

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

9(181)
2011

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ
Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИНФОРМАТИЗАЦИИ

- Гуревич И. М. Атомы, молекулы и фундаментальные ограничения на информационные характеристики систем 2
Гюльмамедов Р. Г. Определение критических проблем информатизации регионов. . . 9

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

- Брусенцов Л. Е. Архитектура инструмента поиска оптимальных ключей компиляции 14
Алымова Е. В. Критерий полноты тестовых наборов, ориентированных на проверку распараллеливающих преобразований программ 19
Таганов А. И. Методы идентификации, анализа и сокращения проектных рисков качества программных изделий в условиях нечеткости 22

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

- Квасов И. Е., Петров И. Б., Санников А. В., Фаворская А. В. Компьютерное моделирование пространственных динамических процессов сеточно-характеристическим методом на неструктурированных тетраэдральных сетках. 28
Петров И. Б., Фаворская А. В. Библиотека методов интерполяции высоких порядков на неструктурированных треугольных и тетраэдральных сетках. 30
Бунькина Н. И., Лакеев Д. В. Задачи составления расписаний с альтернативными приборами. Решение с помощью генетических алгоритмов 33

СЕТИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

- Асадов Х. Г., Исмаилов К. Х. Информационный метод позиционирования объектов. . . 37
Ибрагимов Б. Г., Ибрагимов Г. Г. Эффективность передачи мультимедийного трафика многофункциональным абонентским и сетевым терминалом 40

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

- Кузнецов А. А. Принципы структурно-топологического анализа диаграмм ритма сердца 44
Сирота Е. А. Информационная система управления производством гемокомпонентов "Службы крови" 50

Журнал в журнале

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Галушкин А. И. Нейросетевые технологии в решении задач нейрореставрологии. . . 55
Осипов В. Ю. Устойчивость рекуррентных нейронных сетей с управляемыми сигналами 69
Каширина И. Л., Львович Я. Е., Тузиков А. А. Нейросетевое резервирование дублированных измерений параметров при наземных огневых испытаниях жидкостных ракетных двигателей 74
Contents 78
Приложение. Актуальные проблемы в исследованиях Института информационных технологий НАН Азербайджана

Главный редактор
НОРЕНКОВ И. П.

Зам. гл. редактора
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Редакционная
коллегия:

- АВДОШИН С. М.
АНТОНОВ Б. И.
БАТИЩЕВ Д. И.
БАРСКИЙ А. Б.
БОЖКО А. Н.
ВАСЕНИН В. А.
ГАЛУШКИН А. И.
ГЛОРИОЗОВ Е. Л.
ДОМРАЧЕВ В. Г.
ЗАГИДУЛЛИН Р. Ш.
ЗАРУБИН В. С.
ИВАННИКОВ А. Д.
ИСАЕНКО Р. О.
КОЛИН К. К.
КУЛАГИН В. П.
КУРЕЙЧИК В. М.
ЛЬВОВИЧ Я. Е.
МАЛЬЦЕВ П. П.
МЕДВЕДЕВ Н. В.
МИХАЙЛОВ Б. М.
НЕЧАЕВ В. В.
ПАВЛОВ В. В.
ПУЗАНКОВ Д. В.
РЯБОВ Г. Г.
СОКОЛОВ Б. В.
СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.
УСКОВ В. Л.
ФОМИЧЕВ В. А.
ЧЕРМОШЕНЦЕВ С. Ф.
ШИЛОВ В. В.

Редакция:

- БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЛЫСЕНКО А. В.
ЧУГУНОВА А. В.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.
Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования.
Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

УДК 004.6+ 524.834

И. М. Гуревич, канд. техн. наук, гл. конструктор,
Компания "ГЕТНЕТ Консалтинг",
e-mail: iggurevich@gmail.com

Атомы, молекулы и фундаментальные ограничения на информационные характеристики систем

Показано, что объем информации в атомах, азотистых основаниях, аминокислотах, их дифференциальная информационная емкость, масса атома водорода, структура и разность энергий его базисных состояний накладывают фундаментальные ограничения на память и быстродействие вычислительных устройств, информационных систем. Ограничения 10^{28} бит/кг, 10^{39} оп · с⁻¹ кг⁻¹ необходимо добавить в ряд фундаментальных природных ограничений.

Ключевые слова: атомы, молекулы, информационные характеристики, фундаментальные ограничения

Введение

Уже не одно десятилетие развитие производства запоминающих устройств и микрочипов связано с постоянным увеличением плотности записи информации на эти носители. Это могут быть проводники и $p-n$ -переходы на кремниевом кристалле или запись видеоклипа на магнитном носителе, но общим для них является появление все новых технологий, позволяющих год от года увеличивать плотность записи на один квадратный миллиметр поверхности. Может создаться впечатление, что завтра изобретут новую технологию и вновь увеличат плотность записи, и так будет всегда. Увы, существуют фундаментальные ограничения, которые неминуемо прекратят этот рост и поставят земную цивилизацию перед выбором: либо прекратить запоминать новую информацию, либо навсегда стирать накопленную ранее. Как скоро наступит этот момент? Экспоненциальный рост объемов хранимой на нашей планете информации может привести к такому поворотному для человечества моменту неожиданно скоро. Полезно задуматься уже сегодня.

Мифы нанотехнологий, раздуваемые в целях получения денег, описывают фантастические возможности предлагаемых к финансированию работ,

хотя возможности ученых и инженеров ограничены самой природой — конструкцией и свойствами атомов и молекул [1—3]. В статье показано, что объем информации в атомах, азотистых основаниях, аминокислотах [4—7], их дифференциальная информационная емкость, масса атома водорода, структура и разность энергий его базисных состояний [8, 9] накладывают фундаментальные ограничения на память и быстродействие вычислительных устройств, информационных систем.

1. Дифференциальная информационная емкость материи

Как показано в работах [4—7], существуют несколько типов материи с разной зависимостью объема информации (информационной емкости) от массы, в том числе:

- линейная для обычного вещества $I \propto M$;
- квадратичная для черных дыр $I \propto M^2$.

Примечание 1. Объем информации в квантах излучения не связан с их энергией (массой).

В общем случае зависимость объема информации в веществе от массы имеет вид $I = f(M)$. Изменение объема информации dI в материи при изменении ее массы dM определяется дифференциалом функции $I = f(M)$:

$$dI = \frac{df(M)}{dM} dM = f'(M)dM.$$

Производная объема информации по массе $\frac{dI}{dM} = \frac{df(M)}{dM} = f'(M)$ [бит/кг] характеризует дифференциальную информационную емкость (дифинформемкость) материи — изменение массы материи на единицу ($dM = 1$) изменяет объем информации в материи на величину, равную дифференциальной информационной емкости, $dI = f'(M)$.

Примечание 2. Обратим внимание на термодинамическую аналогию: теплоемкостью C тела называется отношение изменения количества теплоты dQ к вызванному этим изменению температуры dT : $\frac{dQ}{dT} = C$ или $dQ = CdT$. При $dT = 1$ изменение количества теплоты равно теплоемкости $dQ = C$.

Приведем оценки объема информации в атомах, аминокислотах, азотистых основаниях (обычном веществе), определяющие фундаментальные ограничения на дифференциальную информационную емкость устройств, создаваемых человеком.

