qquad (4)$$

В выражении (4) Δz – расстояние между центром основного рефлектора и точкой расположения источника излучения (фазовый центр облучателя) с координатами (0,0, Δz).

Геометрическое представление задачи построения эллипса, соответствующего образующей параболы в классической схеме АДЭ, показано на рисунке 2.

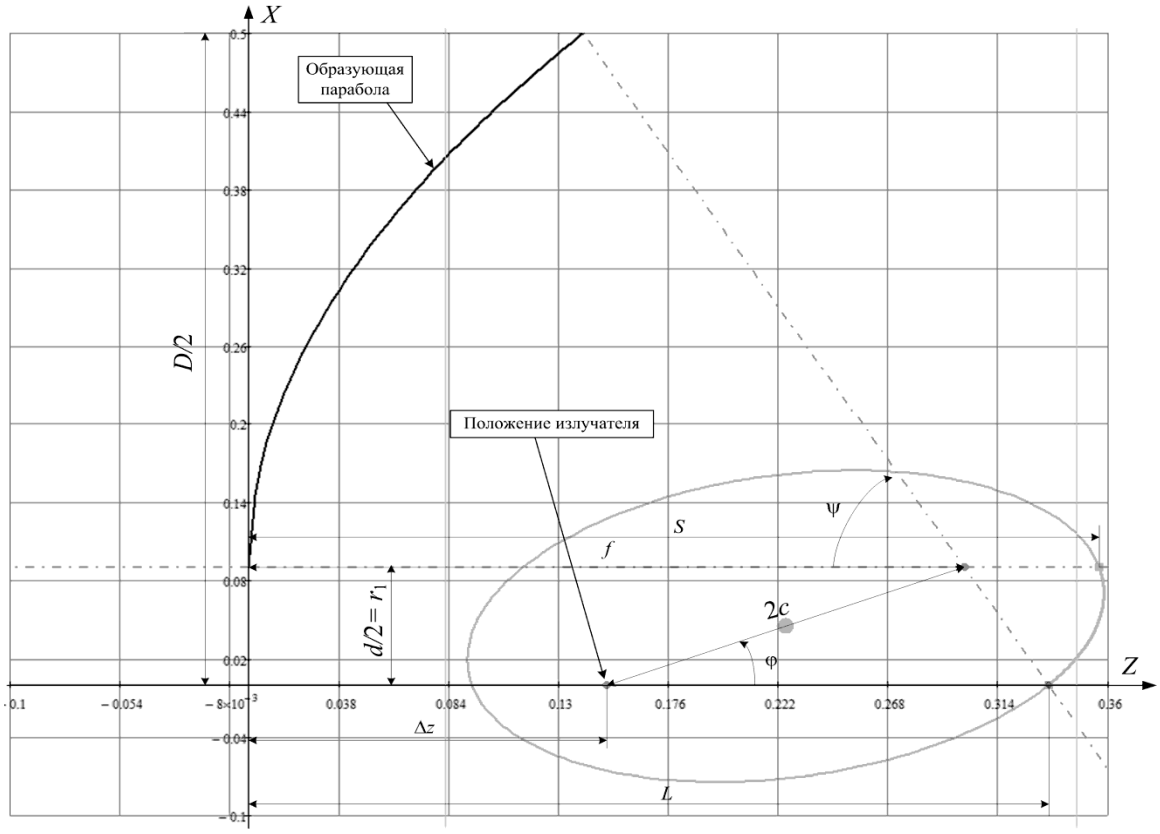


Рис. 2. Геометрическое представление эллипса, соответствующего образующей параболе классической антенны АДЭ

Каноническое уравнение эллипса параметризуется в следующем виде:

$$\begin{cases} z(\upsilon) = (a \cdot \sin(\upsilon) + c) \cdot \cos(\varphi) - \\ \qquad - b \cdot \cos(\upsilon) \cdot \sin(\varphi) + \Delta z; \\ x(\upsilon) = (a \cdot \sin(\upsilon) + c) \cdot \sin(\varphi) + \\ \qquad + b \cdot \cos(\upsilon) \cdot \cos(\varphi), \end{cases} \quad (5)$$

где υ – параметр уравнения (угол между радиусом-вектором в точке эллипса и положительным направлением оси абсцисс);

$b = a\sqrt{1-(E)^2}$ – малая полуось эллипса.

Параметр υ уравнения (5), определяющий крайние точки образующей контррефлектора, расположенные на расстоянии L и S от оси абсцисс (рис. 2), задается следующими отношениями:

$$\upsilon_L = \pi - \arccos\left[\left(B + \sqrt{(B)^2 + 4AC}\right) \Big/ 2A\right];$$

$$\upsilon_S = \pi - \arccos\left[\frac{2c\sin(\varphi) - d + A' \cdot C'}{2b\cos(\varphi)}\right], \quad (6)$$

где $A = (a\sin(\varphi))^2 + (b\cos(\varphi))^2$;

$B = 2b \cdot c \cdot \sin(\varphi)\cos(\varphi)$;

$C = (a\sin(\varphi))^2 - (c\sin(\varphi))^2$;

$$A' = \frac{-a\sin(\varphi)}{(a\cos(\varphi))^2 + (a)^2 + (b\cos(\varphi))^2};$$

$$C' = ad\sin(\varphi) - 2ac + \\ + 2ac(\cos(\varphi))^2 + b\cos(\varphi) \cdot \sqrt{B'}; \quad (7)$$

$$B' = \begin{pmatrix} 2\left[(a)^2 + (b)^2 - (c)^2\right] - \\ -d\left[d - 4c\sin(\varphi)\right] - \\ -2\cos(2\varphi)\left[(a)^2 - (b)^2 - (c)^2\right] \end{pmatrix}.$$

Постановку задачи синтеза отражающей поверхности корректирующего зеркала в ЗЗА, построенного по схеме АДЭ, в приближении методов геометрической оптики запишем в виде решения оптимизационной задачи, обеспечивающей выравнивание фазового фронта волны, отраженной от *n*-го клина зонтичного рефлектора:

$$F_f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{f}') = \sum_{1 \le i < i' \le N} \left[\sum_{1 \le j < j' \le N} \left[\left(H\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right)\right) - \left(-H\left(x_{i',j'}, y_{i',j'}, f'_{i',j'}\right)\right)^2 \right] \right] \to \min_{\substack{\mathbf{x} = (x_{i,j})_{N \times N} \in \square; \\ \mathbf{y} = (y_{i,j})_{N \times N} \in \square; \\ \mathbf{f}' = (f'_{i,j})_{N \times N} \in \square}}, \quad (8)$$

где

$$H\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) = \sqrt{\begin{matrix} \left(X(n,i,N+1-j) - Q_1\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right)\right)^2 + \\ + \left(Y(n,i,N+1-j) - Q_2\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right)\right)^2 + ; \\ + \left(Z(n,i,N+1-j) - Q_3\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right)\right)^2 \end{matrix}} \quad (9)$$

$$\vec{Q}\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) = \begin{pmatrix} \left(f - U\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right)\right) \cdot E_1\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) + x_{i,j}; \\ \left(f - U\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right)\right) \cdot E_2\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) + y_{i,j}; \\ \left(f - U\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right)\right) \cdot E_3\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) + Z_{kr}\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right), \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\vec{E}\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) = \begin{bmatrix} \vec{T}\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) - 2\vec{N}_0\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) \times \\ \times \left(\vec{N}_0\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) \cdot \vec{T}\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right)\right) \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$U\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) = \sqrt{\left(x_{i,j}\right)^2 + \left(y_{i,j}\right)^2 + \left(Z_{kr}\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) - \Delta z\right)^2}, \quad (12)$$

где $\vec{T}\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right)$ – векторная функция, определяющая орт вектора от фазового центра облучателя на (i, j)-ю точку синтезируемой поверхности n-го клина корректирующего зеркала;

$\vec{N}_0\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right)$ – векторная функция, определяющая орт вектора нормали (i, j)-й точки n-го клина на синтезируемой поверхности корректирующего зеркала.

Значение указанных векторных функций определяется в соответствии с равенством:

$$\vec{T}\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) = \begin{pmatrix} x_{i,j} \big/ U\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right); \\ y_{i,j} \big/ U\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right); \\ \left(Z_{kr}\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) - \Delta z\right) \big/ U\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right), \end{pmatrix} \tag{13}$$

$$\vec{N}_0\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) = \begin{pmatrix} -\left(n_0\right)_1\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) \big/ V\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right); \\ -\left(n_0\right)_2\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) \big/ V\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right); \\ 1 \big/ V\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right), \end{pmatrix} \tag{14}$$

$$V\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right) = \sqrt{\left(\left(n_0\right)_1\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right)\right)^2 + \left(\left(n_0\right)_2\left(x_{i,j}, y_{i,j}, f'_{i,j}\right)\right)^2 + 1}. \tag{15}$$

В выражениях (10), (12), (13) уравнение поверхности контррефлектора $Z_{kr}\left(x, y, f'\right)$ для заданных фокусного расстояния f', диаметра D' и максимального смещения кривой контррефлектора относительно фокальной оси (глубина рефлектора) z_m образующей рефлектора с учетом указанных параметрических уравнений эллипса (5) определяется отношением

$$\begin{aligned} Z_{kr}\left(x, y, f'\right) = &\left(a\left(f', D', z_m\right) \cdot \sqrt{1 - K\left(x, y, f', D', z_m\right)^2} + c\left(f'\right)\right) \cdot \cos\left(\varphi\left(f'\right)\right) - \\ &- b\left(f', D', z_m\right) \cdot K\left(x, y, f', D', z_m\right)^2 \cdot \sin\left(\varphi\left(f'\right)\right) + \Delta z, \end{aligned} \tag{16}$$

где

$$K\left(x, y, f', D', z_m\right) = \begin{pmatrix} F\left(x, y, f', D', z_m\right) + a\left(f', D', z_m\right)\sin\left(2\varphi\left(f'\right)\right) \times \\ \times \sqrt{R\left(f', D', z_m\right) + R'\left(x, y, f', D', z_m\right)} \end{pmatrix} \Bigg/ 2F'\left(f', D', z_m\right); \tag{17}$$

$$F\left(x, y, f', D', z_m\right) = \begin{pmatrix} b\left(f', D', z_m\right) c\left(f'\right)\left(\sin\left(\varphi\left(f'\right)\right) + \sin\left(3\varphi\left(f'\right)\right)\right) - \\ -4b\left(f', D', z_m\right)\sqrt{x^2 + y^2}\left(1 - \sin\left(\varphi\left(f'\right)\right)^2\right) \end{pmatrix};$$

$$R\left(f', D', z_m\right) = \begin{pmatrix} \left(a\left(f', D', z_m\right)\sin\left(\varphi\left(f'\right)\right)\right)^2 - \left(b\left(f', D', z_m\right)\sin\left(\varphi\left(f'\right)\right)\right)^2 + \\ + \left(b\left(f', D', z_m\right)\right)^2 - \left(c\left(f'\right)\sin\left(\varphi\left(f'\right)\right)\right)^2 \end{pmatrix};$$

$$R'\left(x, y, f', D', z_m\right) = \left(2c\left(f'\right)\sin\left(\varphi\left(f'\right)\right)\sqrt{x^2 + y^2} - \left(x^2 + y^2\right)\right); \tag{18}$$

$$F'(f',D',z_m) = -2\left(b(f',D',z_m)\right)^2 + \\ +\left(a(f',D',z_m)\sin\left(\varphi(f')/2\right)\right)^2 - \left(a(f',D',z_m)\sin\left(3\varphi(f')/2\right)\right)^2 + \\ +3\left(b(f',D',z_m)\sin\left(\varphi(f')/2\right)\right)^2 + \left(b(f',D',z_m)\sin\left(3\varphi(f')/2\right)\right)^2. \quad (19)$$

Определение аргументов матриц $\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{f}'$, задающих требуемую поверхность корректирующего зеркала в соответствии с задачей (11), выполнено численно, градиентным методом с переменной метрикой Дэвидона–Флетчера–Пауэлла, подробно рассмотренным в [9]. Устойчивое и эффективное решение градиентными методами требует задания начальных приближений, характеризующих исходную поверхность корректирующего зеркала.

Определение последней предлагается провести путем выполнения следующих этапов:

1) определить координаты точек фокусировки для кривых, соответствующих *i*-му сечению *n*-го клина рефлектора (см. рис. 1);

2) на основе методов геометрической оптики для *i*-го сечения n-го клина задать соответствующие (*n*, *i*)-е сечения контррефлектора;

3) объединить заданные (*n*, *i*)-х сечения контррефлектора в общую фигуру вращения.

Выполним описание указанных этапов алгоритма при поиске начальных приближений.

Первый этап

С учетом представления (см. рис. 1) поверхности рефлектора зонтичной антенны, координату (*n*, *i*)-й точки $F_{n,i} = \left(x_{n,i}, y_{n,i}, z_{n,i}\right)$ фокусировки для кривых, составляющих *i*-е сечения рефлектора *n*-го клина, будем определять по правилу минимума расстояния между отраженными лучами от *j*-х точек (*n*, *i*)-й кривой зонтичного рефлектора для случая прихода плоской волны в направлении, соответствующем основному излучению зеркальной антенны (θ_m, ξ_m). Алгоритм решения указанной задачи подробно изложен в [6, 7].

Второй этап

На основе способа задания образующей корректирующего зеркала антенны АДЭ, представленного в [5], для полученных координат точек фокуса $F_{n,i} = \left(x_{n,i}, y_{n,i}, z_{n,i}\right)$ выполним определение соответствующих (*n*, *i*)-х сечений контррефлектора зонтичной антенны. Последние образуются сектором (*n*, *i*)-го эллипса с параметрами, заданными ранее.

Третий этап

Полученные на втором шаге аналитические выражения, определяющие (*n*, *i*)-е сечения (образующие) контррефлектора, позволяют перейти к непосредственному решению задачи по нахождению поверхности фигуры корректирующего зеркала ЗЗА.

Координаты точек контррефлектора в плоскости OXY зададим в следующем виде:

$$X_{kr}(n,i,j) = \\ = \left(r_{kr}(n,i,j) + d'_{n,i}\right)\cdot\cos\left(\varphi_{kr}(n,i)\right); \\ Y_{kr}(n,i,j) = \\ = \left(r_{kr}(n,i,j) + d'_{n,i}\right)\cdot\sin\left(\varphi_{kr}(n,i)\right), \quad (20)$$

где $\varphi_{kr}(n,i) = \pi\cdot\left(t_i + 2\cdot n - 1\right)/N_p$;

$r_{kr}(n,i,j) = \left(d - 2d'_{n,i}\right)\left(1 + t_j\right)/4$;

$d'_{n,i}$ – коэффициент кривизны секции (*n*, *i*)-го сечения контррефлектора, характеризующего эффект обратной выпуклости профиля основного рефлектора.

Величина $d'_{n,i}$ определятся по пра-вилу

$$d'_{n,i} = \\ = \max_{n,i}\left(\sqrt{\left(x_{n,i}\right)^2 + \left(y_{n,i}\right)^2}\right) - \sqrt{\left(x_{n,i}\right)^2 + \left(y_{n,i}\right)^2}.$$

С учетом заданных отношений выбираем начальные приближения итогового алгоритма синтеза *n*-го клина корректирующего зеркала:

$$x_{i,j} = X_{kr}\left(n,i,j\right);$$
$$y_{i,j} = Y_{kr}\left(n,i,j\right);$$
$$f'_{i,j} = f + \left[z_{n,i} - \min_{n,i}\left(z_{n,i}\right)\right].$$

Пример поверхности контррефлектора, синтезированного по разработанному алгоритму, и размещение отражающих поверхностей в синтезированной двухзеркальной системе зонтичного типа по схеме АДЭ представлены на рисунке 3 с отображением фронта волны, формируемого синтезированной облучающей системой, для следующих исходных геометрических параметров:

1) диаметр рефлектора D = 1,2 м;

2) фокусное расстояние f/D = 0,4;

3) число ребер N_p = 8;

4) радиус ступицы r_1/D = 0,09;

5) смещение фазового центра облучателя от центра рефлектора по фокальной оси $\Delta z/f$ = 0,5.

С учетом известных решений [3, 4 др.] особый интерес представляет сравнительная оценка эффективности применения контррефлекторов: 1) синтезируемого по классической схеме АДЭ (контррефлектор в виде тела вращения); 2) синтезированной поверхности корректирующего зеркала зонтичной антенны по разработанному алгоритму синтеза, при дополнительном сравнении с 3) аналогичной конструкцией однозеркальной антенны зонтичного типа. Из [2], [4] и др. источников известно, что точка фокуса зонтичного рефлектора не совпадает с оптимальным положением фазового центра облучателя, при котором КИП раскрыва максимален.

С учетом последнего размещение фазового центра облучателя в третьем варианте производилось аналогично первому шагу разработанного алгоритма поиска начальных приближений для условия минимума расстояния между отраженными лучами от n,i,j-х точек зонтичного рефлектора в случае прихода плоской волны в направлении, соответствующем основному излучению зеркальной антенны $\left(\theta_m,\xi_m\right)$.