Физическая система и связанная с ней информация. *Дискретное описание.* H — гильбертово пространство; $\psi \in H$ — вектор гильбертова пространства; $|e_i\rangle$, $i = 1, \dots, n$, — система базисных ортонормированных векторов гильбертова пространства H , $\langle e_i | e_j \rangle = \delta_{ij}$, $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j \\ 0, & \text{если } i \neq j \end{cases}$. Физическая система отождествляется с вектором (волновой функцией) $\psi \in H$: $\psi = \sum c_i |e_i\rangle$. Физическая система $\psi = \sum c_i |e_i\rangle$ по отношению к базису ($e_i = (|e_1\rangle, \dots, |e_n\rangle)$) наделена вероятностным пространством: множество Ω элементарных событий (исходов) составляют базисные вектора $|e_i\rangle$; вероятностная мера задается квадратами модулей коэффициентов $c_i \Rightarrow p_i = |c_i|^2$ — вероятность реализации состояния e_i при измерении физической системы в базисе (e_i); $\sum p_i = \sum |c_i|^2 = 1$. Информационная энтропия (по Шеннону) случайной величины x , принимающей значения x_i с вероятностями p_i ($\sum p_i = 1$), по определению равна $N = -\sum p_i \log_2 p_i$ бит. Информационная энтропия характеризует неопределенность, содержащуюся в случайной величине x (до измерения) и/или информацию, содержащуюся в случайной величине x (после измерения). Таким образом, физическая система, отождествляемая с вектором (волновой функцией) $\psi = \sum c_i |e_i\rangle$, несет (содержит) $N = -\sum p_i \log_2 p_i = \sum |c_i|^2 \log_2 |c_i|^2$ бит неопределенности (информации). Физическая система (кубит), отождествляемая с вектором (волновой функцией) $\psi = c_1 |e_1\rangle + c_2 |e_2\rangle$, несет (содержит) $N = -(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2) = -(|c_1|^2 \log_2 |c_1|^2 + |c_2|^2 \log_2 |c_2|^2)$ бит неопределенности (информации). При $|c_1| = |c_2| = \frac{1}{\sqrt{2}}$ физическая система (кубит), отождествляемая с век-

тором (волновой функцией) $\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} (|e_1\rangle + |e_2\rangle)$,

несет (содержит) 1 бит неопределенности (информации).

Непрерывное описание. Физическая система, отождествляемая с вектором (волновой функцией), в представлении (базисе), в котором записана волновая функция, несет (содержит)

$$N = - \int_0^a |\psi(q)|^2 \log_2 |\psi(q)|^2 dq \text{ бит неопределенности (информации).}$$

Методика иерархической оценки объема информации в физических системах. Сначала оценивается объем информации в системах нижнего уровня (лептонах и кварках). Согласно основному принципу квантовой механики Цайлингера считаем, что в системах нижнего уровня — фундаментальных частицах — содержится 1 бит информации. Далее оценивается объем неопределенности (информации) в системах второго уровня (мезонах и барионах). Она равна сумме объемов информации систем нижнего уровня плюс объем информации, заключенной в структуре системы второго уровня иерархии. Объем информации в структуре системы второго уровня оценивается по волновой функции системы второго уровня и/или по графу, отображающему его структуру. Затем оценивается объем информации в системах следующего уровня иерархии (атомах), который равен сумме объемов информации, входящих в его состав систем предыдущих уровней (протонах, нейтронах, электронах), плюс объем информации, заключенной в структуре атома. Аналогично оценивается объем информации в молекулах и т. д.

Примечание 3. В работе не используются оценки объема информации в квантах излучения, поскольку информация в них не связана с массой. В табл. 1 приведены оценки объема информации в атомах

Таблица 1

Наименование элемента	Заряд (атомный номер) — число протонов, электронов	Масса, а.е.	Масса, кг	Объем информации в протонах и нейтронах	Масса на 1 бит	Дифинформ-емкость, бит/кг
Водород	1	1,00794	1,67318E-27	10,422	1,60543E-28	6,22886E+27
Гелий	2	4,0026	6,64432E-27	39,688	1,67414E-28	5,97323E+27
Литий	3	6,941	1,15221E-26	59,532	1,93544E-28	5,16678E+27
Бериллий	4	9,01218	1,49602E-26	88,798	1,68475E-28	5,93561E+27
Бор	5	10,811	1,79463E-26	99,22	1,80873E-28	5,52873E+27
Углерод	6	12,011	1,99383E-26	109,642	1,81849E-28	5,49908E+27
Азот	7	14,0067	2,32511E-26	138,908	1,67385E-28	5,97425E+27
Кислород	8	15,9994	2,6559E-26	149,33	1,77854E-28	5,62258E+27
Фтор	9	18,9984	3,15373E-26	169,174	1,8642E-28	5,36424E+27
Неон	10	20,179	3,34971E-26	198,44	1,68802E-28	5,92409E+27
Натрий	11	22,9897	3,81629E-26	218,284	1,74832E-28	5,7198E+27
Магний	12	24,305	4,03463E-26	238,128	1,69431E-28	5,9021E+27
Алюминий	13	26,9815	4,47893E-26	257,972	1,73621E-28	5,75968E+27
Кремний	14	28,0855	4,66219E-26	277,816	1,67816E-28	5,95891E+27
Фосфор	15	30,9737	5,14163E-26	297,66	1,72735E-28	5,78921E+27
Сера	16	32,066	5,32296E-26	317,504	1,6765E-28	5,96481E+27

Наименование элемента	Заряд (атомный номер) — число протонов, электронов	Масса, а.е.	Масса, кг	Объем информации в протонах и нейтронах	Масса на 1 бит	Дифинформ-емкость, бит/кг
Хлор	17	35,453	5,8852E-26	346,77	1,69715E-28	5,89224E+27
Аргон	18	39,948	6,63137E-26	385,458	1,72039E-28	5,81265E+27
Калий	19	39,0983	6,49032E-26	386,458	1,67944E-28	5,95438E+27
Кальций	20	40,078	6,65295E-26	396,88	1,67631E-28	5,96548E+27
Скандий	21	44,9559	7,46268E-26	435,568	1,71332E-28	5,83662E+27
Титан	22	47,88	7,94808E-26	464,834	1,70987E-28	5,84838E+27
Ванадий	23	50,9415	8,45629E-26	494,1	1,71145E-28	5,84299E+27
Хром	24	51,9961	8,63135E-26	504,522	1,7108E-28	5,84523E+27
Марганец	25	54,938	9,11971E-26	533,788	1,70849E-28	5,85313E+27
Железо	26	55,847	9,2706E-26	544,21	1,7035E-28	5,87028E+27
Кобальт	27	58,9332	9,78291E-26	573,476	1,7059E-28	5,86202E+27
Никель	28	58,69	9,74254E-26	574,476	1,6959E-28	5,89657E+27
Медь	29	63,546	1,05486E-25	622,586	1,69433E-28	5,90205E+27
Цинк	30	65,39	1,08547E-25	642,43	1,68964E-28	5,91843E+27
Галлий	31	69,723	1,1574E-25	681,118	1,69927E-28	5,88489E+27
Германий	32	72,59	1,20499E-25	710,384	1,69626E-28	5,89533E+27
Мышьяк	33	74,9216	1,2437E-25	730,228	1,70316E-28	5,87142E+27
Селен	34	78,96	1,31074E-25	768,916	1,70465E-28	5,86629E+27
Бром	35	79,904	1,32641E-25	779,338	1,70197E-28	5,87556E+27
Криптон	36	83,8	1,39108E-25	818,026	1,70053E-28	5,88051E+27
Рубидий	37	85,4678	1,41877E-25	837,87	1,6933E-28	5,90563E+27
Стронций	38	87,62	1,45449E-25	857,714	1,69578E-28	5,897E+27
Иттрий	39	88,9059	1,47584E-25	868,136	1,70001E-28	5,88233E+27
Цирконий	40	91,244	1,51432E-25	897,402	1,68745E-28	5,92611E+27
Ниобий	41	92,9064	1,54225E-25	907,824	1,69884E-28	5,88638E+27
Молибден	42	95,94	1,5926E-25	937,09	1,69952E-28	5,88401E+27
Технеций	43	97,9072	1,62526E-25	956,934	1,6984E-28	5,88788E+27
Рутений	44	101,07	1,67776E-25	995,622	1,68514E-28	5,93423E+27
Родий	45	102,905	1,70822E-25	1006,044	1,69796E-28	5,88942E+27
Палладий	46	106,42	1,76657E-25	1044,732	1,69093E-28	5,91389E+27
Серебро	47	107,868	1,79061E-25	1055,154	1,69701E-28	5,89271E+27
Кадмий	48	112,41	1,86601E-25	1103,264	1,69135E-28	5,91244E+27
Индий	49	114,82	1,90601E-25	1123,108	1,69709E-28	5,89245E+27
Олово	50	118,71	1,97059E-25	1161,796	1,69615E-28	5,89569E+27
Сурьма	51	121,75	2,02105E-25	1191,062	1,69685E-28	5,89328E+27
Теллур	52	127,6	2,11816E-25	1248,594	1,69644E-28	5,89471E+27
Иод	53	126,904	2,10661E-25	1240,172	1,69864E-28	5,88706E+27
Ксенон	54	131,29	2,17941E-25	1288,282	1,69172E-28	5,91114E+27
Цезий	55	132,905	2,20622E-25	1298,704	1,69879E-28	5,88655E+27
Барий	56	137,33	2,27968E-25	1346,814	1,69265E-28	5,90791E+27
Лантан	57	138,905	2,30582E-25	1357,236	1,69891E-28	5,88612E+27
Церий	58	140,12	2,32599E-25	1377,08	1,68908E-28	5,9204E+27
Празеодим	59	140,9	2,33894E-25	1378,08	1,69725E-28	5,8919E+27
Неодим	60	144,24	2,39438E-25	1416,768	1,69003E-28	5,91705E+27
Прометий	61	147	2,4402E-25	1446,034	1,68751E-28	5,92588E+27
Самарий	62	150,35	2,49581E-25	1475,3	1,69173E-28	5,91111E+27
Европий	63	151,96	2,52254E-25	1485,722	1,69785E-28	5,8898E+27
Гадолиний	64	157,25	2,61035E-25	1543,254	1,69146E-28	5,91206E+27
Тербий	65	158,92	2,63807E-25	1553,676	1,69796E-28	5,88944E+27
Диспрозий	66	162,5	2,6975E-25	1592,364	1,69402E-28	5,90311E+27
Гольмий	67	164,93	2,73784E-25	1612,208	1,69819E-28	5,88862E+27
Эрбий	68	167,26	2,77652E-25	1641,474	1,69148E-28	5,91199E+27
Тулий	69	168,93	2,80424E-25	1651,896	1,69759E-28	5,89071E+27
Иттербий	70	173,04	2,87246E-25	1700,006	1,68968E-28	5,91828E+27
Лютеций	71	174,97	2,9045E-25	1710,428	1,69811E-28	5,88889E+27
Гафний	72	178,49	2,96293E-25	1749,116	1,69396E-28	5,90332E+27
Тантал	73	180,947	3,00372E-25	1768,96	1,69801E-28	5,88923E+27
Вольфрам	74	183,85	3,05191E-25	1798,226	1,69718E-28	5,89213E+27
Ренетий	75	186,207	3,09104E-25	1827,492	1,69141E-28	5,91223E+27
Осмий	76	190,2	3,15732E-25	1866,18	1,69186E-28	5,91065E+27
Иридий	77	192,22	3,19085E-25	1886,024	1,69184E-28	5,91072E+27
Платина	78	195,08	3,23833E-25	1915,29	1,69078E-28	5,91444E+27
Золото	79	196,966	3,26964E-25	1925,712	1,69788E-28	5,88968E+27
Ртуть	80	200,59	3,32979E-25	1964,4	1,69507E-28	5,89946E+27