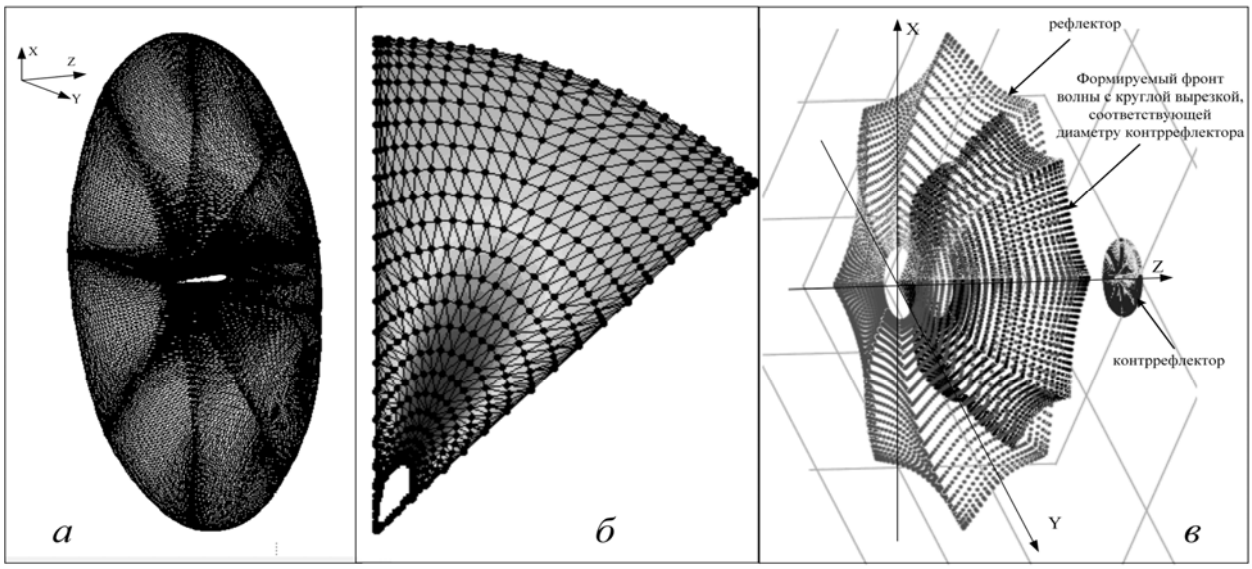


Рис. 3. Синтезированный контррефлектор: *а* – поверхность контррефлектора; *б* – элемент поверхности контррефлектора (клин); *в* – фронт волны, формируемый синтезированным по разработанному алгоритму контррефлектором

Расчет поля излучения $\dot{\vec{E}}$ зонтичной антенны выполнен токовым методом с учетом поправок к току на кривизну отражающих поверхностей аналогично [2, 10]. Вычисление электрических характеристик произведено для зонтичных антенн с параметрами: λ = 0,12 м; $D/\lambda = 10...25$; $f/D = 0,4$; $r_1/D = 0,15$; уровень поля облучателя на кромке контррефлектора (в 3-м варианте на кромке рефлектора) –10 дБ; число ребер N_p = 8; 12; 24. Результаты расчета аппертурного КИП раскрыва зонтичной антенны приведены на рисунке 4.

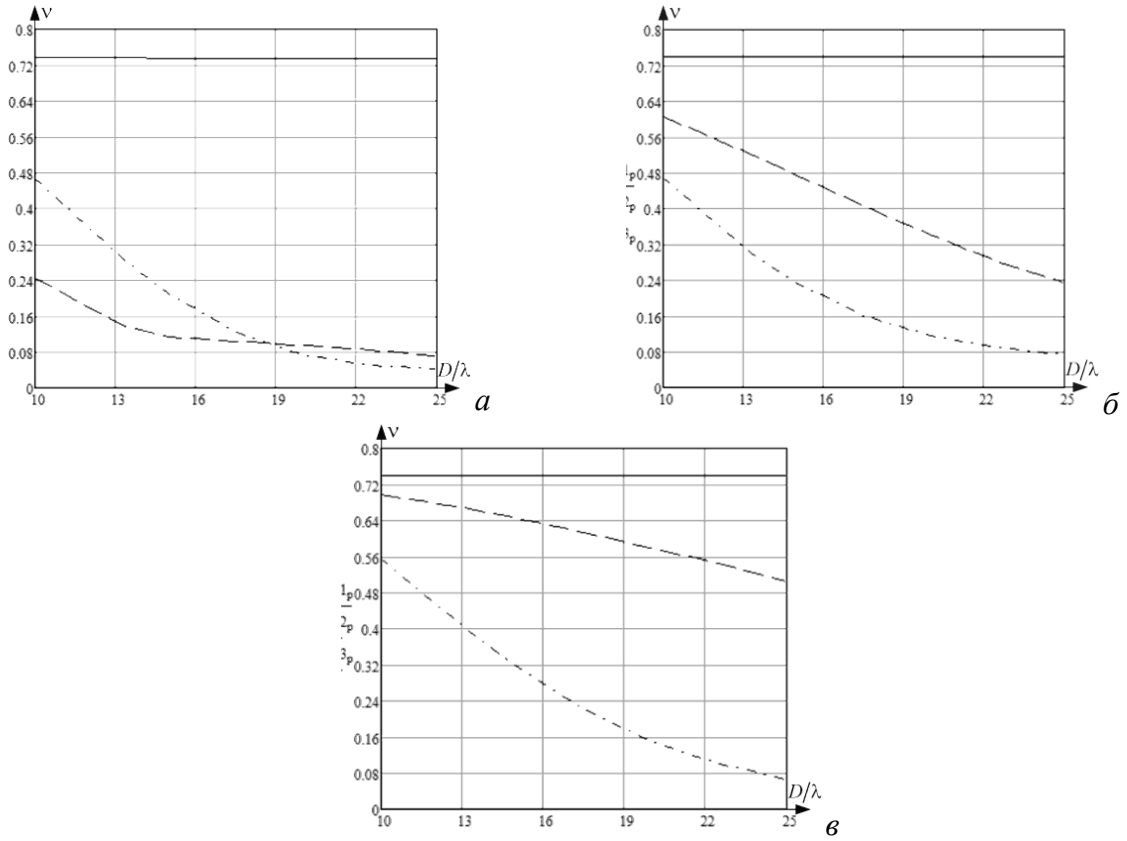


Рис. 4. Результат расчета зависимости аппертурного КИП от отношения D/λ при различном числе ребер зонтичной антенны: *а* – N_p = 8; *б* – N_p = 24; *в* – N_p = 16 (штриховая линия соответствует 1-му варианту построения антенны, сплошная линия – 2-му, штрихпунктирная – 3-му)

Заключение

Из полученных результатов (см. рис. 4) следует, что для зеркальных антенн с небольшим числом секций (ребер) применение вспомогательного зеркала в виде симметричной фигуры вращения (стандартного контррефлектора АДЭ) приводит к снижению КИП и лишь при относительно большом отношении $D/\lambda > 20$ является более предпочтительным по сравнению с однозеркальной системой. Увеличение числа ребер основного рефлектора приводит к повышению КИП двухзеркальной системы с вспомогательным зеркалом в виде симметричной фигуры вращения. Однако даже для достаточно большого числа ребер ($N_p = 24$) основного рефлектора КИП двухзеркальной антенны зонтичного типа с синтезом корректирующего зеркала по предложенному алгоритму превышает известные решения. При этом увеличение отношения D/λ не приводит к снижению КИП антенной системы. В целом проектирование двухзеркальных антенн зонтичного типа по схеме АДЭ с синтезом корректирующего зеркала по предложенному алгоритму позволяет улучшить

энергетические характеристики антенны, особенно для рефлекторов с небольшим числом ребер. Применение контррефлекторов подобного типа позволяет достигнуть КИП порядка 0,73. С учетом [5] и результатов исследований, представленных в настоящей работе, дополнительной отличительной особенностью двухзеркальных антенн зонтичного типа, построенных по схеме АДЭ с контррефлектором, синтезированным по разработанному алгоритму, является то, что в данном случае наиболее рациональной ДН облучателя является традиционная – типа $\cos^q(\theta)$ [3].

Список литературы

1. Hedgepeth J.M. Accuracy Potentials for Large Spase Antenna Reflectors with Passive Structure // J. Spacecraft. 1982. Vol. 19, № 3. P. 211–217.

2. Гряник М.В., Ломан В.И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. М.: Радио и связь, 1987. 72 с.

3. Гибридные зеркальные антенны / Н.С. Архипов, М.В. Гряник, В.И. Ломан, И.К. Нестеренко // Зарубежная радиоэлектроника. М.: Радио и связь, 1987. № 12. С. 62–78.

4. Гряник М.В., Ломан В.И. Электродинамические характеристики складных антенн зонтичного типа с корректирующим контррефлектором // Антенны: сборник статей / под ред. А.А. Леманского. М.: Радио и связь. 1989. Вып. № 36. С. 81–87.

5. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терёшин О.Н. Антенны УКВ: в 2 ч. / под ред. Г.З. Айзенберга. М.: Связь, 1977. Ч. 2. 262 с.

6. Алгоритм формирования кластерных групп облучателей гибридных зеркальных антенн / Н.С. Архипов, И.С. Полянский, А.С. Великих [и др.] // Телекоммуникации. 2010. № 10. С. 25–32.

7. Пат. № 2181519 Российская Федерация. Многолучевая неапланатическая гибридная зеркальная антенна / Архипов Н.С., Кочетков В.С., Тихонов А.В., Чаплыгин И.А., Щекотихин В.М. М.: ФИПС, 2002, Бюл. № 11.

8. Корн Г., Корн К. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970. 720 с.

9. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 520 с.

10. Seong-Bin Lim, Kyung-Kook Choi, Hak-Keun Choi. Analysis of Axially displaced ellipse Gregorian dual reflector antennas // The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. 2003. Vol. 11. P. 1161–1169.

Получено 18.11.13

N.S. Arkhipov, Doctor of Sciences, Associate Professor, Academy FSS Russia (Orel) (e-mail: van341@mail.ru)

I.S. Polyansky, Candidate of Sciences, Associate Professor, Academy FSS Russia (Orel) (e-mail: van341@mail.ru)

G.A. Yermishyn, Researcher, Academy FSS Russia (Orel) (e-mail: van341@mail.ru)

SYNTHESIS OF TWO-MIRROR REFLECTOR ANTENNAS CORRECTIVE UMBRELLA TYPE BUILT BY THE SCHEME SHIFTED GENERATOR (SCHEME ADE)

Synthesis algorithm for correcting two-mirror reflector antenna umbrella type built by the scheme shifted generator proposed in the article. The algorithm is based on the numerical solution of the extremal problem formed by gradient methods. The decision is made in the approximation of geometrical optics methods while minimizing phase errors introduced by the main reflector. Efficiency of the algorithm tested on concrete examples.

Key words: *two-mirror reflector antennas umbrella type built by the scheme shifted generator, synthesis algorithm for correcting mirrors, minimizing the phase errors.*

УДК 528.06:528.021.6

О.Г. Добросердов, канд. техн. наук, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: serfingk@yandex.ru)

А.М. Белицкий, инженер, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: serfingk@yandex.ru)

Е.О. Деренкова, инженер, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: serfingk@yandex.ru)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СУММАРНО-РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается способ определения местоположения объектов, основанный на измерении параметров эллиптических и гиперболических линий положения. Разработана математическая модель и представлены результаты исследования точностных характеристик многопозиционной суммарно-разностно-дальномерной радиотехнической системы.

Ключевые слова: математическая модель, многопозиционная радиотехническая система, частная точка засечки, точность определения местоположения.

***

Одним из важнейших требований, предъявляемых к радиотехническим системам различного назначения, является обеспечение заданной точности определения координат обслуживаемых объектов.

В последние годы неуклонно повышается интерес к многопозиционным радиотехническим системам (МРС), главной причиной актуальности которых является чрезвычайная широта и разнообразие их применения (в радиолокации, радионавигации, радиоуправлении, радиоастрономии, радиогеодезии и др.) с реализацией высокоточных характеристик, которые не под силу однопозиционным системам. В отечественной и зарубежной литературе, например [1-3], опубликовано значительное количество работ, посвященных отдельным вопросам теории и практики МРС. При этом наибольшее внимание уделено задачам статистического анализа и синтеза классических МРС, к которым относятся дальномерные, угломерные, угломерно-дальномерные и разностно-дальномерные системы. Менее исследованными являются системы, основанные на использовании эллиптических линий положения (ЛП). Частично такие системы для случая одно- и двухбазового вариантов их построения рассмотрены в работе [1].

Целью данной статьи является разработка математической модели и исследование точностных характеристик суммарно-разностно-дальномерной МРС для произвольного числа позиций в системе.

Рассмотрим в декартовой системе координат активную с активным ответом МРС, состоящую из запросно-ответного и n приемных каналов (рис. 1). Запросно-ответный канал образуют наземный запросчик, расположенный в точке $M\left(x_{\acute{K}}, Y_{\acute{K}}\right)$, и бортовой ответчик, установленный на объекте в точке $O\left(x_o, y_o\right)$, местоположение которого требуется определить. В точках с координатами $x_i, y_i\left(i=\overline{1,n}\right)$ расположены приемные позиции (ПП), обеспечивающие прием и обработку ответных сигналов, вызванных наземным запросчиком.

В составе ПП будем также выделять опорную ПП в точке $L\left(x_{on}, y_{on}\right)$, в которой осуществляется:

– прием сигналов наземного запросчика и бортового ответчика;

– прием сигналов бортового ответчика, ретранслированных остальными ПП;

– расчет параметров ЛП и координат объекта.

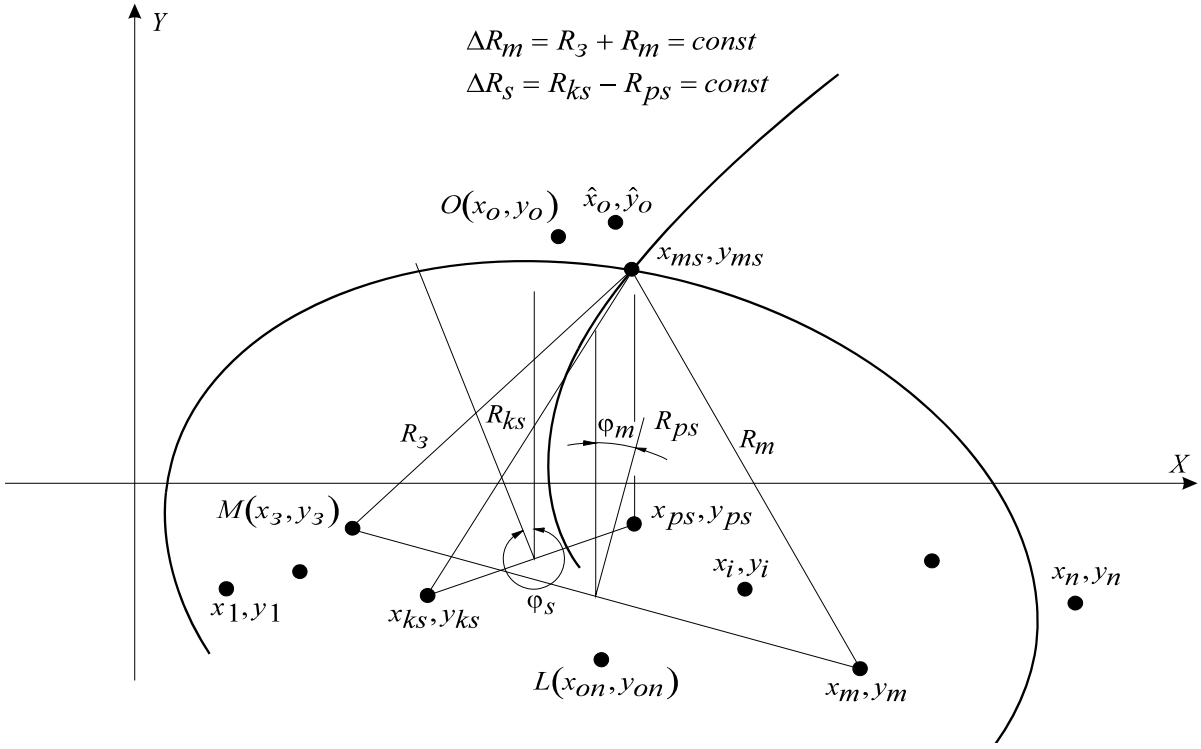


Рис. 1

С учетом сделанных предположений для произвольной m-й пары ПП, осуществляющих измерение параметров эллиптической ЛП, можно записать:

$$\Delta R_m = R_з + R_m = c * \Delta\tau_{зm} = \text{const},$$

где $R_з, R_m$ – расстояния от запросчика и m-й ПП до объекта соответственно;

$\Delta\tau_{зm}$ – время задержки между моментами прихода ответного сигнала и вызвавшего его запросного сигнала в m-ю ПП.

В свою очередь, на опорной ПП находится как

$$\Delta\tau_{зm} = t_m - t_o^m - t_{oз} + t_з^o - t_з^m,$$

где t_m – время приема на опорной ПП ретранслированного ответного сигнала от m-й ПП;

t_o^m – время распространения радиоволн от m-й до опорной ПП;

$t_{oз}$ – время приема на опорной ПП запросного сигнала;

$t_з^o$ – время распространения радиоволн от запросчика до опорной ПП;

$t_з^m$ – время распространения радиоволн от запросчика до m-й ПП.

Для произвольной s-й пары ПП с координатами $x_{ks}, y_{ks}; x_{ps}, y_{ps}$, осуществляющей измерение параметров гиперболической ЛП, можно записать

$$\Delta R_s = R_{ks} - R_{ps} = c * \Delta\tau_{зs} = \text{const},$$

где R_{ks}, R_{ps} – расстояния от k-й и p-й ПП в s-й паре до объекта соответственно;

$\Delta\tau_{зs}$ – время задержки между моментами прихода ответного сигнала в k-ю и p-ю ПП s-й пары.

Временная задержка $\Delta\tau_{зs}$ на опорной ПП рассчитывается по формуле

$$\Delta\tau_{зs} = t_{oks} - t_{ops} - t_o^{ks} + t_o^{ps},$$

где t_{oks}, t_{ops} – время приема на опорной ПП ретранслированных сигналов от k-й и p-й ПП в s-й паре соответственно;

t_o^{ks}, t_o^{ps} – время распространения радиоволн от опорной до k-й и p-й ПП в s-й паре соответственно.

В общем случае n-позиционной суммарно-разностно-дальномерной системой может быть измерено n эллипсов и $Q=(n-1)*n/2$ гипербол, которые могут образовать $H=n*Q$ частных точек засечек, создавая при этом избыточность координатной информации по пространству реализаций.