Наименование элемента	Заряд (атомный номер) — число протонов, электронов	Масса, а.е.	Масса, кг	Объем информации в протонах и нейтронах	Масса на 1 бит	Дифинформ-емкость, бит/кг
Таллий	81	204,383	3,39276E-25	2003,088	1,69376E-28	5,90401E+27
Свинец	82	207,2	3,43952E-25	2032,354	1,69238E-28	5,90883E+27
Висмут	83	208,982	3,4691E-25	2042,776	1,69823E-28	5,88849E+27
Полоний	84	209,987	3,48578E-25	2053,198	1,69773E-28	5,8902E+27
Астат	85	222,017	3,68548E-25	2176,684	1,69316E-28	5,9061E+27
Радон	86	131,29	2,17941E-25	2262,482	9,63285E-29	1,03811E+28
Франций	87	223,019	3,70212E-25	2188,106	1,69193E-28	5,91042E+27
Барий	88	226,025	3,75202E-25	2217,372	1,6921E-28	5,90982E+27
Актиний	89	227,027	3,76865E-25	2227,794	1,69165E-28	5,91139E+27
Торий	90	232,03	3,8517E-25	2275,904	1,69238E-28	5,90883E+27
Протактиний	91	231,03	3,8351E-25	2267,482	1,69135E-28	5,91245E+27
Уран	92	238,02	3,95113E-25	2334,436	1,69254E-28	5,90827E+27
Нептуний	93	237,04	3,93486E-25	2326,014	1,69168E-28	5,91129E+27
Плутоний	94	244,06	4,0514E-25	2392,968	1,69304E-28	5,90653E+27
Америций	95	243,06	4,0348E-25	2384,546	1,69206E-28	5,90995E+27
Кюрий	96	247,07	4,10136E-25	2423,234	1,69252E-28	5,90836E+27
Берклий	97	247,07	4,10136E-25	2424,234	1,69182E-28	5,9108E+27
Калифорний	98	251,07	4,16776E-25	2462,922	1,6922E-28	5,90946E+27
Эйнштейний	99	252,08	4,18453E-25	2473,344	1,69185E-28	5,91069E+27
Фермий	100	257,09	4,26769E-25	2521,454	1,69255E-28	5,90824E+27
Менделевий	101	258,09	4,28429E-25	2531,876	1,69214E-28	5,90967E+27
Нобелий	102	259,1	4,30106E-25	2542,298	1,6918E-28	5,91086E+27
Лоуренсий	103	260,1	4,31766E-25	2552,72	1,6914E-28	5,91228E+27
Резерфордий	104	261	4,3326E-25	2563,142	1,69035E-28	5,91594E+27
Дубний	105	262	4,3492E-25	2573,564	1,68995E-28	5,91733E+27
Сиборговий	106	263	4,3658E-25	2583,986	1,68956E-28	5,9187E+27
Борий	107	262	4,3492E-25	2594,408	1,67637E-28	5,96525E+27
Хассий	108	265	4,399E-25	2604,83	1,68879E-28	5,92141E+27
Мейтнерий	109	266	4,4156E-25	2615,252	1,6884E-28	5,92276E+27
Ун-ун-нулий	110	271	4,4986E-25	2663,362	1,68907E-28	5,92042E+27
Средняя			2,46354E-23		1,69449E-28	5,92149E+27

[5—7] и дифференциальной информационной емкости атомов. Приводимые оценки учитывают объем информации в протонах, нейтронах и электронах. При оценке информации в атоме водорода учитывается также структура спиновых состояний протона и электрона.

В среднем в атомах на 1 бит информации используется $\approx 1,69 \cdot 10^{-28}$ кг массы вещества, а среднее квадратичное отклонение равно $\sim 7,86 \cdot 10^{-30}$, что не превосходит 5 % от среднего значения. Это примерно в $6 \cdot 10^{11}$ раз больше минимальной массы, необходимой для формирования 1 бита микроинформации при температуре 2,7 К, $m_{\min} = \frac{kT}{c^2} \ln 2 = \frac{2,7k}{c^2} \ln 2 \approx 10^{-40}$ кг.

Примечание 4. "Внутриатомная" информация определяет предел плотности информации в обычной материи, но информация этого типа не может быть реально использована в запоминающих устройствах или процессорах для хранения информации. Эта информационная емкость обозначает только некоторый предел, который заведомо нельзя перейти.

В табл. 2 приведены примеры оценки объема информации в аминокислотах и азотистых основа-

ниях [5—7] и дифференциальной информационной емкости аминокислот и азотистых оснований.

Методика оценки объема информации и дифференциальной информационной емкости азотистых оснований и аминокислот по частоте их использования в ДНК, РНК, белках (частотная методика). Оценку объема информации и дифференциальной информационной емкости азотистых оснований и аминокислот можно осуществлять в соответствии с используемой ранее **иерархической методикой**. При этом будут получены оценки, близкие к предыдущим. В данном случае мы используем то замечательное обстоятельство, что четырьмя азотистыми основаниями (четырьмя "буквами") природа кодирует ("записывает") аминокислоты, а 20 аминокислотами (20 "буквами") природа кодирует ("записывает") белки. Поэтому считаем, что (при равновероятном использовании) азотистое основание содержит $\log_2 4 = 2$ бита информации, а аминокислота — $\log_2 20 = 4,32$ бита.

В среднем в азотистых основаниях и аминокислотах на 1 бит информации используется $\approx 10^{-25} \dots 10^{-26}$ кг массы вещества, а избыточность по отношению к минимальной массе составляет порядка 10^{15} раз.

Такую же массу, как аминокислоты и азотистые основания имеют атомы от иттрия — 37 Y 88,9059;

Таблица 2

Наименование	Масса, а.е.	Масса, кг	Объем информации, бит	Масса на 1 бит, кг/бит	Диф-информ-емкость, бит/кг
Азотистые основания и сахара					
Аденин	135,13	2,24E-25	2,0	1,12E-25	8,92E+24
Гуанин	151,13	2,51E-25	2,0	1,25E-25	7,97E+24
Тимин	126,11	2,09E-25	2,0	1,05E-25	9,55E+24
Цитозин	111,1	1,84E-25	2,0	9,22E-26	1,08E+25
Урацил	112,1	1,86E-25	2,0	9,30E-26	1,07E+25
Дезокси-рибоза	134	2,22E-25	2,0	1,11E-25	8,99E+24
Рибоза	150	2,49E-25	2,0	1,25E-25	8,03E+24
Сумма				7,63E-25	1,31E+24
Среднее				1,09E-25	9,17E+24
Среднее на 1 бит				0,55E-25	1,83E+25
Аминокислоты					
Аланин	89,09	1,48E-25	4,321	3,42E-26	2,92E+25
Аргинин	174,2	2,89E-25	4,321	6,69E-26	1,49E+25
Аспарагиновая кислота	133,1	2,21E-25	4,321	5,11E-26	1,96E+25
Аспарагин	132,12	2,19E-25	4,321	5,07E-26	1,97E+25
Валин	117,16	1,94E-25	4,321	4,50E-26	2,22E+25
Гистидин	155,16	2,58E-25	4,321	5,96E-26	1,68E+25
Глицин	75,07	1,25E-25	4,321	2,88E-26	3,47E+25
Глутаминовая кислота	147,13	2,44E-25	4,321	5,65E-26	1,77E+25
Глутамин	146,15	2,43E-25	4,321	5,61E-26	1,78E+25
Изолейцин	131,17	2,18E-25	4,321	5,04E-26	1,98E+25
Лейцин	131,17	2,18E-25	4,321	5,04E-26	1,98E+25
Лизин	146,19	2,43E-25	4,321	5,61E-26	1,78E+25
Метионин	149,21	2,48E-25	4,321	5,73E-26	1,74E+25
Пролин	115,13	1,91E-25	4,321	4,42E-26	2,26E+25
Серин	105,09	1,74E-25	4,321	4,04E-26	2,48E+25
Тирозин	181,19	3,01E-25	4,321	6,96E-26	1,44E+25
Треонин	119,12	1,98E-25	4,321	4,58E-26	2,19E+25
Триптофан	204,22	3,39E-25	4,321	7,84E-26	1,27E+25
Фенилаланин	165,19	2,74E-25	4,321	6,34E-26	1,58E+25
Цистеин	121,16	2,01E-25	4,321	4,65E-26	2,15E+25
Сумма	2738,02	4,55E-24		1,05E-24	9,51E+23
Среднее	136,901	2,27E-25		5,26E-26	1,90E+25
Среднее на 1 бит	31,67	5,26E-26		1,22E-26	8,22E+25

циркония — 40 Zr 91,22 (минимальная масса) до таллия 81 — Tl 204,37; свинца — 82 Pb — 207,2 (максимальная масса). К средней массе аминокислот и азотистых оснований близки массы атомов 53 I 126,9045 — йод; 54 Xe — 131,30 — ксенон; 55 Cs 132,9054 — цезий; 56 Ba 137,33 — барий и 57 La 138,9 — лантан. В среднем в атомах и азотистых основаниях и аминокислотах на 1 бит информации (по иерархической методике оценки) используется $\approx 1,69 \cdot 10^{-28}$ кг массы вещества. Белки и аминокислоты для формирования 1 бита информации используют массы всего на два-три порядка больше, чем атомы, $\approx 10^{-25}$ кг (по частотной методике оценки). Следовательно, кодирование информации в ДНК, РНК, белках азотистыми основаниями и аминокислотами весьма эффективно.

2. Основные характеристики атома водорода

Рассмотрим используемые в статье характеристики атома водорода [8]. Атом водорода состоит из протона и электрона.

Масса атома водорода — $m_H = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

Диаметр атома водорода — $d_H \approx 10^{-10}$ м.

Объем атома водорода — $V_H \approx 10^{-30}$ м³.

Следуя [9], определим исходные (нестационарные) спиновые базисные состояния атома водорода.

|+ +) — Состояние 1: и у электрона, и у протона спины смотрят вверх.

|+ -) — Состояние 2: у электрона спин смотрит вверх, а у протона — вниз.

|- +) — Состояние 3: у электрона спин смотрит вниз, а у протона — вверх.

|- -) — Состояние 4: и у электрона, и у протона спины смотрят вниз.

Первый знак плюс или минус относится к электрону, второй знак — к протону.

Будем обозначать эти состояния |1), |2), |3) и |4).

Описание динамики атома водорода осуществляется следующей гамильтоновой матрицей H_{ij} :

$$H_{ij} = \begin{pmatrix} A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -A & 2A & 0 \\ 0 & 2A & -A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A \end{pmatrix}.$$

Дифференциальные уравнения для четырех амплитуд C_i стационарных базисных состояний имеют вид

$$i\hbar \dot{C}_1 = AC_1,$$

$$i\hbar \dot{C}_2 = -AC_2 + 2AC_3,$$

$$i\hbar \dot{C}_3 = 2AC_2 - AC_3,$$

$$i\hbar \dot{C}_4 = AC_4.$$

Уровни энергии стационарных состояний атома водорода получим, решив гамильтоновы уравнения.

Первое решение — стационарное состояние |I) = |1) = |+ +). $E_I = A$.

Следующее решение — состояние |II) = |4) = |- -), $E_{II} = A$.

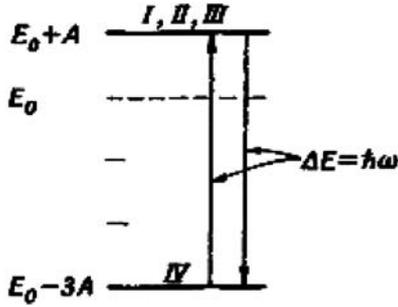
Решения |III) и |IV) — это суперпозиции состояний |2) и |3):

$$|III) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|2) + |3)) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+ -) + |- +)), \quad E_{III} = A,$$

$$|IV) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|2) - |3)) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+ -) - |- +)), \quad E_{IV} = -3A.$$

Найдены четыре стационарных ортогональных (базисных) состояния и их энергии. Три состояния

имеют энергию, равную A , а последнее состояние — $3A$ (см. рисунок).



Различие в энергиях между состоянием $|IV\rangle$ и любым из остальных равно $4A$. Атом, который находится в состоянии $|I\rangle$, может отсюда перейти в состояние $|IV\rangle$ и испустить микроволновой квант. Если осветить водородный газ микроволнами, произойдет поглощение энергии. Атомы в состоянии $|IV\rangle$ будут поглощать кванты излучения и переходить в одно из состояний с энергией A , но все это только на частоте $\omega = 4A/\hbar$, равной

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = (1\,420\,405\,751,800 \pm 0,028) \text{ Гц.}$$

Это частота, соответствующая длине волны спектральной линии в 1420 МГц — 21-см линия водорода. Излучение с такой длиной волны испускается или поглощается атомарным водородным газом в галактиках.