Используя подход, предложенный в работе [4], значения оптимальных по методу максимального правдоподобия оценок координат объекта суммарно-разностно-дальномерной МРС находятся так:

$$\hat{x}_o=-\frac{AE+CD}{BC-A^2};\ \hat{y}_o=-\frac{BE+AD}{BC-A^2},$$

а дисперсия оценок координат при этом равна:

$$\sigma^2_{мп}=\frac{B+C}{BC-A^2},$$

где $A=\sum\limits_{m=1}^{n}\sum\limits_{s=1}^{Q}\left(k^2_{ms}a_{ms}+L^2_{ms}b_{ms}\right);$

$$B=\sum_{m=1}^{n}\sum_{s=1}^{Q}\left(k^2_{ms}a^2_{ms}+L^2_{ms}b^2_{ms}\right);$$

$$C=\sum_{m=1}^{n}\sum_{s=1}^{Q}\left(k^2_{ms}+L^2_{ms}\right);$$

$$D=\sum_{m=1}^{n}\sum_{s=1}^{Q}\begin{bmatrix}\left(k^2_{ms}a_{ms}+L^2_{ms}b_{ms}\right)y_{ms}-\\-\left(k^2_{ms}a^2_{ms}+L^2_{ms}b^2_{ms}\right)x_{ms}\end{bmatrix};$$

$$E=\sum_{m=1}^{n}\sum_{s=1}^{Q}\begin{bmatrix}\left(k^2_{ms}a_{ms}+L^2_{ms}b_{ms}\right)x_{ms}-\\-\left(k^2_{ms}+L^2_{ms}\right)x_{ms}\end{bmatrix}.$$

В этих выражениях соответствующие переменные равны:

$$k_{ms}=\frac{A_{4ms}}{\sigma_{\Delta rm}\left(A_{1ms}A_{4ms}-A_{2ms}A_{3ms}\right)};$$

$$a_{ms}=\frac{A_{2ms}}{A_{4ms}};\quad b_{ms}=\frac{A_{1ms}}{A_{3ms}};$$

$$L_{ms}=\frac{A_{3ms}}{\sigma_{\Delta rs}\left(A_{1ms}A_{4ms}-A_{2ms}A_{3ms}\right)};$$

$$A_{1,2ms}=\frac{\partial y_{ms}}{\partial\Delta r_{m,s}};\quad A_{3,4ms}=\frac{\partial x_{ms}}{\partial\Delta r_{m,s}},$$

где x_{ms}, y_{ms} – координаты частной точки засечки, образованной пересечением m-го эллипса и s-й гиперболы;

$\sigma_{\Delta rm,s}$ – среднеквадратические ошибки (СКО) измерения m-го эллипса и s-й гиперболы соответственно.

Значения координат частных точек засечек находятся из решения следующей системы квадратных уравнений:

$$\begin{cases}\dfrac{\left[(x_{ms}-\eta_m)\cos\varphi_m+(y_{ms}-\xi_m)\sin\varphi_m\right]^2}{a^2_m}+\dfrac{\left[-(x_{ms}-\eta_m)\sin\varphi_m+(y_{ms}-\xi_m)\cos\varphi_m\right]^2}{a^2_m}=1;\\[2ex]\dfrac{\left[(x_{ms}-\eta_s)\cos\varphi_s+(y_{ms}-\xi_s)\sin\varphi_s\right]^2}{a^2_m}+\dfrac{\left[-(x_{ms}-\eta_s)\sin\varphi_s+(y_{ms}-\xi_s)\cos\varphi_s\right]^2}{b^2_s}=1,\end{cases},\quad(1)$$

где $a_{m,s}=\dfrac{\Delta r_{m,s}}{2};\ b_{m,s}=\left(c^2_{m,s}-a^2_{m,s}\right)^{\frac{1}{2}};$

$$c_m=\frac{1}{2}\left[(x_З-x_m)^2+(y_З-y_m)^2\right]^{\frac{1}{2}};$$

$$c_s=\frac{1}{2}\left[(x_{ps}-x_{ks})^2+(y_{ps}-y_{ks})^2\right]^{\frac{1}{2}};$$

$$\varphi_m=\operatorname{arctg}\frac{y_З-y_m}{x_З-x_m};$$

$$\varphi_s=\operatorname{arctg}\frac{y_{ps}-y_{ks}}{x_{ps}-x_{ks}},$$

$\eta_m=\dfrac{x_m+x_З}{2};\ \xi_m=\dfrac{y_m+y_З}{2}$ – координаты центра локальной системы координат m-го эллипса;

$\eta_s = \dfrac{x_{ks} + x_{ps}}{2}$; $\xi_s = \dfrac{y_{ks} + y_{ps}}{2}$ – координаты центра локальной системы координат s-й гиперболы;

$\varphi_{m,s}$ – углы поворота локальных систем координат m-го эллипса и s-й гиперболы относительно принятой.

Решением системы (1) относительно координаты y_{ms} являются действительные корни уравнения четвертой степени, которые в зависимости от знака дискриминанта D_{ms} кубической резольвенты имеют следующий вид:

• при $D_{ms} < 0$

$$y_{(1-4)ms} = \\ = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} k_{1ms}\sqrt{z_{1ms}} + k_{2ms}\sqrt{z_{2ms}} + \\ + k_{3ms}\sqrt{z_{3ms}} \end{pmatrix} - H_{ms}, \quad (2)$$

где коэффициенты $k_{(1-3)ms} = \pm 1$ выбираются исходя из условия

$$k_{1ms}\sqrt{z_{1ms}} * k_{2ms}\sqrt{z_{2ms}} * k_{3ms}\sqrt{z_{3ms}} = -g_{ms}.$$

В выражении (2) корни кубической резольвенты по формулам Кардано находятся как

$$z_{1ms} = 2\left[\sqrt[3]{\rho_{ms}}\cos\left(\gamma_{ms}/3\right) - \rho_{ms}/3\right];$$

$$z_{2ms} = 2\left[\sqrt[3]{\rho_{ms}}\cos\left(\gamma_{ms}/3 + 2\pi/3\right) - \rho_{ms}/3\right];$$

$$z_{3ms} = 2\left[\sqrt[3]{\rho_{ms}}\cos\left(\gamma_{ms}/3 + 4\pi/3\right) - \rho_{ms}/3\right],$$

где $\rho_{ms} = 1/27\left(p_{ms}^2 + 12r_{ms}\right)^{\frac{3}{2}}$;

$$\gamma_{ms} = \arccos\left[\frac{2p_{ms}\left(p_{ms}^2 - 36r_{ms}\right) + 27g_{ms}^2}{54\rho_{ms}}\right];$$

• при $D_{ms} > 0$ (после преобразований по формуле Муавра для вещественной части комплексно-сопряженных корней)

$$y_{(1-4)ms} = \frac{k_{1ms}}{2}\left(u_{ms} + v_{ms} - \frac{2}{3}p_{ms}\right) + \\ + k_{2ms}\left[\left(-\frac{u_{ms} + v_{ms}}{2} - \frac{2}{3}p_{ms}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(u_{ms} - v_{ms}\right)^2\right]^{\frac{1}{4}} \times \\ \times\cos\left(\frac{1}{2}\operatorname{arctg}\frac{\sqrt{3}\left(u_{ms} - v_{ms}\right)}{u_{ms} + v_{ms} + \frac{4}{3}p_{ms}}\right) - H_{ms},$$

где $k_{1,2ms} = \pm 1$; $u_{ms} = \left(-\dfrac{1}{2}M_{ms} + D_{ms}^{\frac{1}{2}}\right)^{\frac{1}{3}}$;

$$v_{ms} = \left(-\frac{1}{2}M_{ms} - D_{ms}^{\frac{1}{2}}\right)^{\frac{1}{3}};$$

$$M_{ms} = \frac{2}{3}p_{ms}^2\left(4r_{ms} - \frac{p_{ms}}{9}\right) - g_{ms}^2.$$

Величина дискриминанта кубической резольвенты вычисляется по формуле

$$D_{ms} = \frac{1}{4}M_{ms}^2 - \left(\frac{p_{ms}^2 + 12r_{ms}}{3}\right)^3;$$

• при $D_{ms} = 0$

$$y_{(1-4)ms} = k_{1ms}\left(u_{ms} - \frac{1}{3}p_{ms}\right) + \\ + k_{2ms}\left(-u_{ms} - \frac{2}{3}p_{ms}\right)^{\frac{1}{3}} - H_{ms},$$

где $k_{1,2ms} = \pm 1$; $u_{ms} = \left(-\dfrac{1}{2}M_{ms}\right)^{\frac{1}{3}}$.

В вышеперечисленных выражениях значения H_{ms}, p_{ms}, g_{ms} и r_{ms} находятся как

$$p_{ms} = \frac{T_{10ms}}{T_{8ms}} - \frac{3T_{9ms}^2}{8T_{8ms}^2}; \quad H_{ms} = \frac{T_{11ms}}{4T_{8ms}};$$

$$g_{ms} = \frac{T_{9ms}^3}{8T_{8ms}^2} - \frac{T_{9ms}T_{10ms}}{2T_{8ms}^2} + \frac{T_{11ms}}{T_{8ms}};$$

$$r_{ms} = \frac{3T_{9ms}^4}{256T_{8ms}^4} + \frac{T_{9ms}^2T_{10ms}}{16T_{8ms}^3} - \frac{T_{11ms}T_{9ms}}{4T_{8ms}^2} + \frac{T_{12ms}}{T_{8ms}},$$

где $T_{8ms} = T_{1ms}^2$;

$$T_{9ms} = 2T_{1ms}T_{2ms} - T_{4ms}^2 T_{6ms};$$

$$T_{10ms} = 2T_{1ms}T_{3ms} - T_{2ms}^2 - \\ - T_{4ms}\left(T_{10ms}T_{7ms} + 2T_{5ms}T_{6ms}\right);$$

$$T_{11ms} = 2\left(T_{2ms}T_{3ms} + T_{4ms}T_{5ms}T_{7ms}\right) - \\ - T_{5ms}^2 T_{6ms};$$

$$T_{12ms} = T_{3ms}^2 - T_{7ms}T_{5ms}^2.$$

В свою очередь,

$$T_{1ms} = \frac{A_s}{A_m}\left(\frac{2E_m^2}{A_m} - C_m\right) + C_s - \frac{2E_sE_m}{A_m};$$

$$T_{2ms} = 2\left[\begin{array}{l}\frac{A_s}{A_m}\left(\frac{2B_mE_m}{A_m} - D_m\right) - \\ -\frac{1}{A_m}\left(B_sE_m + E_sB_m\right) + D_s\end{array}\right];$$

$$T_{3ms} = \frac{2B_m}{A_m}\left(\frac{A_sB_m}{A_m} - B_s\right) - \frac{A_sF_m}{A_m} + F_s;$$

$$T_{4ms} = \frac{2}{A_m}\left(\frac{A_sE_m}{A_m} - E_s\right);$$

$$T_{5ms} = \frac{2}{A_m}\left(\frac{A_sB_m}{A_m} - B_s\right);$$

$$T_{6ms} = B_mE_m - A_mD_m;$$

$$T_{7ms} = B_m^2 - A_mF_m.$$

В этих выражениях находим переменные $A_{m,s} - F_{m.s}$:

$$A_{m,s} = b_{m,s}^2\cos^2\varphi_{m,s} \pm a_{m,s}^2\sin^2\varphi_{m,s};$$

$$B_{m,s} = \mp\eta_{m,s}\left(a_{m,s}^2\sin^2\varphi_{m,s} \pm b_{m,s}^2\cos^2\varphi_{m,s}\right) \pm \\ \pm x_{m,s}\cos\varphi_{m,s}\, sin\,\varphi_{m,s}\left(a_{m,s}^2 \mp b_{m,s}^2\right);$$

$$C_{m,s} = b_{m,s}^2\sin^2\varphi_{m,s} \pm a_{m,s}^2\cos^2\varphi_{m,s};$$

$$D_{m,s} = \pm\eta_{m,s}\cos\varphi_{m,s}\sin\varphi_{m,s}\left(a_{m,s}^2 \mp b_{m,s}^2\right) \mp \\ \mp x_{m,s}\left(a_{m,s}^2\sin^2\varphi_{m,s} \pm b_{m,s}^2\cos^2\varphi_{m,s}\right);$$

$$E_{m,s} = \eta_{m,s}^2\left(b_{m,s}^2\sin^2\varphi_{m,s} \pm a_{m,s}^2\cos^2\varphi_{m,s}\right) + \\ + x_{m,s}^2\left(b_{m,s}^2\sin^2\varphi_{m,s} \pm a_{m,s}^2\cos^2\varphi_{m,s}\right) + \\ + 2\eta_{m,s}\cos\varphi_{m,s}\sin\varphi_{m,s}\left(b_{m,s}^2 \mp a_{m,s}^2\right),$$

где верхний знак суммирования или вычитания соответствует переменным с индексом m, нижний – s.

Из системы уравнений (1) с учетом $y_{m,s}$ значение координаты $x_{m,s}$ находится как

$$x_{1,2ms} = \frac{1}{A_m}\Big\{-\left(B_m + E_my_{ms}\right) + \\ + k_{5ms}\Big[\left(B_m + E_my_{ms}\right)^2 - \\ - A_m\Big\rangle y_{ms}\left(C_mY_{ms} + 2D_m\right) + F_m\Big\langle\Big]^{\frac{1}{2}}\Big\},$$

где $k_{5ms} = \pm 1$.

Как следует из приведенных выражений, решение системы квадратных уравнений (1) может давать до восьми различных корней, что в предельном случае соответствует восьми возможным точкам пересечения двух пар эллипсов и гипербол. Для нахождения единственного решения, соответствующего истинному местоположению объекта, необходимо использование параметров дополнительного эллипса или гиперболы, измеренных, например, парой ПП с координатами x_m, y_m и x_i, y_i.

Результаты численного расчета точности определения местоположения объектов суммарно-разностно-дальномерной МРС представлены в таблице. В этой же таблице для сравнительного анализа приведены результаты расчета точностных характеристик суммарно-дальномерной и разностно-дальномерной МРС.

Расчеты производились для различных значений дальности D до объекта при его расположении на нормали $\alpha = 0^\circ$ к центру базы и на краях $\alpha = 75^\circ$ зоны местоопределения МРС, где α – угол, под которым «видна» база системы, в составе трех ($n = 3$) равноудаленных друг от друга ПП на общей базе B, равной 250 км. При этом также полагалось:

– запросчик расположен по нормали к центру базы системы и удален от опорной ПП на 50 км;

– систематические ошибки измерения параметров ЛП отсутствуют, а случайные ошибки взаимонезависимы и подчинены нормальному закону с известной дисперсией;

– СКО измерения параметров эллиптических и гиперболических линий положения равна $\sigma_{\Delta\tau m,s}$ = 1 мкс.

Из анализа данных, приведенных в таблице, следует, что по своим точностным характеристикам суммарно-разностно-дальномерная МРС существенно превосходит суммарно-дально-мерную и разностно-дальномерную системы, причем это преимущество становится более существенным с увеличением α и дальности до объекта.

Таблица

Результаты численного расчёта точности определения местоположения объектов суммарно-разностно-дальномерной МРС

Вид МРС	$\sigma_{мп}$ [км] при n = 3, B = 250 км									
	D [км] при $\alpha = 0^\circ$					D [км] при $\alpha = 75^\circ$				
	100	200	300	400	500	100	200	300	400	500
Разностно-дальномерная	0,41	1,01	1,96	3,31	5,04	1,28	8,43	25,28	47,04	77,28
Суммарно-дальномерная	0,35	0,37	0,41	0,51	0,63	0,75	0,79	1,35	1,86	2,39
Суммарно-разностно-дальномерная	0,12	0,14	0,17	0,22	0,26	0,33	0,28	0,52	0,73	0,97

На рис. 2 приведены зависимости точности местоопределения суммарно-разностно-дальномерной МРС от дальности до объекта для различных значений α при расширении базы до 500 км и n = 3.

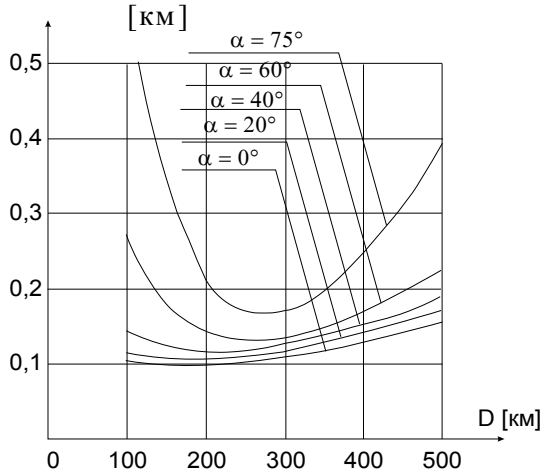


Рис. 2

На рис. 3 представлены зависимости $\sigma_{мп}$ от n на этой же базе для различных значений дальности до объекта при его расположении на нормали к центру базы системы ($\alpha = 0^\circ$).

Приведенные результаты расчетов свидетельствуют о существенной зависимости точности определения местоположения объектов от величины базы и количества ПП МРС, реализующий суммарно-разностно-дально-мерный метод координатометрии. Так, расширение базы в 2 раза при n = 3 в зависимости от D и α ведет к увеличению точности местоопределения в 1,2–2,4 раза, а увеличение количества ПП на этой же базе от 3 до 15 при $\alpha = 0^\circ$ и различных значениях D в 6,9–8,5 раза, причем наибольший приоритет точности наблюдается при увеличении n от 3 до 9–12.

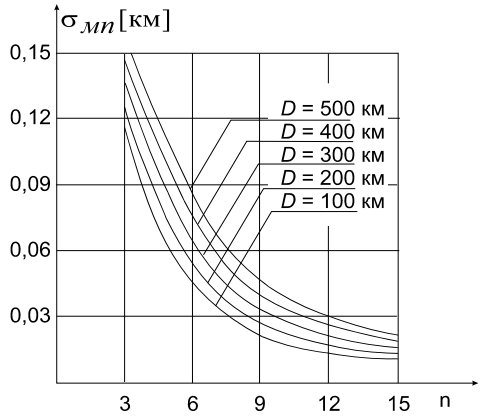


Рис. 3

Выводы

1. Предложена математическая модель многопозиционной суммарно-разностно-дальномерной радиотехнической системы, в которой местоположение объектов определяется по пересечению эллиптических и гиперболических линий положения.

2. Показано, что комплексирование эллиптических и гиперболических линий положения в суммарно-разностно-дальномерной МРС ведет к существенному повышению точности определения координат объектов по сравнению с суммарно-дальномерной и разностно-дальномерной системами.

Список литературы

1. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. проф. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986.

2. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1983.

3. Torrieri D.J. Statistikal theory of passive location system // IEE Trans. 1984. Vol. AES-19, № 2. P. 183–198.

4. Гришин Е.С., Добросердов О.Г. Общее решение задачи нахождения оценок координат источников излучений радиотехническими методами // Научно-технический сборник ФГУП «Курский НИИ» МО РФ. 1995. № 2 (119).

Получено 10.12.13

O.G. Dobroserdov, Candidate of Sciences, Southwest State University (Kursk) (e-mail: serfingk@yandex.ru)

A.M. Belitsky, Engineer, Southwest State University (Kursk) (e-mail: serfingk@yandex.ru)

E.O. Derenkova, Engineer, Southwest State University (Kursk) (e-mail: serfingk@yandex.ru)

MATHEMATICAL MULTIPOSITION MODEL OF TOTALLY DIFFERENTIAL DISTANCE-MEASURING RADIO ENGINEERING SYSTEM

The method of objects' localization based on the measurement of elliptic and hyperbolic lines -of-position parameters is examined. Mathematical model was developed and the results of research of accuracy characteristics of multiposition totally differential distance-measuring radio engineering system were shown.

Key words: *mathematical model, multiposition radio engineering system, frequent notch point, accuracy of location determination.*

УДК 528.06:528.021.6

О.Г. Добросердов, канд. техн. наук, Юго-Западный государственный университет (Курск) (e-mail: serfingk@yandex.ru)

А.М. Белицкий, инженер, Юго-Западный государственный университет (Курск) (e-mail: serfingk@yandex.ru)

Е.О. Деренкова, инженер, Юго-Западный государственный университет (Курск) (e-mail: serfingk@yandex.ru)

ПОДХОД К СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОМУ СИНТЕЗУ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, РЕАЛИЗУЮЩИХ УГЛОМЕРНО-ВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КООРДИНАТОМЕТРИИ

Рассматривается решение задачи структурно-параметрического синтеза многопозиционных радиотехнических систем на основе агрегативно-декомпозиционного подхода, в основу которого положен принцип последовательного синтеза допустимых вариантов построения отдельных элементов, частей и системы в целом с последующим выбором наилучшего варианта ее реализации и развития.

Ключевые слова: *структура, многопозиционная радиотехническая система, структурно-параметрический синтез, альтернативно-графовая формализация, критерий оценки эффективности.*

***

В настоящее время известны различные подходы к решению задачи синтеза структуры сложных систем, основанные на методах декомпозиции, координации и

агрегации, рационального построения структуры организационных систем, агрегативного описания сложных систем, системного внешнего проектирования методами информационных цепей и пространства состояний, структурного синтеза с использованием метаграмматик, морфологического анализа и синтеза, системного внешнего проектирования [1–4] и другие. Задачи синтеза структуры сложных систем тесно взаимосвязаны с задачами их функционирования. Характер взаимодействия между элементами структуры системы и распределение функций между ними во многом определяются принятыми принципами и алгоритмами управления, степенью централизации при выработке управляющих воздействий, согласованностью целей подсистем различного уровня. Моделям оптимизации функционирования сложных систем с многоуровневой иерархической структурой посвящены работы по информационной теории сложных систем, по методам управления активными элементами [1, 2] и другие.

Для решения задачи структурно-параметрического синтеза многопозиционных радиотехнических систем (МРС), реализующих угломерно-временные методы, предлагается использование агрегативно-декомпозиционного подход, в основу которого положен принцип последовательного синтеза допустимых вариантов построения отдельных элементов, частей и системы в целом с последующим выбором наилучшего варианта ее реализации и развития [3].

В соответствии с данным подходом решение задачи структурно-параметрического синтеза МРС включает следующие этапы:

– формализацию целей, задач, функций, элементов системы и их взаимосвязей;

– выбор типовых элементов структуры системы и вариантов реализуемых ими функций;

– формализацию отображения множества реализуемых функций на множество взаимосвязанных элементов;

– агрегирование элементов структуры и решаемых ими функциональных задач на соответствующем уровне детализации и всей системы в целом;

– выбор оптимального (рационального) варианта построения системы при заданном критерии оптимальности;

– планирование порядка создания (траектории развития) выбранного варианта системы.

При постановке задачи структурно-параметрического синтеза МРС воспользуемся альтернативно-графовой формализацией, в которой различные варианты решаемых задач, функций и элементов МРС задаются в виде вершин альтернативных графов, а дуги в графах отражают характер взаимосвязей между ними.

На рисунке граф $G_A = (N_A, L_A)$ описывает взаимосвязь множества решаемых задач с целевой функцией МРС, где вершина A_1 задает целевую функцию, состоящую в определении местоположения объектов с требуемыми показателями качества; вершина A_2 соответствует задаче навигации воздушных объектов, A_3 – задаче навигации наземных объектов; A_4 – задаче навигации надводных объектов.

Граф $G_F = (N_F, L_F)$ задает альтернативные варианты реализуемых МРС функций при решении задач координатометрии и взаимосвязей между ними, где N_F – множество вершин графа, отражающих варианты функциональных задач; L_F – множество дуг графа, отражающих логические взаимосвязи между реализуемыми функциями и последовательность их выполнения.

В частности, вершины $F_1 - F_5$ на уровне отдельных позиций МРС формализуют измерение параметров следующих видов линий положения (ЛП):

– F_1 – линии постоянного пеленга на источник излучения;

– F_2 – окружности;

– F_3 – гиперболы;

– F_4 – эллипса;

– F_5 – параболы.

На уровне МРС в целом вершины $F_6 - F_{15}$ формализуют реализацию и комплексирование следующих угломерно-временных методов местоопределения:

– F_6 – угломерного;

– F_7 – разностно-угломерного;

– F_8 – разностно-дальномерного;

– F_9 – суммарно-дальномерного;

– F_{10} – параболического;

– F_{11} – угломерно-разностно-дальномерного;

– F_{12} – угломерно-разностно-угломерного;

– F_{13} – угломерно-суммарно-дальномерного;

– F_{14} – разностно-дальномерно-угломерного;

– F_{15} – разностно-суммарно-дальномерного;

– F_{16} – комплексирование методов местоопределения, задаваемых вершинами $F_6 - F_{16}$.

Граф $G_S = (N_S, L_S)$ задает альтернативные варианты состава элементов структуры МРС и взаимосвязей между ними, где S_1 – вершина графа, описывающая пункт сбора и обработки координатной информации МРС; $S_2 - S_K$ – вершины графа, описывающие множество позиций добывания МРС.

Введем также операцию отображения $\Rightarrow$ множества элементов графа G_F на множестве элементов графа G_S. Оптимальное отображение должно обеспечивать достижение требуемых значений целевой функции, задаваемой вершинами графа G_A, при выполнении ограничений на задаваемое множество элементов графов G_F и G_S.

Таким образом, задача структурно-параметрического синтеза МРС сводится к следующему. Имеем:

граф G_S – граф, задающий варианты состава элементов структуры МРС и взаимосвязей между ними;

$G_S^* \in G_S$ – подграф, задающий один из возможных вариантов состава элементов структуры МРС с их взаимосвязями;

G_F – граф, задающий состав и взаимосвязи множества функциональных задач;

$G_F^* \in G_F$ – подграф, задающий один из возможных вариантов реализуемых МРС-функций;

$\Rightarrow$ – операция отображения подграфа G_F^* на подграф G_S^*;

Π – показатель оценки эффективности различных вариантов построения МРС;

$\Pi_{тр}$ – критерий оценивания эффективности, задаваемый вершинами графа G_A.

В результате структурно-параметрического синтеза МРС необходимо найти такой вариант его структурно-функциональной организации, который удовлетворяет условию

$$\Pi_{тр} = \Pi\left\{\left(G_F^* \in G_F\right) \Rightarrow \left(G_S^* \in G_S\right)\right\}. \quad (1)$$

$$(N_F, L_F, N_S, L_S) \longrightarrow \min$$

В соответствии с выражением (1) принципиальным вопросом при решении задачи структурно-параметрического синтеза МРС является выбор показателей критериев оценки их эффективности. В качестве такого показателя предлагается использовать количество объектов, обслуживаемых МРС, с требуемой точностью их местоопределения. При этом для оценки точности местоопределения может быть использован подход, предложенный в работе [6].

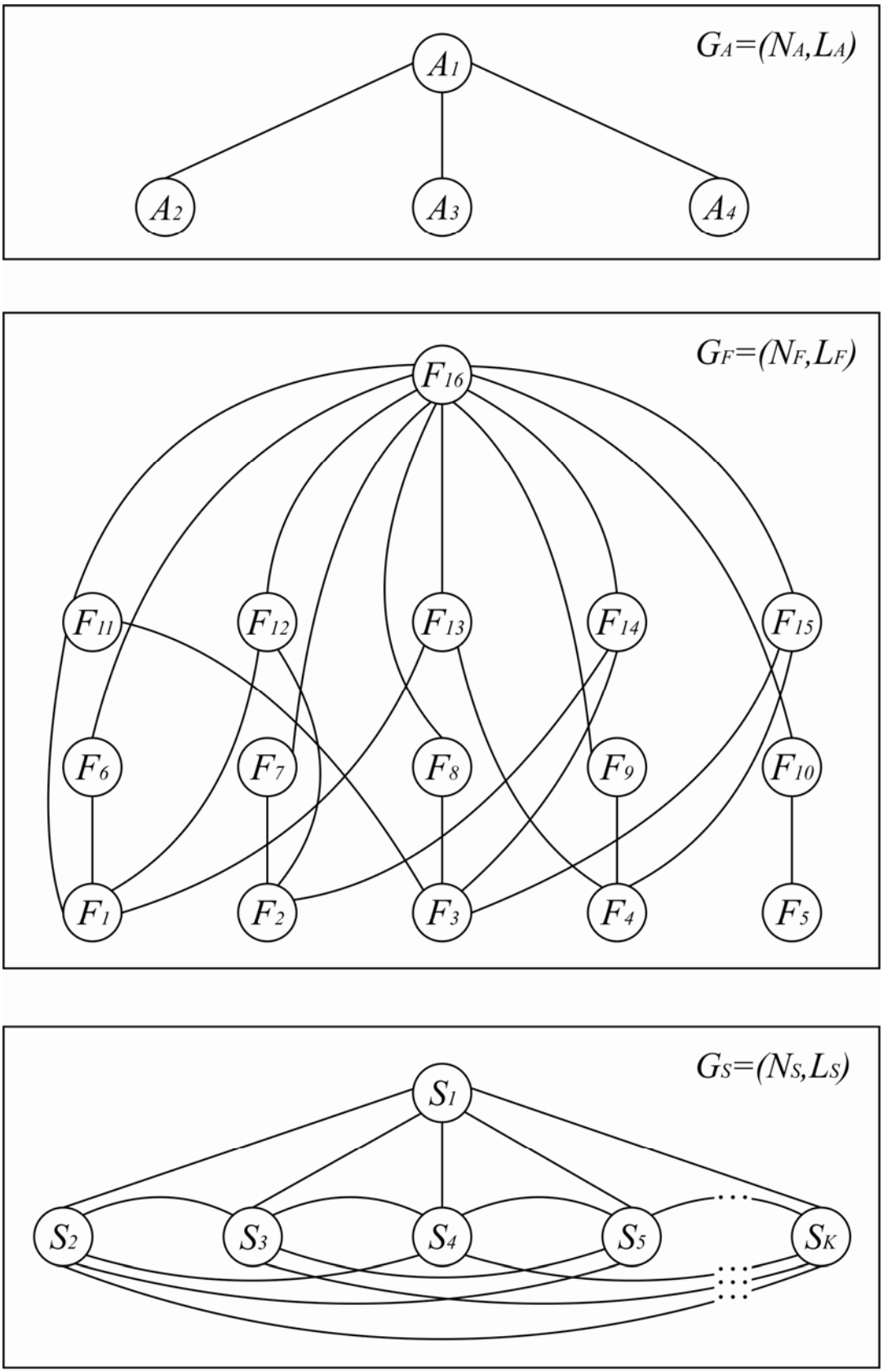


Рис. Альтернотивнографовая формализация задачи структурно-параметрического синтеза МРС

В соответствии с данным подходом среднеквадратическая ошибка определения координат объектов, полученная с использованием матрицы информации по Фишеру, находится как:

$$\sigma_M^2 = \frac{B+C}{BC-A^2},$$

где $A = \sum_{m=1}^{u}\sum_{s=n}^{v}\left(K_{ms}^2 a_{ms} + L_{ms}^2 b_{ms}\right);$

$$B = \sum_{m=1}^{u}\sum_{s=n}^{v}\left(K_{ms}^2 a_{ms}^2 + L_{ms}^2 b_{ms}^2\right);$$

$$C = \sum_{m=1}^{u}\sum_{s=n}^{v}\left(K_{ms}^2 + L_{ms}^2\right);$$

$$D = \sum_{m=1}^{u}\sum_{s=n}^{v}\left[\left(K_{ms}^2 a_{ms} + L_{ms}^2 b_{ms}\right) Y_{ms} - \right.$$
$$\left. -\left(K_{ms}^2 a_{ms}^2 + L_{ms}^2 b_{ms}^2\right) X_{ms}\right];$$

$$E = \sum_{m=1}^{u}\sum_{s=n}^{v}\left[\left(K_{ms}^2 a_{ms} + L_{ms}^2 b_{ms}\right) X_{ms} - \right.$$
$$\left. -\left(K_{ms}^2 + L_{ms}^2\right) Y_{ms}\right].$$

В этих выражениях

$$K_{ms} = \frac{A_{4ms}}{\sigma_{\xi m}(A_{1ms}A_{4ms} - A_{2ms}A_{3ms})};$$

$$L_{ms} = \frac{A_{3ms}}{\sigma_{\xi s}(A_{1ms}A_{4ms} - A_{2ms}A_{3ms})};$$

$$a_{ms} = \frac{A_{2ms}}{A_{4ms}}; \quad b_{ms} = \frac{A_{1ms}}{A_{3ms}},$$

где $\sigma_{\xi m}$, $\sigma_{\xi s}$ – среднеквадратические ошибки измерения параметров ЛП m-й и s-й позиций (парами позиций) соответственно;

X_{ms}, Y_{ms} – координаты частной точки «засечки», образованной пересечением m-й и s-й ЛП;

n, u и v – переменные, зависящие от количества частных точек «засечек», образуемых при реализации конкретного метода местоопределения.

Коэффициенты $A_{1ms} - A_{4ms}$ имеют следующий вид:

$$A_{1ms} = \frac{\partial Y_{ms}}{\partial \xi_m};$$

$$A_{2ms} = \frac{\partial Y_{ms}}{\partial \xi_s};$$

$$A_{3ms} = \frac{\partial X_{ms}}{\partial \xi_m};$$

$$A_{4ms} = \frac{\partial X_{ms}}{\partial \xi_s}.$$

Как следует из приведенных выражений, для оценки точности координат объектов МРС угломерно-временными методами в зависимости от вида измеряемых ЛП необходимо получить соответствующие выражения для координат частных точек «засечек» X_{ms}, Y_{ms} и найти значения коэффициентов $A_{1ms} - A_{4ms}$.

Полученные массивы значений среднеквадратических ошибок во всей зоне действия МРС с учетом выражения (1) на основе агрегативно-декомпозиционного подхода и альтернативно-графовой формализации позволяют решать задачу структурно-параметрического синтеза угломерно-временных многопозиционных радиотехнических систем.

Список литературы

1. Лэсдон Дж. Оптимизация больших систем. М.: Наука, 1975.

2. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978.

3. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных системы. М.:Наука, 1982.

4. Атакищев О.И., Добросердов О.Г. Особенности применения метаграмматик для формального описания структуры сложных технических систем // Методы и средства систем обработки информации: сборник научных статей / Курск. гос. техн. ун-т. 1997. № 1.

5. Многопозиционные радиотехнические системы / В.С. Кондратьев, А.Ф. Котов, Л.М. Марков [и др.]; под. ред. проф. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986.

6. Гришин Е.С., Добросердов О.Г. Общее решение задачи нахождения оценок координат источников излучений радиотехническими методами // Научно-технический сборник ФГУП «Курский НИИ» МО РФ. 1995. №2 (119).

Получено 10.12.13

O.G. Dobroserdov, Candidate of Sciences, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: serfingk@yandex.ru)

A.M. Belitsky, Engineer, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: serfingk@yandex.ru)

E.O. Derenkova, Engineer, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: serfingk@yandex.ru)

THE APPROACH TO THE STRUCTURAL PARAMETRIC SYNTHESIS OF MULTIPOSITION RADIO ENGINEERING SYSTEM REALISING GONIOMETRIC AND TIME METHODS OF KOORDINATOMETRIYA

The task solution of structural parametric synthesis of multiposition radio engineering systems based on the aggregate decompositional approach is examined. The basis of such approach is the principle of consecutive synthesis of the admissible variants of creation of elements, parts and the system itself with the subsequent choice of the best variant of its development and realization.

Key words: *structure, multiposition radio engineering system, structural parametric synthesis, alternative and graph formalization, criteria of assessment efficiency.*

УДК 004.891.3:004.93'12

Н.А. Кореневский, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск) (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

Башир Аббас Самаха, аспирант, Юго-Западный государственный университет (Курск) (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

С.А. Горбатенко, канд. техн. наук, доцент, Курский институт социального образования (филиал) Российского государственного социального университета

СИНТЕЗ ГИБРИДНЫХ НЕЧЕТКИХ ПРАВИЛ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ, ОЦЕНКИ И УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ЗДОРОВЬЯ В ЭКОЛОГИЧЕСКИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ РЕГИОНАХ

В работе рассматривается метод синтеза нечетких решающих правил, работающих с разной структурой данных в условиях отсутствия точных аналитических моделей, описывающих состояние здоровья людей, проживающих и работающих в экологически неблагоприятных условиях. Предлагаемый метод основан на объединении элементов теории нечеткой логики принятия решений, теории распознавания образов и методологии разведочного анализа.

Ключевые слова: *нечеткие правила, анализ, управление, состояние здоровья, экологическая обстановка.*

***

Несмотря на большое внимание, уделяемое государством проблеме экологии и её влияния на состояние здоровья человека, проблема борьбы с заболеваниями, вызываемыми вредным воздействием экологических факторов, остается актуальной и требующей пристального внимания специалистов различных профессий. В частности, одним из перспективных направлений такой работы является использование современных математических методов, информационных и интеллектуальных технологий для решения задач прогнозирования диагностики и управления состоянием здоровья человека, находящегося в экологически неблагоприятной обстановке.

С математической точки зрения человека, контактирующего с внешней средой, следует рассматривать как сложную открытую систему, которую практически невозможно описать с помощью точных аналитических моделей. В этих условиях для построения моделей описания поведения и управления состоянием здоровья человека чаще всего используют теорию статистических решений, теорию распознавания образов и нечеткую логику принятия решений [1, 2, 3, 4, 6, 7].

Дополнительными особенностями анализа состояния здоровья человека является то, что решения приходится принимать в условиях неполного описания объектов, разнотипная информация поступает поэтапно и на каждом этапе её получения необходимо принятие промежуточных решений, постепенно доводя качество решаемых задач до требуемых показателей. При этом границы исследуемых классов состояний часто пересекаются при отсутствии точных представлений о характере и величине этих пересечений.