3. Атом водорода как кубит

Рассмотрим атом водорода как кубит (в качестве квантового бита) [10].

Для кубита состояние с максимальной информационной энтропией имеет вид

$$\psi_H = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle).$$

Кубит — это система, имеющая два выделенных (базисных) стационарных состояния с определенными энергиями ($|0\rangle$, $|1\rangle$) и состояния ψ , представимые в виде линейных комбинаций выделенных состояний $\psi = c_1|0\rangle + c_2|1\rangle$, где c_1 , c_2 — произвольные комплексные коэффициенты, сумма квадратов модулей которых равна 1: $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$.

Неопределенность (объем информации) кубита с двумя выделенными состояниями равна $N = -(|c_1|^2 \ln|c_1|^2 + |c_2|^2 \ln|c_2|^2)$, где $|c_1|^2$, $|c_2|^2$ — вероятности нахождения кубита в состояниях 1, 2. Максимальная неопределенность (информация) кубита с двумя выделенными состояниями достигается при $|c_1|^2 = |c_2|^2 = 1/2$ и равна 1 биту.

При этом естественно определить кубит на энергетически легко различимых базисных состояниях атома водорода с разной энергией. Кубит на основе состояний атома водорода можно сформировать несколькими способами.

1. Состояние $|0\rangle$ отождествим с базисным состоянием атома водорода $|IV\rangle$, имеющим минимальную энергию. Состояние $|1\rangle$ отождествим с базисным состоянием атома водорода $|III\rangle$.

2. Состояние $|0\rangle$ отождествим с базисным состоянием атома водорода $|IV\rangle$. Состояние $|1\rangle$ отождествим с базисным состоянием атома водорода $|I\rangle$.

3. Состояние $|0\rangle$ отождествим с базисным состоянием атома водорода $|IV\rangle$, а состояние $|1\rangle$ отождествим с суперпозицией базисных состояний атома

водорода $|I\rangle$, $|II\rangle$, $|III\rangle$. Состояние $|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} (|I\rangle + |II\rangle + |III\rangle)$. Так как базисные состояния $|I\rangle$, $|II\rangle$, $|III\rangle$ ортогональны базисному состоянию $|IV\rangle$, то их суперпозиция также ортогональна базисному состоянию $|IV\rangle$, а нормировочный множитель $\frac{1}{\sqrt{3}}$ обеспечивает равенство единице нормы суперпозиции.

Во всех случаях разница энергий базисных состояний атома водорода, рассматриваемого как кубит, равна

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_0 - E_1 = h\nu = hf \approx \\ &\approx 1,054 \cdot 10^{-34} \cdot 1,42 \cdot 10^{12} = 1,5 \cdot 10^{-22} \text{ Дж.} \end{aligned}$$

4. Фундаментальные ограничения на информационную емкость

Приведенные в разд. 1—3 оценки объема информации, дифференциальная информационная емкость атомов, азотистых оснований, аминокислот определяют фундаментальные ограничения на информационную емкость устройств хранения

данных $I = f(M) = \int_0^M f'(m) dm$. Для обычного веще-

ства $I = \beta M$, $f'(M) = \beta$. Дифференциальная информационная емкость обычного вещества не зависит от его массы. Для обычного вещества, содержащего в атоме, молекуле $I_{at, mol}$ бит информации, на 1 бит

информации необходима масса $\beta = \frac{I_{at, mol}}{m_{at, mol}}$. По-

этому $I = \frac{I_{at, mol}}{m_{at, mol}} M$; $f'(M) = \frac{I_{at, mol}}{m_{at, mol}}$. Как показано

в работе [6], дифференциальная информационная емкость атомов разных элементов и, соответственно, молекул, примерно одинакова.

Ограничение, накладываемое дифференциальной информационной емкостью неживой материи.

Атомы — это простейшие естественные средства хранения информации. На основе оценки дифференциальной информационной емкости атомов $\approx 10^{-28}$ бит/кг определяется нижняя граница G дифференциальной информационной емкости V искусственных устройств хранения данных $G \approx 10^{-28}$ бит/кг. Следовательно, информационная

емкость I искусственных устройств хранения данных, построенных на базе атомов, не превосходит $\leq 10^{28} M$ бит, где M — масса устройства хранения данных, непосредственно используемая для хранения. Так как в настоящее время дифференциальная информационная емкость устройств хранения данных $\approx 10^{14}$ бит/кг [5], то для устройств, построенных на базе атомов, она может быть повышена не более, чем в $\approx 10^{14}$ раз.

Данное ограничение ($\leq 10^{28} M$) является наиболее сильным фундаментальным ограничением, накладываемым природой на информационную емкость естественных и искусственных систем.

Ограничение, накладываемое характеристиками атома водорода. На один бит в атоме водорода, рассматриваемого как кубит, природа тратит $m_H = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Следовательно, информационная емкость I искусственных устройств хранения данных, построенных на базе атомов водорода, используемых как кубиты, не превосходит $\leq 6 \cdot 10^{26} M$ бит, где M — масса устройства хранения данных, непосредственно используемая для хранения, — масса водорода.

Ограничение, накладываемое дифференциальной информационной емкостью живой материи. Белки, ДНК — это простейшие естественные средства хранения информации, построенные природой из атомов. На основе оценки дифференциальной информационной емкости белков, ДНК $\approx 10^{-25}$ бит/кг определяется нижняя граница G дифференциальной информационной емкости V искусственных устройств хранения данных — и устройств, построенных на базе комбинаций атомов, $G \approx 10^{-25}$ бит/кг. Следовательно, информационная емкость I искусственных устройств хранения данных, построенных на базе комбинаций атомов, не превосходит $\leq 10^{25} M$ бит, где M — масса устройства хранения данных непосредственно используемая для хранения. Так как в настоящее время дифференциальная информационная емкость устройств хранения данных $\approx 10^{14}$ бит/кг, то для устройств, построенных на базе комбинаций атомов, она может быть повышена не более, чем в $\approx 10^{11}$ раз.

5. Фундаментальные ограничения на производительность

Разность энергий или энергия активации базисных состояний атома водорода, рассматриваемого как кубит, накладывает фундаментальные ограничения на быстродействие вычислительных устройств. Согласно теореме Н. Марголиса и Л. Левитина [4] общее число элементарных действий, которые система может выполнить в секунду, ограничено: $k_{on/c} = 2E/\hbar$, где E — превышение средней энергии системы над энергией нижнего состояния, или энергия активации, используемая при переходе из одного состояния в другое, $\hbar = h/2\pi = 1,0545 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — уменьшенная постоянная

Планка. Число операций, выполняемых атомом водорода как кубитом, ограничено значением $k_{op/s} = 2\Delta E/\hbar \approx 1,5 \cdot 10^{12}$ операций в секунду.

6. Фундаментальные ограничения на характеристики компьютера массой один килограмм, построенного из атомов водорода

Память компьютера массой 1 кг, построенного из атомов водорода, не превышает $0,6 \cdot 10^{27}$ бит.

Производительность компьютера массой 1 кг, построенного из атомов водорода, не превышает 10^{39} операций/с.

7. Ограничения на характеристики компьютера наноробота

В 1986 г. американский инженер Эрик Дрекслер предложил использовать для производства нанороботов механические машины соответствующих (100...200 нм) размеров — нанороботы [2]. Эти роботы должны были собирать устройство непосредственно из атомов, поэтому они были названы ассемблерами — сборщиками. Сборщик оснащен манипуляторами длиной в несколько десятков нанометров, двигателем для перемещения манипуляторов и самого робота, включая упомянутые ранее редукторы и передачи, а также автономным источником энергии. Наноробот должен состоять из нескольких десятков тысяч деталей, а каждая деталь — из одной-двух сотен атомов. Важнейшим узлом наноробота был бортовой компьютер, который управлял работой всех механизмов, определял, какой атом или какую молекулу следовало захватить манипулятором и в какое место будущего устройства их поставить. Линейные размеры этого компьютера не должны были превышать 40...50 нм. Объем компьютера равен $V_C \approx 10^{-22}$ м³. В таком компьютере можно разместить 10^8 атомов водорода. Следовательно, память компьютера наноробота, построенного из атомов водорода, не превышает 10^8 бит, а его производительность — 10^{20} операций/с.