Работами кафедры биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ) было показано, что при перечисленных и ряде других условий, характеризующих задачи принятия решений о состоянии здоровья человека, целесообразно использовать подход, объединяющий элементы теории нечеткой логики принятия решений, теории распознавания образов и методы разведочного анализа [2, 3].

В качестве базового элемента математических моделей принятия решений рекомендуется использовать функции уверенностей $f_{\omega_\ell}(x_i)$ в исследуемых гипотезах ω_ℓ (классах состояний) с базовыми переменными x_i, вводимыми аналогично функциям принадлежностей к нечетким множествам А $\mu_A(x_i)$. Основное отличие $f_{\omega_\ell}(x_i)$ от $\mu_A(x_i)$ состоит в том, что функция уверенности с областью определения на интервале [0,1] вводится не по отношению к классическому понятию множества, а по отношению к такому понятию теории распознавания образов, как класс состояния здоровья человека.

Таким образом, функция уверенности представляет собой меру доверия (степень принадлежности) к исследуемым классам состояний, описываемых наборами признаков x_i. Если объект исследования представляется вектором (набором) признаков $X = x_1,...x_i,...,x_n$, то при известных многомерных функциях уверенности $f_{\omega_\ell}(X)$ решение принимается в пользу гипотезы ω_ℓ с наибольшим значением соответствующей функции. Однако получить аналитическое выражение многомерных функций $f_{\omega_\ell}(X)$ практически невозможно, поскольку в её «создании» принимают участие эксперты предметной области, часто недостаточно хорошо владеющие соответствующими математическими знаниями. Кроме того, сюда «добавляются» те же сложности, что и при построении многомерных функций распределения классов состояний в рамках статистической теории распознавания образов.

С учетом этого наиболее перспективным представляется подход, когда с учетом мнения высококвалифицированных экспертов получают функции уверенностей в классификации отдельно по каждому из информативных признаков $f_{\omega_\ell}(x_i)$ или по специально выбираемой группе Y_j информативных признаков $f_{\omega_\ell}(Y_j)$, а решающие правила для всего используемого пространства признаков получают путем агрегации частных функций принадлежностей в финальные решающие правила с расчетом коэффициентов уверенности КУ$_{\omega_\ell}$ в гипотезах ω_ℓ:

$$\text{КУ}_{\omega_\ell} = F_\ell\left[f_{\omega_\ell}(a_i, x_i), f_{\omega_\ell}(b_j, Y_j)\right], \quad (1)$$

где F_ℓ – функция агрегации для гипотезы ω_ℓ;

a_i, b_j – векторы настраиваемых параметров, обеспечивающих максимальное качество принятия решений по гипотезе ω_ℓ.

При этом форму и параметры используемых функций уверенностей и вид функции агрегации выбирают в ходе синтеза решающих правил по критерию минимума ошибок в принятии решений с использованием информации о структуре исследуемых классов в многомерном пространстве признаков.

Теоретической основой для перехода от многомерных функций уверенности к системам одномерных функций является известная теорема Арнольда-Колмогорова, согласно которой любая непрерывная функция n переменных *f*, заданная на единичном кубе *n*-мерного пространства $I^n = I \times I \times ... I$, может быть записана в форме

$$f(x_1, x_2, ...x_n) = \sum_{q=1}^{2n+1} h_q\left(\sum_{p=1}^{n} \varphi_q^p(x_p)\right), \quad (2)$$

где функции $h_q(u)$ – непрерывные функции одной переменной, а функции $\varphi_q^p(x_p)$ – фиксированные возрастающие, непрерывные, определенные на I = [0,1] стандартные (не зависящие от выбора функции *f*) функции.

Характерной особенностью задач оценки и управления состоянием здоровья людей, находящихся в условиях действия неблагоприятных экологических факторов, является необходимость учета двух групп информативных признаков (двух подпространств).

Первую группу признаков получают традиционно для медицинской практики способами. Это данные опросов, осмотров, инструментальных и классических лабораторных исследований.

Вторая группа признаков характеризует факторы внешней среды, которые отрицательно воздействовали на организм человека. При этом существенным является не только состав факторов риска, но и концентрация, интенсивность и время их воздействия.

С учетом перечисленных особенностей предлагается четырёхэтапная процедура синтеза соответствующих гибридных решающих правил, «работающих» в гетерогенном пространстве признаков.

На первом этапе производится разведочный анализ, позволяющий изучить структуру классов в пространстве информативных признаков, имея в виду под структурой взаимоположение объектов различных классов на обучающей выборке.

Для проведения разведочного анализа с целью изучения структуры исследуемых классов нами разработан специальный пакет прикладных программ, решающий следующие задачи:

– выделение характерных точек обучающей выборки (многомерных центров классов и выделяемых объектов, групп наиболее близких и наиболее далеких объектов между парами различных классов, казуистических и артефактных объектов);

– расчет расстояний между характерными точками и между всеми заданными точками как внутри своего класса, так и до точек чужого класса;

– различные методы отображения многомерных данных в двумерные пространства с сохранением выбираемых структурных свойств исследуемых объектов (сохранение близких расстояний, сохранение далеких расстояний, сохранение структур задаваемых ядер и т.д.);

– построение гистограмм распределений объектов исследуемых классов на координатах признаков (признаковые гистограммы);

– построение гистограмм распределения объектов исследуемых классов на шкалах, определяемых как меры близости до эталонных многомерных структур (точек, гиперплоскостей, гиперкубов, гиперсфер и т.д.) (дистальные гистограммы);

– определение исходных координат объектов по выбираемым участкам гистограмм и областям отображающих пространств;

– определение группировок объектов в многомерном пространстве признаков;

– определение областей пересечений различных классов в исходном пространстве с описанием структурных особенностей этих областей [2, 4, 5].

В ходе разведочного анализа выясняются: возможность и целесообразность решения задачи распознавания в её геометрической интерпретации; возможности линейного или кусочно-линейного разделения классов, наличие «вложенных» структур классов типа «шар в шаре», «шар в чаше», «эллипсоид в шаре»; наличие зон пересечения классов, их типы и структура и т.д.

Знание различных характеристик структурных особенностей классов позволяет обоснованно под структуру классов: выделить подпространства, где с точки зрения пользователя и достигаемых результатов удобно и целесообразно построить частные нечеткие решающие правила; выбрать тип базовых переменных и характеристики функций уверенности; из частных решающих правил по-

строить агрегирующее правило, обеспечивающее требуемое качество принятия решений.

На втором этапе под известную структуру классов и типы признаков выбираются базовые переменные и параметры функций уверенностей решающих задачи классификации по подпространствам и областям исходного пространства признаков. При этом выбор осуществляется с таким расчетом, чтобы при заданной сложности классификатора каждая функция уверенности и (или) частное решающее правило типа (1) на каждом технологическом шаге принятия решений обеспечивали максимально возможное качество принятия решений.

На третьем этапе функции уверенностей и (или) частные решающие правила агрегируются в финальные решающие правила, обеспечивающие требуемое качество принятия решений.

Для решения ряда практических задач по оценке и управлению состоянием здоровья человека вместе с информацией о принадлежности исследуемых объектов к тому или иному классу состояний целесообразно иметь информацию о степени выраженности того или иного состояния. Например, при оценке состояния человека может быть поставлен вопрос об уровне его утомления, психоэмоционального напряжения, степени тяжести или стадии заболевания и т.д.

В общем виде задача оценки степени выраженности того или иного заболевания, так же как и задача классификации, является многомерной и носит нечеткий характер. С учетом этого, если на экспертном уровне по признаку x_i (комплексному показателю Y_j) определяются функции степени (уровня, стадии) выраженности свойства $\eta_q - \varphi_{\eta_q}(x_i)$ и (или) $\varphi_{\eta_q}(Y_j)$, то аналогично (1) может быть получена соответствующая многомерная оценка степени выраженности свойства $\eta_q - SV_{\eta_q}$:

$$SV_{\eta_q} = F_q\left[\varphi_{\eta_q}(c_i, x_i),\ \varphi_{\eta_q}(d_j, Y_j)\right]. \quad (3)$$

На четвёртом этапе, используя показатели $КУ_{\omega_\ell}$ и SV_{η_q} как базовые переменные для функций принадлежностей к понятиям рациональная схема управления с номерами p и r – $\mu_r(SV_{\eta_q})$, определяются нечеткие модели управления типа

$$SU_{p,r} = F_{SU}\left[\mu_p(КУ_{\omega_\ell}), \mu_r(SV_{\eta_q})\right]. \quad (4)$$

Выбор схемы управления определяется с помощью операции max:

$$SU = \max_{p,r}(SU_{pr}). \quad (5)$$

Используя описанный метод синтеза гибридных решающих правил, решались задачи прогнозирования, диагностики, профилактики и лечения различных типов заболеваний, вызываемых вредным воздействием экологических факторов. Во всех решаемых задачах прогностическая значимость получаемых решающих правил превышала значение 0,85, а диагностическая эффективность превышала значение 0,9.

Список литературы

1. Воронцов И.М., Шаповалов В.В., Шерстюк Ю.М. Здоровье. Опыт разработки и основание применения автоматизированных систем для мониторинга и скринирующей диагностики нарушений здоровья. СПб.: ООО «ИПК Коста», 2006. 432 с.

2. Кореневский Н.А. Проектирование нечетких решающих сетей, настраиваемых по структуре данных, для задач медицинской диагностики // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2005. Т. 4, № 1. С. 12–20.

3. Кореневский Н.А., Крупчатников Р.А., Горбатенко С.А. Синтез нечетких сетевых моделей, обучаемых по структуре данных для медицинских экс-

пертных систем // Медицинская техника. 2008. № 2. С. 18–24.

4. Интерактивный метод классификации в задачах медицинской диагностики / Н.А. Кореневский, С.В. Дегтярев, С.П. Серегин, А.В. Новиков // Медицинская техника. 2013. № 4. С. 1–3.

5. Оценка состояния здоровья человека с помощью гетерогенных нечетких правил / В.С. Титов, А.Г. Устинов, И.А. Ключиков, В.Н. Шевякин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1. Ч. 1. С. 41–55.

6. Shortliffe E.H. Computer – Based medical Consultations: MYCIN. New York: American Elseviver, 1976.

7. Zadeh L.A. Advances in Fuzzy Mathematics and Engineering // Fuzzy Sets and Fuzzy Information-Granulation Theory. Beijing. Beijing Normal University Press, 2005. ISBN 7-303-05324-7.

Получено 26.11.13

N.A. Korenevsky, Doctor of Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: SFilist@gmail.com)

Bashir Abbas Samakha, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

S.A. Gorbatenko, Candidate of Sciences, Associate Professor, Kursk Institute of social education (branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher education Russian State Social University

SYNTHESIS OF HYBRID INDISTINCT RULES FOR FORECASTING, ASSESSMENT AND MANAGEMENT OF THE STATE OF HEALTH IN ECOLOGICALLY ADVERSE REGIONS

In work the method of synthesis of indistinct decisive rules of the given exact analytical models of people describing a state of health working with different structure in the conditions of absence living and working in ecologically adverse conditions is considered. The offered method is based on association of elements of the theory of fuzzy logic of decision-making, the theory of recognition of images and methodology of the prospecting analysis.

Key words: *indistinct rules, analysis, management, state of health, ecological situation.*

УДК 004.942

А.А. Мохаммед, аспирант, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: kstu-bmi@yandex.com)

С.А. Филист, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: SFilist@gmail.com)

О.В. Шаталова, канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: kstu-bmi@yandex.com)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПЕДАНСА БИОМАТЕРИАЛОВ В СРЕДЕ MATLAB

Для моделирования импеданса биоматериала предлагается использовать гибридные модели, построенные в виде структурно-функциональных узлов, полученных на основе гипотезы о свойствах биоматериалов и строгого математического описания функционирования узлов, входящих в модель.

Ключевые слова: *импеданс, биоактивная точка, модель, вольт-амперная характеристика.*

***

Возможности биоимпедансометрии не исчерпываются оценкой интегральных показателей, относящихся ко всему организму. В диагностике многих заболеваний значительный интерес представляют параметры состава тканей отдельных регионов. Особый интерес вызывают исследования электрической проводимости в аномальных зонах – в области биоактивных точек (БАТ). Анализ отечественных и зарубежных исследований различных свойств БАТ указывает на возможность получения от этих точек диагностической информации.

Однако информация, снимаемая с БАТ в виде электрической проводимости

на постоянном или переменном токе, не обладает достаточной робастностью и не позволяет построить адекватные решающие правила, позволяющие обеспечить приемлемые показатели диагностической эффективности при принятии диагностических решений. В целях улучшения показателей качества диагностики прибегают к увеличению объема информации, снимаемой с БАТ.

Это достигается:

а) путем увеличения числа анализируемых БАТ;

б) путем увеличения числа частот зондирующего тока, на котором определяется полное электрическое сопротивление в области БАТ;

в) изменением энергетических характеристик источника возбуждающего тока.

Остановимся более подробно на последнем способе. Если электрическое сопротивление линейно, то есть определяется согласно закону Ома в интегральной форме, то изменение энергетических характеристик источника возбуждающего тока не приведет к получению дополнительной информации. Однако эксперименты показывают, что это сопротивление носит нелинейный характер и зависит от приложенного напряжения. Поэтому одним из путей увеличения объема информации, снимаемой с БАТ, является исследование ее вольт-амперной характеристики с последующим получением характерных точек, координаты которых могут быть использованы для построения пространства информативных признаков в классифицирующих моделях. Для определения этих характерных точек необходима модель вольт-амперной характеристики БАТ.

Модель вольт-амперной характеристики может быть построена либо на основе феноменологического подхода, в основе которого лежит математическая или гомеостатическая модель описания экспериментально полученных данных об объекте исследования, либо на основе эвристического подхода, когда в основе построения модели используется знание эксперта о функционировании объекта исследования. Таким образом, имеется возможность построения двух видов параметрических моделей.

Моделирование вольт-амперных характеристик биоматериала проводилось в пакете SIMULINK среды MATLAB 7.13. При моделировании вольт-амперной характеристики БАТ использовался гибридный подход, сущность которого заключается в том, что на первом этапе строится функциональная модель, которая интегрирует знания эксперта о функционировании объекта исследования, а на втором этапе – математическая модель, согласующая процесс функционирования модели и экспериментальные данные, получаемые при исследовании реальных объектов.

В основе функциональной модели электрической проводимости БАТ положена гипотеза об обратимом пробое диэлектрика. В соответствии с этой гипотезой сопротивление в БАТ состоит из двух составляющих: цепочки последовательно соединенных участков, имеющих свойства диэлектрика с обратимым пробоем, и двух омических сопротивлений, которые образуют делитель, осуществляющий функции обратной связи (отрицательной) для моделирования отрицательного сопротивления.

Для моделирования этих участков используем диодно-резистивные ячейки двух типов, схемы электрические принципиальные которых показаны на рисунке 1, *а* и *б*. На рисунке 1, *в* показана вольт-амперная характеристика диода, используемого в этих цепочках, а на рисунке 1, *г* показано окно MATLAB 7.13, посредством которого задаются параметры диодов ячеек.

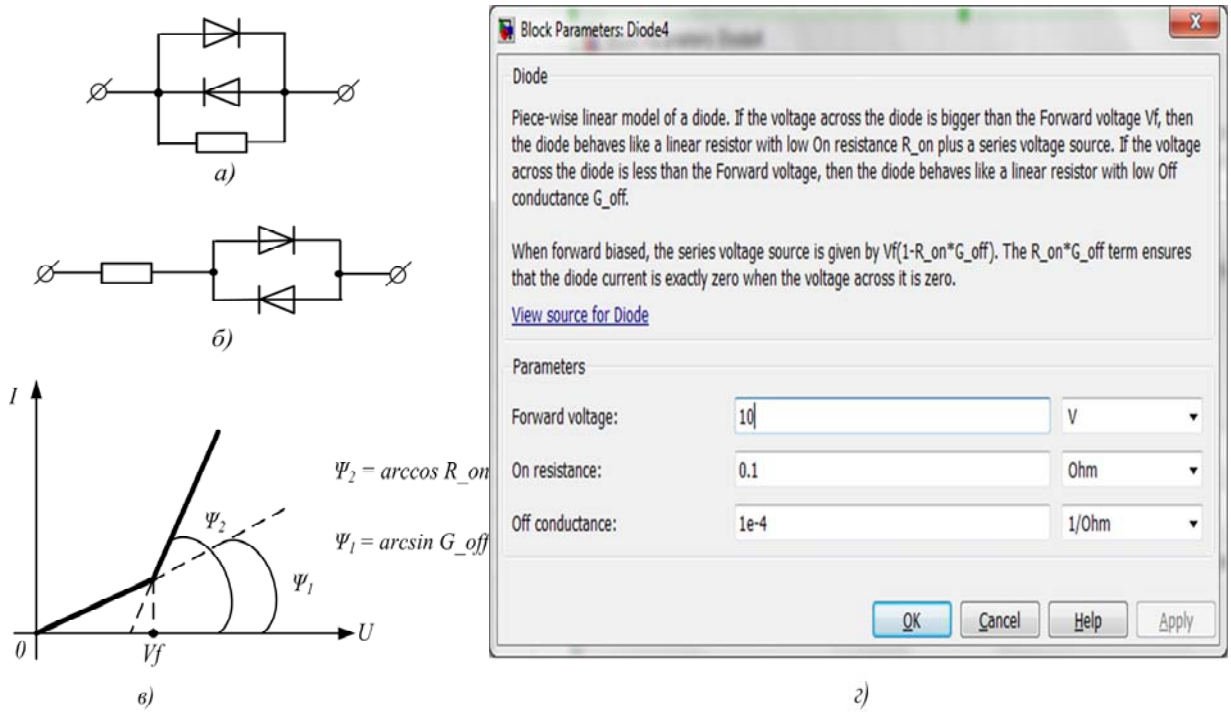


Рис. 1. Моделирование диодно-резистивных ячеек в пакете MATLAB

На рисунке 2 показано интерфейсное окно SIMULINK для моделирования вольт-амперных характеристик БАТ. При построении модели использовались шесть диодно-резистивных ячеек: четыре ячейки первого типа, которые моделировали импеданс биоматериала, связанный с проводимостью кожи, и две ячейки второго типа, которые моделировали реакцию БАТ на воздействие на нее электрическим током. При этом полагалось, что при некотором пороговом значении зондирующего тока включались «защитные механизмы», которые приводили к снижению зондирующего тока через биообъект. В качестве модели таких механизмов использовался источник напряжения, собранный на операционном усилителе, на неинвертирующий вход которого через две диодно-резистивные ячейки второго типа подается напряжение, пропорциональное току, через БАТ.

В качестве источника питания использовался источник пилообразного напряжения, который подключался последовательно с цепочкой из четырех диодно-резистивных ячеек первого типа. Интерфейсное окно SIMULINK для определения параметров этого источника питания показано на рисунке 3, *а*.

В качестве параметров моделей используются амплитуда пилообразного напряжения и частота пилообразного напряжения. В модели также предусмотрена установка формы напряжения питания. Кроме пилообразной формы имеется возможность использовать синусоидальную форму напряжения и прямоугольные импульсы. Форма выходного напряжения на входе модели импеданса биоматериала представлена на рисунке 3,*б*.

Таким образом, на модель биоимпеданса, выполненную в виде диодно-резистивных ячеек, подается последовательность волн пилообразного напряжения, число которых задается в окне (рис. 3, *а*) параметром Frequence, каждая из которых генерирует одну вольтамперную характеристику биоматериала.

Графическое изображение такой вольтамперной характеристики, полученной при частоте пилообразного напряжения 1 Гц, представлено на рисунке 4.

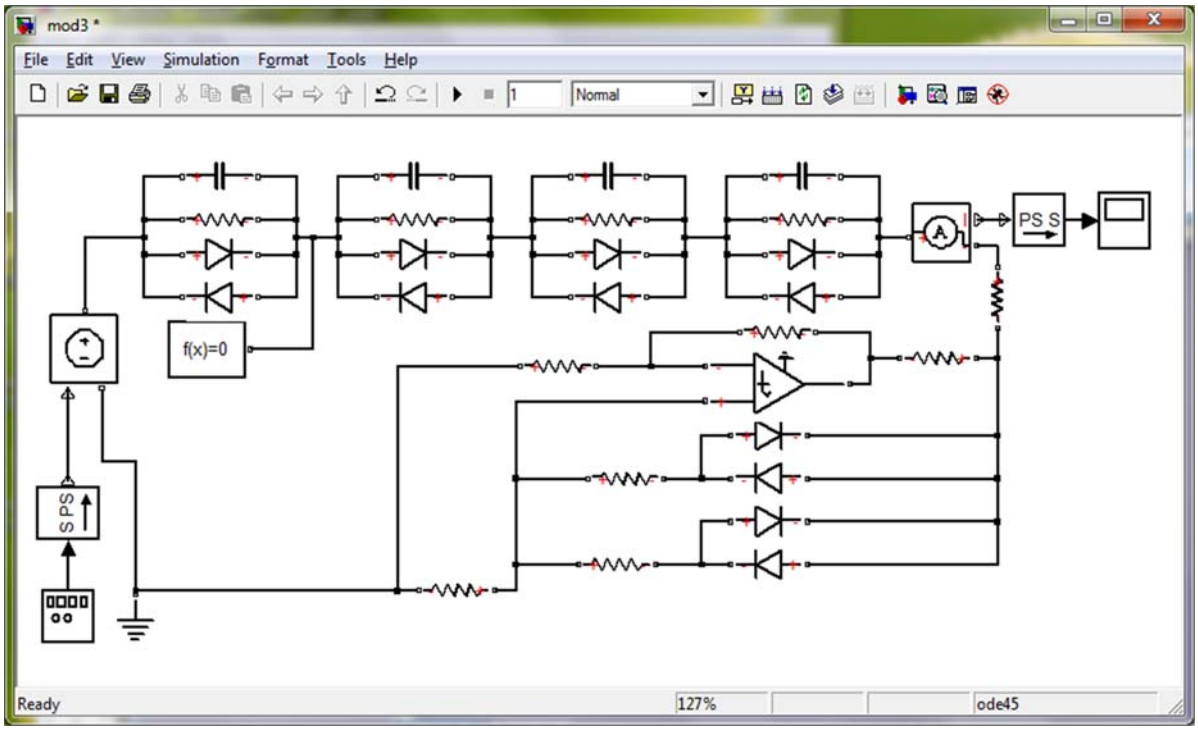
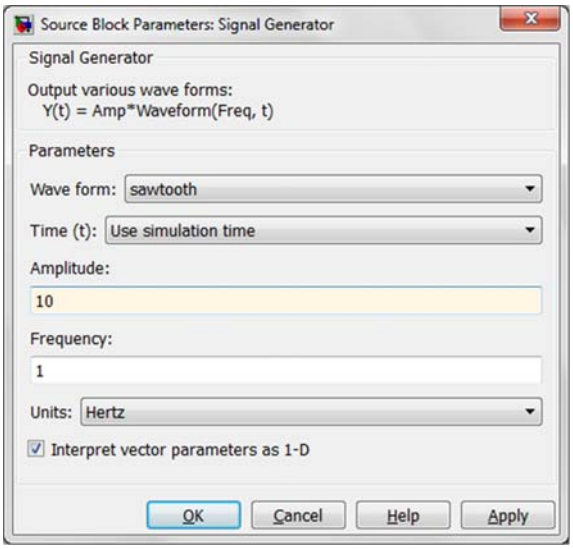
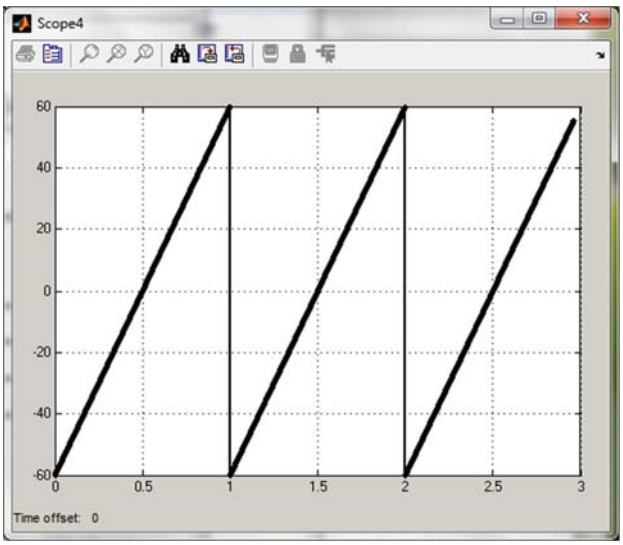


Рис. 2. Функциональная модель электрического сопротивления БАТ в пакете MATLAB





а) *б)*

Рис. 3. Интерфейсное окно настройки источника питания (*а*) и эпюра напряжения на выходе источника питания (*б*)

Учитывая, что при пилообразной форме напряжения источника питания амплитуда напряжения пропорциональна времени внутри цикла, то напряжение на модели импеданса биоматериала пропорционально волновому времени. Следовательно, чтобы получить вольт-амперную характеристику биоматериала, достаточно измерить ток через диодно-резистивную ячейку.

Для измерения тока в SIMULINK используем модель измерителя тока, представленную на рисунке 5. Текущий блок датчика представляет собой идеальный датчик тока, то есть устройство, которое преобразует ток, измеренный в любой электрической ветви, в физический сигнал, пропорциональный току.

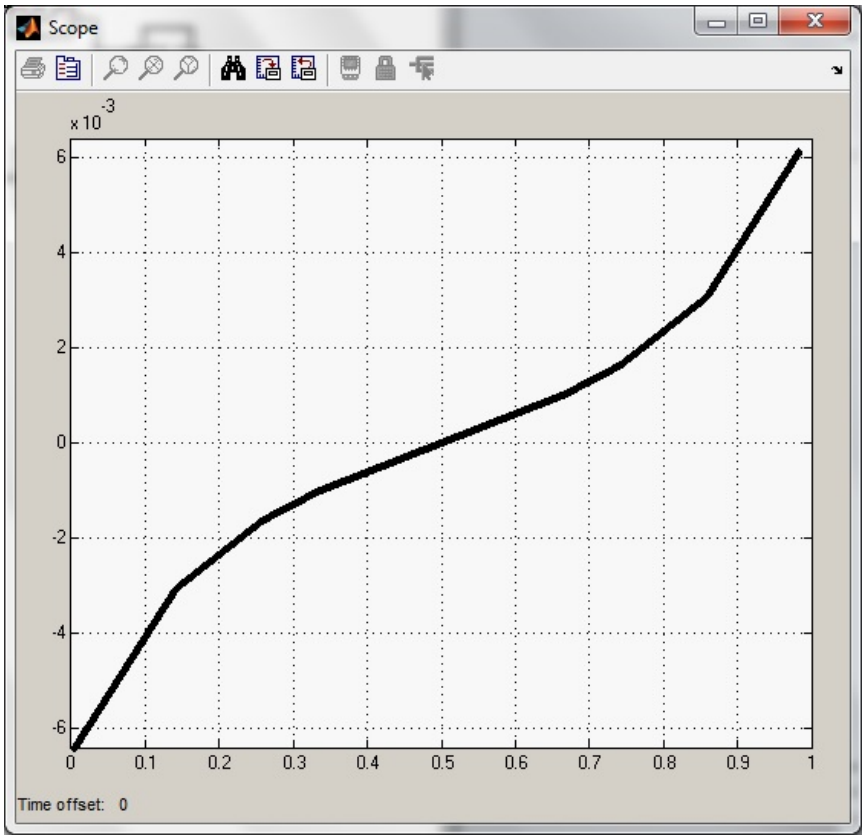


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика модели биоимпеданса

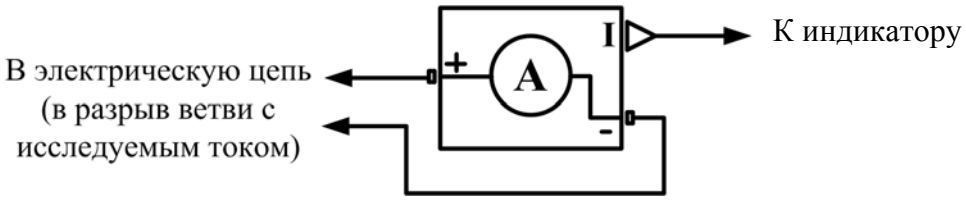


Рис. 5. Модель измерителя тока

Блок имеет следующие порты: (+) электрический порт, связанный с внешней цепью положительным выводом; (−) электрический порт, связанный с внешней цепью отрицательным выводом; (I) физический порт, предназначенный для визуализации измеряемого сигнала (через него подключаются устройства индикации).

Вольт-амперная характеристика биоматериала является нелинейной функцией и может быть аппроксимирована суперпозицией простых функций, на основе которых формируется пространство информативных признаков.

Таким образом, использование предложенной технологии моделирования биоимпедансных исследований, в которой используются как физические, так и математические модели блоков и компонентов виртуального биоимпедансного анализатора, получаемые из библиотек пакета SIMULINK среды MATLAB, позволит оптимизировать параметры зондирующего тока по отношению сигнал/помеха, а также определить предельные ресурсы схемотехнического решения измерительного тракта относительно этого показателя.

Исследования выполнены при поддержке гранта Президента Российской Федерации, МК-2870.2013.8.

1. Исследование влияния электрокардиосигнала на оценку динамической составляющей биоимпеданса посредством моделей, выполненных в среде MATLAB / Авад Али Мохаммед, О.В. Шаталова, Адел Мохаммед Аль-Кадаси, В.Н. Снопков // Медицинская техника. 2013. № 4. С. 30–32.

Получено 29.11.13

A.A. Mohammed, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: kstu-bmi@yandex.com)

S.A. Filist, Doctor of Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: SFilist@gmail.com)

O.V. Shatalova, Candidate of Sciences, Assistant Professor, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: kstu-bmi@yandex.com)

MODELLING OF THE IMPEDANCE OF BIOMATERIALS IN THE ENVIRONMENT OF MATLAB

For modeling of an impedance of a biomaterial it is offered to use the hybrid models constructed in the form of structurally functional knots, received on the basis of a hypothesis of properties of biomaterials, and the strict mathematical description of functioning of the knots entering model.

Key words: *impedance, bioactive point, model, volt-ampere characteristic.*

УДК 004.896

Башир Аббас Самаха, аспирант, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: kstu-bmi@yandex.com)

Адел Мохаммед Аль-Кдаси, преподаватель, Университет г. Сана (Йемен)
(тел.: (+967)-01-464483)

Н.А. Кореневский, д-р техн. наук, Юго-Западный государственный университет (Курск)
(e-mail: SFilist@gmail.com)

Н.А. Милостная, канд. техн. наук, преподаватель, Юго-Западный государственный университет (Курск) (e-mail: nat_mil@gmail.com)

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КОНТРОЛЕМ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ В ПРОМЫШЛЕННОМ КЛАСТЕРЕ

Показано, что главным недостатком типовой автоматизированной системы научных исследований, предназначенной для моделирования распространения загрязняющих веществ в атмосфере, является ее жесткая привязанность к исследуемому процессу или модели и ее «изолированность». Предложено преодолеть эти недостатки путем включения в нее дополнительных компонентов и организации удаленного доступа через Интернет, а также распределив решаемые задачи по разным уровням системы. Разработаны соответствующие базы данных в соответствии с их информационно-логическими и даталогическими моделями и произведена оптимизация их структур для соответствия нормальной форме Бойса-Кодда.

Ключевые слова: *промышленный кластер, выбросы химико-технологических предприятий, базы данных, форма Бойса-Кодда.*

***

Промышленный кластер является сложной организационно-технической системой. С точки зрения системного анализа рассматривать такую систему в отрыве от окружающих ее систем нельзя. Кроме того, промышленный кластер можно отнести к классу синергетических систем, так как он является открытой динамической системой. нарушения технологических режимов химико-технологических предприятий кластера влечет за собой такое изменение системы, при котором будет пройдена «точка бифуркации» и станет невозможным ее дальнейшее функционирование. в случае аварии в окружающую среду попадают опасные

загрязняющие вещества (ЗВ), которые могут вызвать человеческие жертвы, а также нанести непоправимый вред окружающей среде.

Химико-технологические процессы (ХТП) отдельных предприятий, как и сами предприятия, рассматриваемые в качестве организационно-технических систем, на сегодняшний день хорошо изучены, однако их взаимодействие между собой в рамках единой системы с учетом ее влияния на окружающую среду практически не рассматривалось. масштабные аналитические исследования выбросов химико-технологических предприятий в окружающую среду и в атмосферу, а также их распространение по окружающим территориям очень дороги, поэтому часто возникает ситуация, когда заранее неизвестно, что надо измерять и в каком месте [1].

Указанные проблемы не позволяют использовать для описанных выше исследований типовые структуры автоматизированных систем научных исследований (АСНИ). Поэтому было предложено использовать автоматизированную систему поддержки проведения исследований (АСППИ), которая получается путем модификации типовой структуры АСНИ следующим образом.

1. В структуру типовой АСНИ добавлены подсистемы: накопления информации (знаний), управления пользователями, передачи информации.

2. Организован удаленный доступ к АСППИ через Интернет.

3. Решаемые задачи распределены по разным уровням АСППИ.

4. Повышена надежность и безопасность функционирования АСППИ в Интернет.

Полученная структурная схема АСППИ показана на рисунке 1.

Исследования проводятся на экспериментальных установках (ЭУ1…ЭУN), имитационных моделях (ИМ1…ИМК), кроме того, данные могут поступать и с реальных технологических объектов (ТО1…ТОМ). Часть АСППИ, работающая с экспериментальными установками, похожа на типовую АСНИ. Данные поступают от датчиков через аналого-цифровые преобразователи (АЦП), однако далее, в отличие от типовой АСНИ, поступают и обрабатываются на «собственной» ЭВМ.