Заключение

1. Оценки объема информации в атомах, азотистых основаниях, аминокислотах, дифференциальная информационная емкость обычного вещества определяют фундаментальные ограничения на информационную емкость устройств хранения данных.

2. Объем информации в атоме водорода, структура и разность энергий или энергия активации базисных состояний атома водорода, рассматриваемого как кубит, накладывают фундаментальные ограничения на память и быстродействие вычислительных устройств.

3. Ограничения информационной емкости 10^{28} бит/кг и производительности 10^{39} операций/с на 1 кг массы компьютера можно добавить в ряд

фундаментальных природных ограничений, включающих скорость света, элементарный заряд, планковское время, ...

4. Приводимые оценки не учитывают затраты массы, энергии и времени на управление процессами хранения информации и вычислений, которые могут многократно увеличить массогабаритные и временные характеристики вычислительных систем и существенно уменьшить приведенные значения памяти и быстродействия. В статье также не рассматривается возможность кодирования информации состояниями безмассовых полей, например фотонами.

Список литературы

1. Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б. Наномехатроника: состояние, проблемы, перспективы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 1. С. 2–14.

2. Дрекслер К. Э. Машины создания. Грядущая эра нанотехнологии. URL: <http://filosof.historic.ru/books/item/f00/s00/z0000328>
3. Эрлих Г. В. Мифы нанотехнологий. 4 июня 2010. URL: http://www.nanometer.ru/2010/06/04/12756380321857_214259.html
4. Гуревич И. М. Законы информатики — основа строения и познания сложных систем. Изд. второе, уточн. и доп. М.: Торус Пресс, 2007. 400 с.
5. Гуревич И. М. Оценка основных информационных характеристик Вселенной // Информационные технологии. 2008. № 12. Приложение. 32 с.
6. Гуревич И. М. Информационные характеристики физических систем. М.: 11-й ФОРМАТ; Севастополь: Кипарис, 2009. 170 с.
7. Гуревич И. М. Оценка объема неопределенности (информации) в элементарных частицах, атомах и молекулах // Вестн. СевНТУ. Сер. Физика и математика: сб. научн. тр. — Севастополь, 2009. — Вып. 99. — С. 121–129.
8. Атом водорода. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki>.
9. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс Э. Фейнмановские лекции по физике. Т. 8. М.: Мир, 1967.
10. Валиев К. А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // УФН. 2005. Т. 175, № 1.

УДК 15.519.876

Р. Г. Гюльмамедов, канд. техн. наук, доц.,
Азербайджанский государственный
экономический университет,
e-mail: gulmamedovr@rambler.ru

Определение критических проблем информатизации регионов

Отмечается актуальность вопроса проблем информатизации в условиях перехода к постиндустриальной информационной экономике. Анализируются недостатки общепринятых способов решения, основанных на методах экспертных оценок. Предлагается способ, позволяющий повысить эффективность решения путем использования методов экспериментальной психосемантики и многомерного неметрического шкалирования. Дается описание технологии и пример применения способа.

Ключевые слова: инновационный регион, проблемы информатизации, ранжирование, многомерное неметрическое шкалирование

Введение

Информационная парадигма современной постиндустриальной экономики (информационной экономики, экономики знаний) ставит фактор информатизации в число важнейших условий инновационного развития и экономического роста регионов [1–5]. Однако на практике эта теоретическая

посылка сталкивается с многочисленными проблемами, обусловленными реальными условиями и реальными возможностями конкретных регионов [5], такими, например, как недооценка властями роли информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в развитии экономики региона, отсутствие в регионе развитой ИКТ-инфраструктуры, отсутствие навыков ИКТ-менеджмента у руководства предприятий, недостаточная надежность и безопасность ИКТ-среды, несовершенство налоговой системы и нормативной базы в области ИКТ и т. д. [1, 4, 5].

Важное практическое значение в связи с этим приобретает вопрос правильного определения критических проблем информатизации (КПИ), отражающий реальные условия и реальные возможности региона в контексте его стратегических приоритетов и целей экономического развития. Решение вопроса закладывает надежную основу для формирования региональных программ информатизации, или, пользуясь терминологией группы Economist Intelligence Unit (EIU) [4], — для осуществления эффективного ИКТ-менеджмента в регионе.

В статье предлагается технология решения вопроса, основанная на методах экспериментальной психосемантики и многомерного неметрического шкалирования. Технология позволяет интегрировать психологические достоинства индивидуальных и групповых технологий экспертного опроса, широко используемых в проектном менеджменте [6, 7], и на этой основе повысить эффективность и надежность (объективность) процедуры определения КПИ.

1. Состояние вопроса

В соответствии с определением EIU "под ИКТ понимается оборудование, программное обеспечение и услуги в области информационных технологий, а также телекоммуникационное оборудование и услуги" [4]. Группой EIU была предпринята попытка определить КПИ, сдерживающие рост макроэкономических показателей в странах Европы и США. В результате крупномасштабных эмпирических исследований был определен Контрольный перечень критических проблем, сдерживающих внедрение ИКТ (*ICT enablers*) и не позволяющих в полной мере реализовать имеющийся ИКТ-потенциал. К таким проблемам отнесены следующие:

- ценовая доступность — стоимость двадцати часов доступа в Интернет по отношению к национальному доходу;
- конкуренция на рынке телекоммуникаций;
- безопасность ИКТ-инфраструктуры;
- роль государства (государственное стимулирование и финансирование ИКТ-сектора, уровень цензуры);
- законодательство в области использования сети Интернет;
- ИКТ-квалификация руководства предприятий;
- качество служб поддержки ИКТ.

Контрольный перечень КПИ группы EIU носит общий характер, и, естественно, вопрос определения проблем, критических для отдельного конкретного региона, требует специального анализа. Необходимость такого анализа обусловлена следующими обстоятельствами:

- проблемы из Контрольного перечня EIU могут иметь разную значимость для экономики конкретного региона;
- в каждом отдельно взятом регионе проблемы могут характеризоваться разными возможностями их практического решения;
- может быть изменен состав проблем за счет исключения тех, которые не актуальны для региона и/или включения дополнительных проблем, специфичных для региона (например, информационная асимметрия субрегионов, электронная преступность в регионе, эффективность нормативно-правового регулирования в сфере ИКТ, уровень жизни и др.)

Сегодня в условиях растущего влияния ИКТ на все стороны общественно-политической жизни вопрос правильного определения КПИ может быть отнесен к числу ключевых вопросов регионального ИКТ-менеджмента. Знание КПИ важно для разработки общей концепции и рабочих программ информатизации регионов. Оно важно также для оценки сметных затрат на программы информатизации и ожидаемых социально-экономических эффектов от их внедрения.

На практике решение этого вопроса повсеместно сталкивается с объективными трудностями, обу-

словленными низким качеством исходной статистики и сложным слабо изученным механизмом влияния отдельных проблем на экономику регионов, а также с субъективными трудностями, обусловленными неоднозначной (индивидуальной, групповой или корпоративной) интерпретацией этого влияния разработчиками программ информатизации (менеджеры ИКТ-проектов, руководители бизнеса, предметные эксперты, власти региона, принимающие решения).

2. Существующие методы решения вопроса

В настоящее время практически доступными методами решения вопроса остаются методы экспертных оценок. Базовой теоретической моделью этих методов является предложенная в работе [8] "общая схема экспертизы":

$$E = \langle \Omega, \Omega_e, L, Q, \varphi \rangle,$$

где Ω — исходное множество допустимых оценок проблемы по принятому критерию; Ω_e — множество допустимых оценок проблемы, сделанных различными экспертами ($\Omega_e \subseteq \Omega$); L — правила взаимодействия между экспертами; Q — обратная связь в экспертизе; φ — способ обработки оценок различных экспертов в целях определения результирующей оценки.