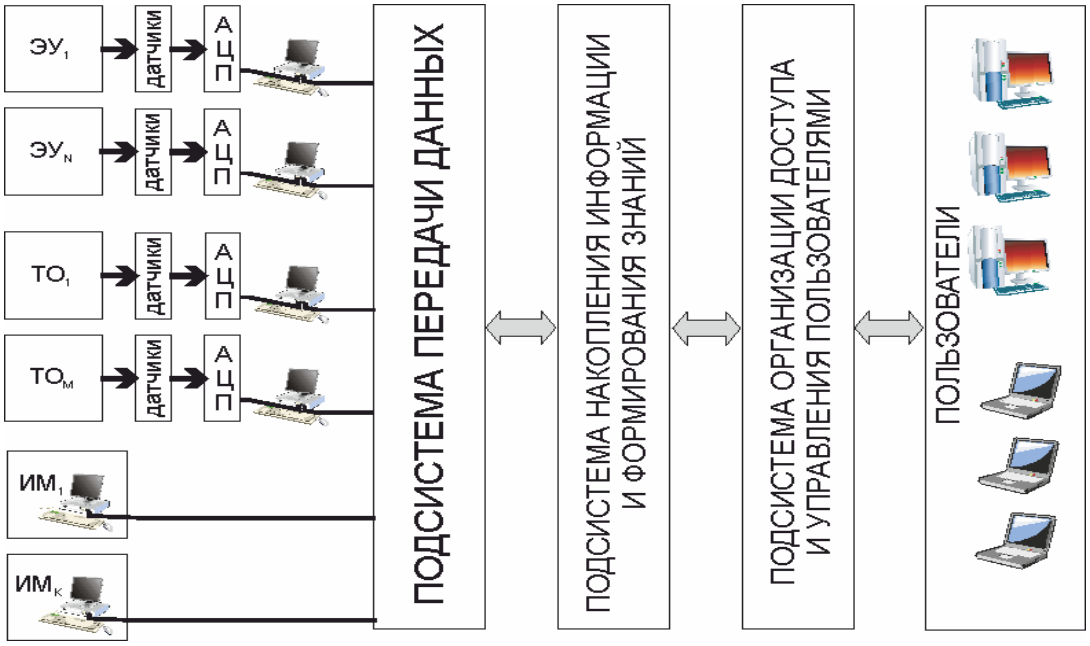


Рис. 1. Структура распределенной АСППИ с удаленным доступом

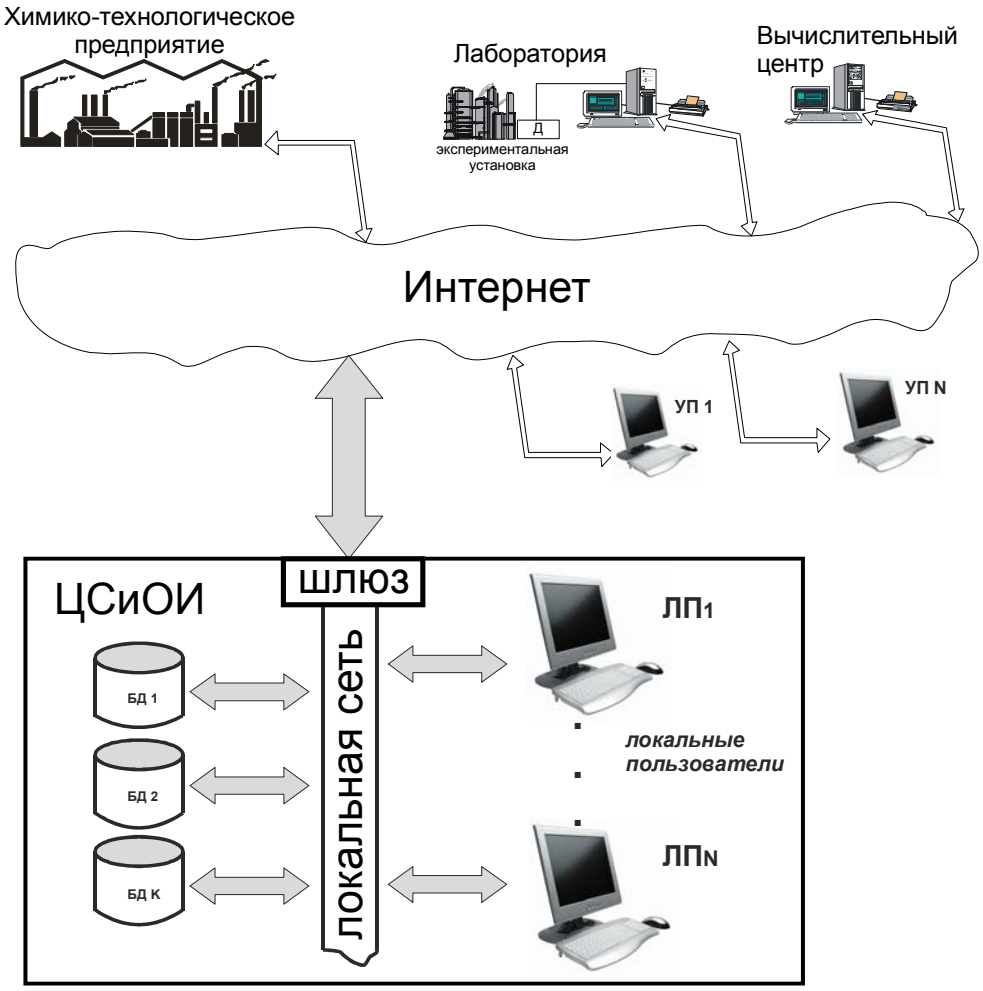


Рис. 2. Техническая структура распределенной АСППИ с удаленным доступом

Таким образом, происходит распределение уровней обработки данных по функциям, что дает преимущества в виде снижения количества передаваемых данных на более высокие уровни, так как первичная обработка происходит на месте получения данных. Аналогично обрабатываются данные и с технологических объектов (ТО1…ТОМ). Далее обработанные данные поступают в подсистему передачи данных (ППД), туда же поступают данные и с имитационных моделей (ИМ1…ИМК). Все данные передаются с ее помощью в подсистему накопления информации и формирования знаний (ПНИиФЗ). Пользователи работают с этими данными и знаниями через подсистему управления пользователями (ПОДиУП).

Технически АСППИ реализуется согласно структуре, изображенной на рисунке 2.

С точки зрения пользователя, информационная модель АСППИ, на базе которой строится инфологическая модель данных для соответствующих баз данных (БД), выглядит, как показано на рисунке 3 [2].

Инфологическая модель представляет собой описание информационных объектов или понятий предметной области и связей между ними. В данном случае к ним относятся рассмотренные ранее ХТП, ЗВ, режимы работы, модели и т.п. На базе инфологической модели построена даталогическая модель. Для реляционной модели данных даталогическая модель представляет собой набор схем отношений, обычно с указанием первичных ключей, а также «связей» между отношениями, представляющих собой внешние ключи.

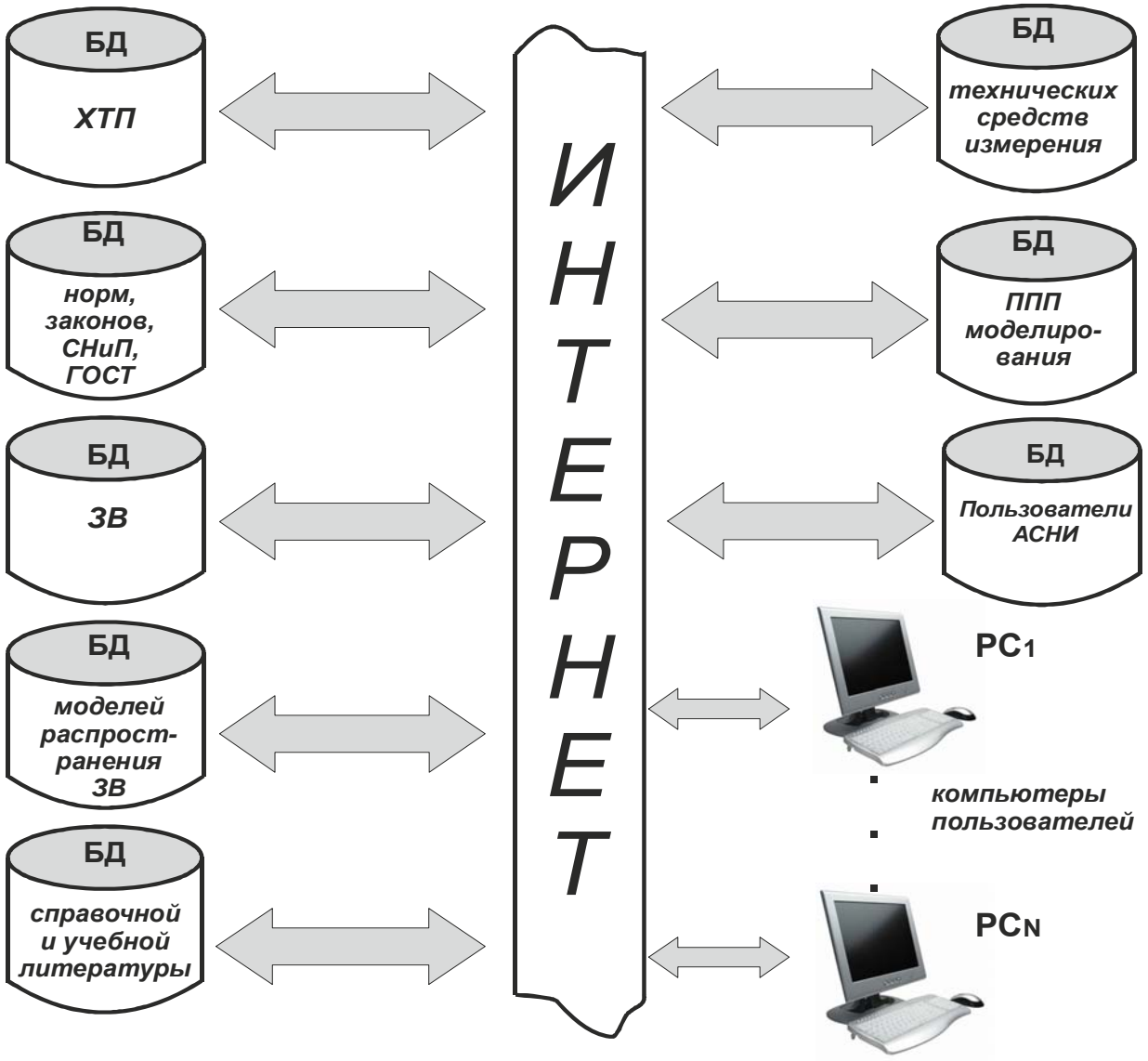


Рис. 3. Информационная модель распределенной АСППИ с удаленным доступом: БД – базы данных; PC 1… PC N – компьютеры пользователей

Количество баз данных может постоянно увеличиваться. Как минимум, система должна содержать следующие базы данных:

1. БД «Химико-технологические предприятия», где хранится информация о различных действующих химико-технологических процессах и аппаратах, режимах их функционирования и т.п.

2. БД «Нормы, законы, СНиП, ГОСТ», где хранится актуальная информация о действующем законодательстве.

3. БД «Загрязняющие вещества», где хранится информация о загрязняющих веществах, попадающих в окружающую среду от действующих химико-технологических предприятиях либо потенциально могущих попасть в нее и определенных в результате экспериментов или имитационного моделирования.

4. БД «Модели распространения ЗВ», где хранится информация о моделях распространения ЗВ в окружающей среде.

5. БД «Справочная и учебная литература», где хранится информация о справочной и учебной литературе по химико-технологической тематике.

6. БД «Технические средства измерения», где хранится информация о контрольно-измерительных приборах, тех-

нических средствах автоматизации, датчиках и т.п.

7. БД «Пакеты прикладных программ моделирования», где хранится информация о различных пакетах прикладных программ для имитационного моделирования и соответствующие модели химико-технологических процессов и аппаратов.

8. БД «Пользователи», где хранится информация о пользователях АСНИ.

9. «Пакеты прикладных программ моделирования», где хранится информация о различных пакетах прикладных программ для имитационного моделирования и соответствующие модели химико-технологических процессов и аппаратов.

10. «Пользователи», где хранится информация о пользователях АСППИ.

11. «Продукция», где хранится информация о продукции, выпускаемой предприятиями.

Так как разработка АСППИ проводится по принципам совместного проектирования, то базы данных созданы с помощью MS Access с последующей конвертацией в MS SQL Express или MySQL. Конвертация производится с помощью специальных процедур посредством ODBC. Такой подход позволит разработчикам разного уровня подготовки и неспециалистам в области БД принимать активное участие в проектировании структуры БД. служащие роспотребнадзора, администрации и другие заинтересованные лица, знакомые с пакетом MS Office, под руководством IT-специалистов смогут участвовать в разработке АСППИ.

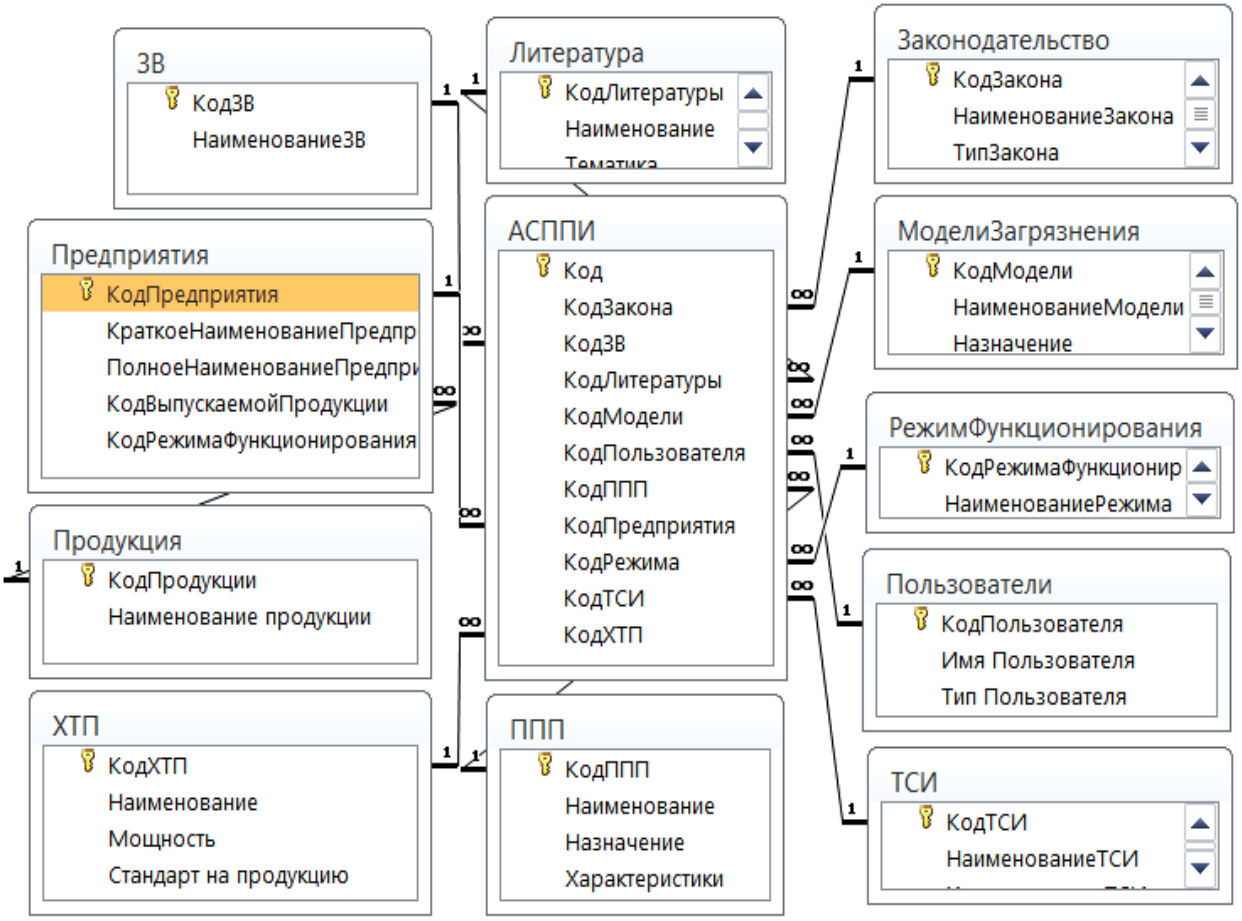


Рис. 4. Схема структуры данных в БД

На рисунке 4 показана структура данных в БД, построенная по разработанной даталогической модели, с соответствующими таблицами.

Для оптимального эффективного функционирования баз данных, в соответствии с разработанной ранее инфологической моделью и с целью устранения возможных ошибок и недостатков в структуре БД, была произведена их нормализация в нормальную форму Бойса-Кодда в соответствии с положениями теории нормализации, которая является очень ценным достижением реляционной теории и практики, поскольку даёт научно строгие и обоснованные критерии качества проекта БД и формальные методы для усовершенствования этого качества. Кроме того, во всей сфере информационных технологий практически отсутствуют методы оценки и улучшения проектных решений, сопоставимые с теорией нормализации реляционных баз данных по уровню формальной строгости.

Для рассматриваемого случая таблицы, связанные отношениями, находятся в нормальной форме Бойса-Кодда. Это позволит исключить при работе аномалии ввода и удаления данных, а также учесть многозначные зависимости.

В качестве измерительной подсистемы предлагается использовать оборудование ЗАО «ОПТЭК» – измерительный комплекс «СКАТ».

Резюме

Главным недостатком структуры типовой АСНИ является ее жесткая привязанность к исследуемому процессу или модели. Такая структура совершенно не подходит для исследования распространения ЗВ в атмосфере промышленного кластера.

Другим немаловажным недостатком типовой АСНИ является ее «изолированность». Пользоваться самой АСНИ и результатами ее деятельности может только ограниченный круг лиц, что явно снижает заложенный в нее научный и технический потенциал. Преодолеть эти недостатки можно путем изменения структуры типовой АСНИ, добавив в нее дополнительные компоненты и применив современные информационные технологии.

Для исправления указанных выше недостатков типовой АСНИ, не позволяющих использовать ее для исследования промышленного кластера, была изменена ее типовая структура, т. е. в нее добавлены следующие подсистемы: накопления информации (знаний), управления пользователями, передачи информации. Это позволило преобразовать ее в АСППИ.

Организован удаленный доступ к разработанной АСППИ через Интернет; решаемые задачи распределены по разным уровням АСППИ.

Разработаны БД АСППИ в соответствии с их инфологическими и даталогическими моделями и произведена оптимизация ее структуры для соответствия нормальной форме Бойса-Кодда.

---

1. Интеллектуальная система поддержки принятия решений в системе управления концентрацией загрязняющих веществ в атмосферном воздухе / Башир Аббас Самаха, В.В. Батышкина, В.Ю. Волков [и др.] // Вестник международной академии системных исследований (МАСИ). Информатика, Экология, Экономика. 2011. Т. 13. Ч. 1. С. 89–93.

2. Волков В.Ю., Самаха Б.А. Применение АСППИ для моделирования распространения загрязненного воздуха по территории г. Новомосковска // Известия ТулГУ. Серия «Технические науки». Вып. 2. С. 59–64.

Получено 03.12.13

Bashir Abbas Samakha, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)

Adel Mohamed Al-Kdasi, Lecturer, University Sana'a (Yemen)
(tel.: (+967)-01-464483)

N.A. Korenevsky, Doctor of Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: SFilist@gmail.com)

N.A. Milostnaya, Candidate of Sciences, Lecturer, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: nat_mil@gmail.com)

THE DISTRIBUTED AUTOMATED SYSTEM OF SUPPORT OF CARRYING OUT RESEARCHES FOR MANAGEMENT OF CONTROL OF POLLUTION OF THE ENVIRONMENT I N THE INDUSTRIAL CLUSTER

It is shown that the main lack of the standard automated system of the scientific researches intended for modeling of distribution of polluting substances in the atmosphere, her rigid attachment to studied process or model and its "isolation" is. It is offered to overcome these shortcomings by inclusion in it additional components and the organization of remote access on the Internet, and also having distributed solved tasks of different levels of system. The corresponding databases according to their datalogical models and datalogical models of a database are developed and optimization of their structures for compliance to Boyce-Kodda normal form is made.

Key words: *industrial cluster, emissions of the chemical and technological enterprises, databases, Boyce-Kodda form.*

УДК 004.932: 004.83: 004.8.032.26

Р.А. Томакова, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск) (e-mail tomakova@ rambler.ru)

М.А. Ефремов, канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск) (тел.: 8(4712)58-70-98)

В.В. Жилин, канд. техн. наук, доцент, Курский институт кооперации (филиал) Белгородского университета кооперации, экономики и права (тел.: 8(4712)56-84-07)

НЕЧЕТКИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ФОРМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КРОВИ

В статье рассматривается универсальная сетевая структура, предназначенная для классификации форменных элементов крови на микроскопических изображениях мазков периферической крови. Предложенная модель универсального классификатора реализована однородной нечеткой нейронной сетью. Приведена схема алгоритма формирования сетевой модели для классификации пикселей сложноструктурируемого изображения.

Ключевые слова: *нечеткие нейронные сети, форменные элементы крови, классификация пикселей изображения.*

***

Вопросы анализа межклеточных соотношений в мазках периферической крови в настоящее время являются важной и приоритетной задачей медицинской диагностики. Автоматизация этого процесса затруднена как различным окрасом мазков крови, так и объемной структурой форменных элементов крови, благодаря которой создаются специфические помехи сегментации при проецировании форменных элементов на плоскость изображения [1].