Широко применяемые в проектах информатизации методы решения вопроса — интервьюирование (выявление индивидуальных мнений экспертов о проблемах информатизации и их оценках); анкетирование (использование заранее определенного списка проблем для их оценки); метод круглого стола, — являются, по сути дела, различными модификациями приведенной "схемы экспертизы".

Общим у этих методов является то, что они основаны на опросниках. Разница в том, что в одних случаях их реализация осуществляется в закрытой форме (экспертам предлагаются опросники, составленные заранее), а в других случаях — в открытой форме (эксперты сами формируют опросники и дают ответы на них в процессе интервьюирования). В зависимости от формы опросников в процессе разработки проектов информатизации могут возникать различные сложности. Так, использование открытой формы опросников может приводить к нарушению единства "семантической триады" — *означающего, означаемого и денотата*, т. е. к различным наборам проблем, предлагаемых каждым из экспертов, неоднозначному толкованию проблем, к различным названиям одних и тех же проблем. Использование же закрытой формы опросников может существенно ограничить возможности экспертов для высказывания своего мнения о наборе проблем и их словесной формулировке.

Для преодоления этих противоречий обычно применяют широко разрекламированный в свое время метод мозгового штурма [9]. Между тем, еще

в первые годы появления этого метода публиковались работы, которые ставили под сомнение эффективность коллективного способа генерации идей, используемого в этом методе. Последующая практика выявила ряд серьезных недостатков, присущих технологии мозгового штурма [10]. К числу основных могут быть отнесены следующие: отсутствие личной ответственности, позволяющей экспертам "прятаться за спины коллег"; боязнь высказать вслух идею, которая может показаться другим глупой; низкий уровень критичности, так как по условию технологии любой член экспертной группы может поддержать любую идею в любой момент.

3. NMS-технология решения вопроса

3.1. Основные принципы NMS-технологии. Исследования последних лет подтверждают, что индивидуальные способы генерации идей эффективнее коллективных [10]. Это обстоятельство определило ведущий принцип методики идентификации КПИ: методика должна основываться на индивидуальном, а не на групповом способе экспертизы. Однако очевидно, что при этом неизбежно возникает вопрос, связанный с анализом и согласованием индивидуальных оценок и формированием единого коллективного мнения экспертов. Сложность вопроса состоит в том, что на практике характеристики проблем, как правило, носят многомерный и неметрический (словесный) характер. Это затрудняет задачу их идентификации традиционными методами экспертных оценок. Новые возможности для решения вопроса открывают инструменты поддержки на основе методов экспериментальной психосемантики и неметрического многомерного шкалирования NMS (*Nonmetric Multidimensional Scaling*). В последние годы эти методы находят все более широкое применение в социальных и экономических исследованиях [11–13].

Психосемантика (от греч. *semantikos* — обозначающий) — область психологии, изучающая различные формы представления объектов окружающего мира в индивидуальном сознании человека (образы, символы, вербальные формы). Основным методом экспериментальной психосемантики является построение так называемых "субъективных семантических пространств" (модельных представлений индивида об объектах мира) путем неметрического многомерного шкалирования. Это такой метод вынесения субъективных оценок, когда испытуемому (эксперту) предлагается оценить какой-то объект по набору признаков с использованием шкал, образованных с помощью словесных градаций. Шкалирование в этом контексте отличается от единичного измерения тем, что позволяет по отдельным наблюдениям воссоздать целостное представление образа объекта. Важное достоинство этого метода состоит в том, что, используя его, можно выявить наличие у экспертов разных точек

зрения на анализируемый объект и согласовать их мнения на синтаксическом, семантическом и прагматическом уровнях. При этом различия между оценками экспертов не рассматриваются как "ошибки эксперимента", а существенно важны сами по себе.

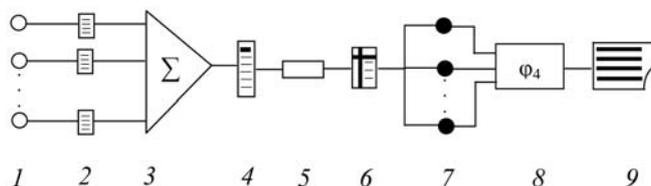
Использование методов психосемантики дает еще одно важное дополнительное преимущество. Появляется возможность применять "смешанный" подход для формирования перечня КПИ, в котором эффективно сочетаются положительные стороны метода интервьюирования (максимально расширяющего пространство дивергентного анализа проблем) и метода анкетирования (предполагающего конвергенцию проблем и описание их в единых терминах).

Разработанная нами и предлагаемая в настоящей статье методика выявления критических для региона проблем учитывает эти три ключевых момента. Ниже рассматривается блок-схема методики и дается описание метода психосемантического выбора КПИ.

3.2. Блок-схема NMS-технологии. Блок-схема на рис. 1 показывает последовательность шагов, реализующих процесс идентификации КПИ.

3.3. Метод обработки мнений экспертов. Основу метода составляют дистанционные модели психосемантики и многомерного неметрического шкалирования на основе евклидовой метрики [12, 13], отвечающие условиям рассматриваемой нами задачи. Схема согласования КПИ в этом случае выглядит следующим образом: $R = \langle I, P, Z, E, \varphi \rangle$, где I — имя проблемы; P — множество признаков (мерностей) проблемы; Z — неметрические шкалы оценки признаков; E — индивидуальные оценки проблемы по каждому из признаков, сделанные различными экспертами; φ — NMS-алгоритм обработки индивидуальных оценок и определения степени коллективной согласованности мнений о проблеме.

Порядок применения метода может быть показан на следующем примере. Пусть имеется опросная карта (NMS-карта), представляющая собой матри-



Блок-схема методики:

1 — интервьюирование экспертов (открытая форма опроса); 2 — индивидуальные списки (ИС) КПИ, полученные от различных экспертов; 3 — простое суммирование индивидуальных списков КПИ и редактирование; 4 — единый словарь (ЕС) КПИ региона; 5 — разработка NMS-карты (анкеты); 6 — NMS-карта; 7 — анкетный опрос экспертов (закрытая форма опроса); 8 — NMS-метод обработки результатов анкетного опроса, ранжирование и выбор согласованного перечня КПИ; 9 — итоговый перечень (ИП) КПИ

цу двумерного шкалирования КПИ по признакам: "значимость КПИ" и "возможность решения КПИ" с точки зрения экспертов. Каждый из признаков оценивается по лингвистической шкале: ВЫСОКАЯ, СРЕДНЯЯ, НИЗКАЯ. Пусть число экспертов равно M . Каждый из экспертов помещает КПИ из "единого словаря КПИ" в ту или иную ячейку матрицы в соответствии с его представлениями о значимости и возможности решения проблемы. Очевидно, что в некоторые ячейки матрицы могут попасть несколько проблем, а в некоторые — ни одной проблемы. Будем обозначать через число экспертов, поместивших одну и ту же проблему в ячейку (i, j) . Ясно, что $\sum m_{ij} = M$.

После заполнения каждым из экспертов матрицы проводится агрегирование полученных оценок. Для этого каждой клетке относительно каждой проблемы $(c \in C)$ приписывается вес $\lambda_{ij}^c = m_{ij}^c/M$, $\lambda_{ij}^c \in [0, 1]$, который, по сути, является двумерной функцией плотности распределения мнений экспертов. Для учета рассогласованности мнений вводится мера, называемая *коэффициентом рассогласованности* K^c , который характеризует собой степень расхождения мнений экспертов по поводу данной проблемы.