При обработке такой информации возникает ряд сложных научных, технических и технологических проблем, для решения которых в настоящее время широко используют искусственные нейронные сети, предназначенные для классификации сложноструктурируемых изображений, представляющих медицинские изображения [2]. Важным преимуществом нейронных сетей является возможность функционирования параллельно, тем самым повышая эффективность решения задач в области обработки сложноструктурируемых изображений. Как правило, при решении задач такого класса возникает множество альтернативных решений, поэтому возникает необходи-

мость в создании универсальной сетевой структуры. В качестве требований, выдвигаемых к работе такой системы, – это объединение достоинства обучаемых систем и систем на основе экспертных технологий [3].

Нами была разработана универсальная сетевая структура, предназначенная для классификации сегментов на сложноструктурируемых изображениях. В основу построения сетевой структуры была положена теорема Арнольда-Колмогорова, согласно которой любая непрерывная функция n переменных f, заданная на единичном кубе n-мерного пространства $In = I \times I \times ...I$, представима в виде

$$f(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \sum_{q=1}^{2n+1} h_q \left[\sum_{p=1}^{n} \varphi_q^p(x_p) \right], \quad (1)$$

где функции $h_q(u)$ – непрерывные функции одной переменной;

$\varphi_q^p(x_p)$ – фиксированные возрастающие, непрерывные, определенные на $I = [0, 1]$, стандартные (не зависящие от выбора функции f) функции.

Для упрощения процесса аппроксимации достаточно сложная гиперповерхность, соответствующая (1), заменяется гиперплоскостью:

$$f(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \\ = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \ldots + a_n x_n - b, \quad (2)$$

где a_i и b – константы (i = 1, 2, …, n).

При построении гиперплоскости (2) используется обучающая выборка, содержащая множество векторов $\{X_1, X_2 \ldots X_j \ldots X_m\}$ определенного класса. В реальных системах классификации $m > n$ и система линейных уравнений, посредством которой определяется гиперплоскость (2), переопределена, следовательно, соответствующая ей однородная система не имеет нетривиального решения.

Компонентам вектора $\boldsymbol{F} = (f(X_1), f(X_2) \ldots f(X_m))^{\mathrm{T}}$ присваиваются произвольные, одинаковые для каждого из разделяемых классов значения. Коэффициент b целесообразно представить в виде нечеткого числа, которое описывается функцией принадлежности с базовой переменной, лежащей в диапазоне (±ε). В этом случае область признакового пространства оказывается заключена между двумя параллельными гиперплоскостями, которые отстоят друг от друга на расстояние не более 2ε.

В наиболее благоприятном случае все векторы обучающей выборки лежат на гиперплоскости, заданной вектором

$$\boldsymbol{A} = (a_1\, a_2 \ldots a_m\, b), \ \det X = 0 \ \text{ и } \varepsilon = 0.$$

От одной пары параллельных гиперплоскостей осуществляется переход к множеству непараллельных пар, пар параллельных гиперплоскостей. Этот переход реализуется путем расщепления исходной системы уравнений на множество подсистем и уменьшения расстояний между параллельными гиперплоскостями. Очевидно, что чем больше число пар гиперплоскостей, на которое расщепляется исходная пара гиперплоскостей, тем более сложной может быть форма аппроксимируемой функции.

На рис. 1 представлена сетевая структура, реализующая описанный способ аппроксимации, в которой исходная пара гиперплоскостей расщеплена на λ непараллельных пар параллельных гиперплоскостей.

Сеть состоит из четырех слоев и является однородной. Первый (входной) слой определяет вектор состояния системы классификации. Второй слой синтезирует аппроксимирующие функции согласно уравнению (2). Для реализации этих функций в узлах второго слоя используются нейроны типа «adaline» с линейной функцией активации. Число λ таких аппроксимирующих функций определяется структурой данных – обучающей выборкой – и априорно неизвестно.

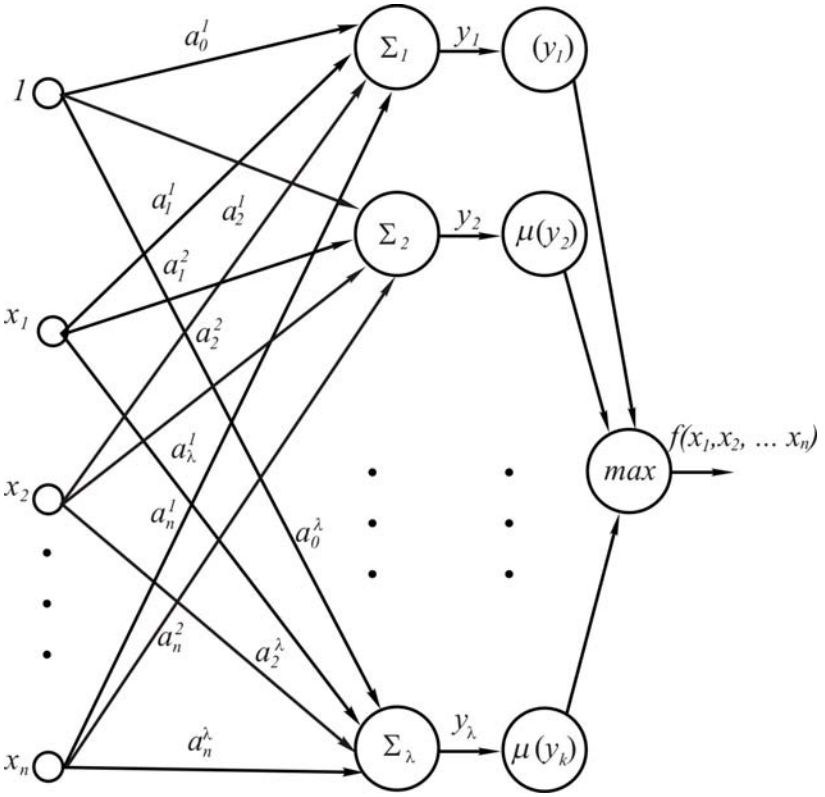


Рис. 1. Сетевая структура универсального классификатора

Сеть, представленная на рис. 1, настроена на один класс – $\Re$, поэтому при поступлении на входы сети компонентов вектора $\boldsymbol{X_j}$, соответствующих исследуемому классу, на выходах нейронов второго слоя появятся числа, близкие к нулю. При этом наиболее близким к нулю будет выход уг того нейрона, расстояние между соответствующей гиперплоскостью которого и точкой $\boldsymbol{X_j}$ минимально. Решение принимается по минимальному значению из всех компонентов вектора состояния второго слоя $(y_1\ y_2 \dots y_r \dots y_\lambda)$, которые характеризуют степень близости вектора $\boldsymbol{X}$ к классу $\Re$.

Так как выходы второго слоя могут приближаться к нулю с двух сторон, то над ними должны быть осуществлены симметричные нелинейные преобразования. В частном случае эти преобразования не зависят от выхода нейрона второго слоя и имеют или треугольную форму, или форму гауссиана.

При использовании нелинейных преобразований в четвертом слое сети реализуется операция «нечеткое или»:

$$\max(\mu_1(y_1), \mu_2(y_2), \dots \mu_r(y_r), \dots \mu_\lambda(y_\lambda)) = \\ = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (3)$$

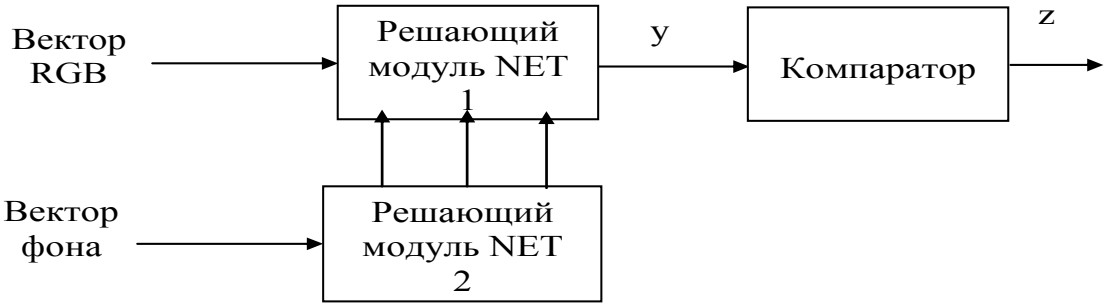


Рис. 2. Сетевая структура для классификации пикселей сложноструктурируемых изображений

Аппроксимирующая модель для сетевой структуры рисунка 1 определяется следующим уравнением:

$$f(x_1, x_2, ..., x_n) = \sum_{r=1}^{\lambda} [\oplus] \mu_r \left[\sum_{i=0}^{n} \varphi_i(x_i) \right], (4)$$

где

$$\max(\mu_1(x), \mu_2(x)) = \sum_{i=1}^{2} [\oplus] \mu_i(x),$$

$$y_r = \sum_{i=0}^{n} a_i(\phi_i(x_i)) = \sum_{i=0}^{n} \varphi_i(x_i).$$

Сетевая структура, предназначенная для классификации двух альтернативных выборок, представлена на рис. 2.

Так как форменные элементы на микроскопическом изображении мазка периферической крови имеют различный уровень освещенности, то RGB-коды не позволяют однозначно отделить сегменты изображения. Поэтому для повышения качества классификации необходимо либо ввести дополнительные информативные признаки, отражающие уровень освещенности в окрестности исследуемого пикселя, либо изменить вид используемого нелинейного отображения в зависимости от уровня освещенности, задавшись при этом определенным количеством уровней освещенности и для каждого уровня построив соответствующее нелинейное отображение. В данной работе используется последний подход. при этом выделяются три класса фона, которые определяются освещенностью (цветовой палитрой) зоны интереса на изображении.

На вход сети подаются два вектора информативных признаков.

Первый вектор информативных признаков описывает атрибуты исследуемого пикселя. Он подается на первый решающий модуль (например, трехкомпонентный вектор RGB-кодов).

На второй решающий модуль подается трехкомпонентный вектор фона, значение компонент которого определяется усредненными характеристиками RGB-кодов пикселей в окрестности анализируемого пикселя, форма и размеры которой зависят от вида решаемой задачи. второй решающий модуль осуществляет управление структурой первого решающего модуля, который настроен на класс 1, принадлежность к которому принимается на основании анализа исходных данных.

Для каждого класса фона ψ_k формируются три нелинейных отображения:

$$\left\lfloor \varphi_\omega^{\psi_k}(R), \varphi_\omega^{\psi_k}(G), \varphi_\omega^{\psi_k}(B) \right\rfloor, \; k = 1, 2, 3. \; (5)$$

В таком случае для каждого RGB-кода строится три нелинейных отображения, соответствующие трем классам фона.

Для получения нелинейных отображений для первого скрытого слоя первого решающего модуля предложен алгоритм, реализующий следующие этапы:

1 – синтез обучающих выборок;

2 – формирование таблицы экспериментальных данных для параметра (параметров) описания фона, анализируемого пикселя в динамическом окне;

3 – ранжирование параметра фона;

4 – получение гистограмм RGB-кодов сегментов для каждого из выделенных поддиапазонов параметра фона;

5 – синтез нелинейных отображений посредством интерактивной среды специального программного обеспечения.

Для реализации сетевой модели (см. рис. 2) были разработаны соответствующие алгоритмическое и программное обеспечения, которые ориентированы на интерактивный режим работы.

Для предложенных в работе алгоритмов разработано программное обеспечение, позволяющее формировать сетевые модели, которые предназначены для классификации пикселей сложноструктурируемых изображений, и включающее интерактивные среды настройки

функциональных блоков сетевых структур, реализованное в среде Matlab 7.10 с графическим интерфейсом пользователя для Neural Network Toolbox и со встроенным пакетом Fuzzy Logic Toolbox.

Реализовать данную гибридную технологию обработки данных на данный момент можно на основе двух базовых аппаратных технологий: микропроцессорной техники и программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Обе технологии имеют как преимущества, так и недостатки. К преимуществам микропроцессоров можно отнести простоту разработки устройств на их базе, которая, в сущности, сводится к написанию программного обеспечения. Наиболее перспективно проектирование таких устройств обработки данных на базе последней технологии, а именно FPGA (field-programmablegatearray).

Задачей пользователя системы является правильная организация программы и распределение команд по отдельным обрабатывающим устройствам в системе. Как правило, балансировку нагрузки здесь осуществляет операционная система (ОС), запущенная на данном устройстве. В системах обработки данных команды в явном виде, как правило, отсутствуют, то есть манипуляции, производимые над данными, не зависят от самих поступающих данных, а определяются отдельным управляющим устройством. Поэтому в таких устройствах на входе обычно размещают специальное устройство-планировщик (scheduler), которое и производит распределение поступающих данных по отдельным процессорам в системе (рис. 3).

Это устройство может быть достаточно примитивным, если отсутствует зависимость между поступающими на обработку пакетами данных, так и достаточно сложным, если требуется отслеживать эти зависимости и соблюдать порядок выполнения команд. Кроме того, на устройство обработки могут быть возложены задачи по включению/отключению отдельных процессоров, их переконфигурированию и управлению частотой.

Использование описанных выше особенностей FPGA дает широкие возможности для реализации аппаратным способом различных алгоритмов обработки изображений.

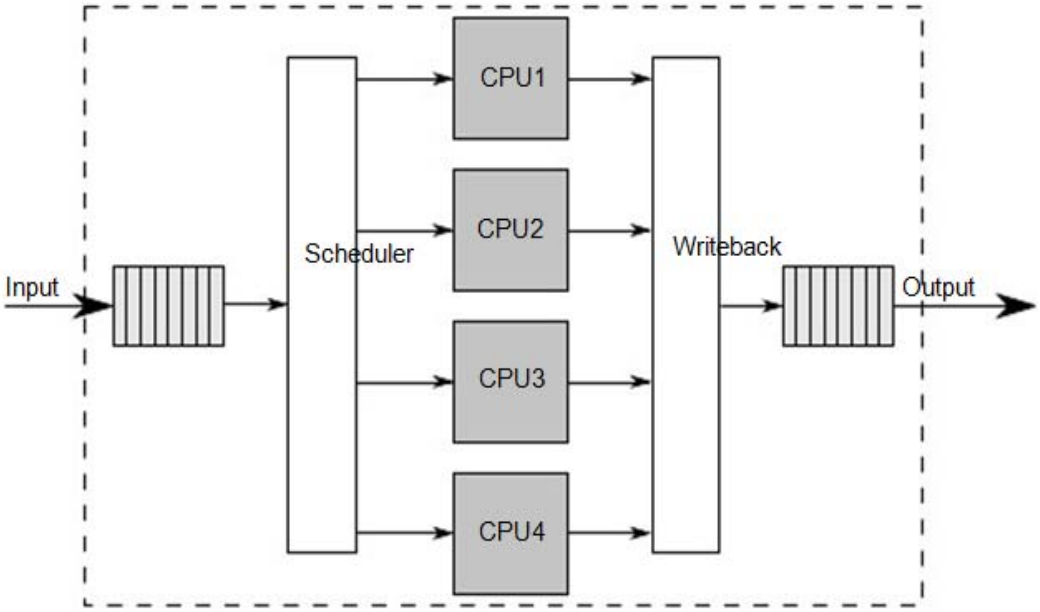


Рис. 3. Многопроцессорная обработка в гибридных системах обработки данных

Использование FPGA для ускорения процесса вычислений основано на том, что на ее основе можно создать различное количество процессорных элементов (ПЕ), выполняющих одну и ту же операцию, которые позволяют сократить общее время, необходимое для обработки изображений.

Список литературы

1. Томакова Р.А., Филист С.А., Яа Зар До. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4(43). С. 44–50.

2. Томакова Р.А. Проектирование гибридной нейронной сети для анализа сложноструктурируемых медицинских изображений // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2011. Т. 10, № 4. С. 916–223.

3. Подвальный Л.С., Леденева Т.М. Интеллектуальные системы моделирования: принципы разработки // Системы управления и информационные технологии. 2013. Т. 51, № 1. С. 4–10.

Получено 05.12.13

R.A. Tomakova, Doctor of Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: tomakova@ rambler.ru)

M.A. Efremov, Candidate of Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk)
(tel.: 8(4712)58-70-98)

V.V. Zhilin, Associate Professor, Kurskiy Institute Cooperation (Branch) Belgorodskiy University Cooperation, Economy and Right (tel.: 8(4712)56-84-07)

INDISTINCT NEURONETWORK TECHNOLOGIES FOR CLASSIFICATION OF UNIFORM ELEMENTS OF BLOOD

In article the universal network structure intended for classification of uniform elements of blood on microscopic images of dabs of peripheral blood is considered. The offered model of the universal qualifier is realized by a uniform indistinct neural network. The scheme of algorithm of formation of network model for classification of pixels of the difficult structured image is provided.

Key words: *indistinct neural networks, uniform elements of blood, classification of pixels of the image.*

К сведению авторов

1. К публикации в «Известиях ЮЗГУ» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2. Объем статьи не должен превышать 8 страниц печатного текста, включая иллюстрации и таблицы.

3 Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

– статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

– рекомендацию кафедры или научно-исследовательского отдела учреждения, в котором выполнена данная работа;

– разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа (обязательно для статей по техническим специальностям, по экономическим – по требованию редколлегии);

– сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

– электронный носитель (CD-диск).

4. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами, что означает их согласие на передачу Университету прав на распространение материалов статьи с помощью печатных и электронных носителей информации.

5. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

6. **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается (если автор один и им представлена справка с места учебы).**

7. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

8. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (полужирный, прописные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, литература. Авторы, название, аннотация и ключевые слова приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается краткая аннотация курсивом, отражающая краткое содержание статьи.

Например:

> УДК 004.9:519.8
> **А.Л. Иванов**, канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск) (e-mail: ivanov@gmail.com)
> **ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ КАДРАМИ ГРАДООБРАЗУЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ**
> В статье рассматривается агентная модель прогнозирования обеспеченности кадрами градообразующего предприятия, основанная на структуризации поведения агента и определения влияния его внутреннего представления об окружающем мире на его деятельность.
> **Ключевые слова:** агентное моделирование, градообразующее предприятие, событие.

9. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

10. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω, η, β, μ, ω, υ и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (sin, cos, tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

11. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

12. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 *dpi* и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы**.

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

13. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы. Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

14. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 50-48-19, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала:

http://www.swsu.ru/izvestiya/index.php.