Если бы мнения экспертов относительно некоторой проблемы c совпадали бы, и все они заполнили бы, например, ячейку $(2, 3)$, то коэффициент $K^c = 0$. Координаты этого мнения были бы равны $(2, 3)$. Но вследствие того, что мнения экспертов "размыты" по матрице, для оценки степени рассогласованности надо найти среднюю абсциссу I , среднюю ординату J и коэффициент рассогласованности K . Так как функция плотности распределения

мнений уже определена, то эти величины находим по следующим формулам:

$$I^c = \sum_{ij} \lambda_{ij}^c i; J^c = \sum_{ij} \lambda_{ij}^c j;$$

$$K^c = \sum_{ij} \lambda_{ij}^c \sqrt{(i-I)^2 + (j-J)^2}.$$

3.4. Правило ранжирования проблем. На основе коэффициента K устанавливается следующее *правило ранжирования проблем* по степени их рассогласованности:

Если $K^c < 0,5$, То степень рассогласованности мнений экспертов по проблеме c является НИЗКОЙ и проблема может быть включена в ИП КПИ;

Если $K^c \in [0,5; 0,75]$, То имеет место НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ и требуется дополнительная проработка вопроса о включении проблемы c в ИП КПИ;

Если $K^c > 0,75$, То степень рассогласованности мнений по проблеме c ВЫСОКАЯ и проблему не следует включать в ИП КПИ (эксперты не воспринимают данную проблему как проблему и в последующем она скорее всего будет исключена из разрабатываемой программы информатизации).

4. Пример применения NMS-технологии

Технология была использована при разработке основных направлений информатизации в ряде ведущих регионов Республики Азербайджан. Отличительной особенностью страны является большое внимание, уделяемое ИКТ-сектору высшим руководством страны, наличие развитой ИКТ-инфраструктуры и высокие темпы внедрения ИКТ во все сферы общественно-политической жизни. ИКТ-сектор страны тесным образом взаимодействует с лидерами мирового ИКТ-рынка: компаниями

Оценка и ранжирование проблем информатизации

Проблемы информатизации (K^c)

1. Надежность ИКТ-среды (обеспечение единых обязательных стандартов сетевой безопасности) (0,3)
2. Надежные юридические и технические меры защиты интеллектуальной собственности (платежных интернет-систем, электронных удостоверений личности (*digital identities*), электронных контрактов и т. д.) (0,32)
3. Наличие открытых конкурентных рынков, особенно в сфере телекоммуникаций (0,33)
4. Навыки ИКТ-менеджмента у работников предприятий (0,58)
5. Модернизация и расширение существующей ИКТ-инфраструктуры (0,32)
6. Развитие культуры инноваций (доступ к венчурному (рисковому) капиталу, государственная поддержка инвестиционных предприятий и рисков их банкротства) (0,59)
7. Уровень внедрения ИКТ в государственном секторе (0,69)
8. Широкое использование передовых иностранных производственных и информационных технологий (0,53)
9. Создание высокопрофессиональных центров НИР и технопарков в сфере ИКТ (0,67)

Примечания:

1. При разработке исходного перечня проблем были учтены рекомендации Всемирного Банка для развивающихся стран [1], решения международной конференции "ЮНЕСКО между двумя этапами Всемирного саммита по информационному обществу" 2005 г. [14] и материалы доклада Министерства связи и информационных технологий Азербайджана.

2. В таблице приняты следующие условные обозначения X/Y : X — номер проблемы, Y — число экспертов, расположивших проблему в данной ячейке.

3. Затемненные ячейки таблицы — зона неактуальных проблем.

		Значимость проблемы			
		Оценки	Высокая	Средняя	Низкая
Возможность решения проблемы	Высокая	1/4; 5/4; 6/2; 7/2; 8/2; 9/1	4/1; 6/1; 9/2		
	Средняя	1/1; 2/4; 3/4; 4/3; 5/1; 6/1; 8/1; 9/2	3/1; 4/1; 7/2		
	Низкая	2/1; 6/1			

Microsoft, HP, ACER, APC, Eaton, TrippLite, Gemalto, Nokia-Siemens, Cisco и др. По оценкам Международного Телекоммуникационного Союза (ITU), представленным на Международном экономическом форуме в Давосе, страна относится к лидерам в сфере ИКТ среди стран СНГ. В рамках программы "Электронный Азербайджан" и "Электронное правительство" планируется компьютеризация всех государственных органов страны. Азербайджан выступил инициатором проекта "Трансевразийская суперинформационная магистраль", предусматривающего создание современной региональной высокоскоростной сети между Востоком и Западом, охватывающей более 20 стран Европы и Азии. На фоне динамично развивающейся экономики страны, улучшения уровня жизни населения и роста спроса в сфере ИКТ вопрос идентификации КПИ приобретает важное государственное значение. Вместе с тем решение вопроса не могло ограничиваться общими рекомендациями группы EIU и потребовало учета специфических условий страны, высокого стартового потенциала и активной динамики ее ИКТ-сектора.

Это обстоятельство нашло свое отражение при составлении "Единого словаря КПИ" и ранжировании проблем по степени значимости и возможности решения.

В таблице приведены результаты идентификации КПИ, полученные для демонстрационной задачи, подготовленной для публикации. В работе принимали участие пять экспертов.

Из таблицы видно, что тестирование единого словаря КПИ позволило на основе анализа коэффициентов K^c выявить наличие согласованного мнения только относительно части проблем (четырёх из девяти). Это — проблемы 1, 2, 3 и 5. Они отмечены жирными цифрами. Относительно оставшихся проблем эксперты не смогли определиться ни с их значимостью, ни с возможностью их решения. Следовательно, их включение в программу информатизации было бы неэффективным. Такого рода проблемы обычно рассматривались на последующих турах работы экспертных групп.

Заключение

1. Практика показывает, что при разработке концепций и программ информатизации регионов наиболее уязвимым, с точки зрения потери эффективности, является этап, связанный с идентификацией критических проблем информатизации. Этот этап в настоящее время не имеет достаточно надежных инструментов научной поддержки. Традиционные методы экспертных оценок (интервьюирование, анкетирование, мозговой штурм) здесь недостаточно эффективны. Предлагаемая в статье технология поддержки, основанная на методах экспериментальной психосемантики и многомерного неметрического шкалирования, реализует

сквозную процедуру объективизации субъективных знаний и намерений экспертов и позволяет перейти от неоднозначных индивидуальных оценок к согласованной общей (коллективной) оценке.

2. В реальной практике (недостаточный опыт, недостаточная квалификация, личностная, групповая и/или корпоративная противоречивость интересов, психологические трудности многомерной идентификации) предлагаемая технология может служить полезным инструментом поддержки на ранних наиболее сложных и ответственных стадиях регионального ИКТ-менеджмента.

3. По оценкам ОЭСР [15], сегодня в условиях намечившегося ИКТ-бума следует учитывать, что "высокие показатели инвестиций в ИКТ и широкое внедрение ИКТ сами по себе вовсе не гарантируют ускорение экономического роста и производительности труда ... Сохраняется опасность, что усилия по стимулированию инноваций в сфере ИКТ окажутся распыленными по множеству проектов". Предлагаемая технология может быть использована в качестве первичного превентивного инструмента поддержки, позволяющего строить региональный ИКТ-менеджмент на более надежной основе.

Список литературы

1. **Инновационный менеджмент** в России: вопросы стратегического управления и научно-технологической безопасности. Руководители авторского коллектива: акад. В. Л. Макаров, д. э. н., проф. А. Е. Варшавский. М.: Наука, 2004. 880 с.
2. **Львов Д. С.** Экономика развития. М.: Экзамен, 2002. 320 с.
3. **Майминас Е.** Информационное общество и парадигма экономической теории // Вопросы экономики. 1997. № 11. С. 90—97.
4. **Reaping the benefits of ICT: Europe's productivity challenge.** 2004. (русс. пер.: "Реализация преимуществ ИКТ и экономический рост в Европе" — информационный документ, подготовленный Economist Intelligence Unit (EIU) — аналитической службой журнала "The Economist", по заказу компании Microsoft) URL: <http://www.eiu.com>
5. **Юсупов Р. М.** Информатизация как фактор инновационного роста экономики // Экономика и управление. 2009. № 10 (48). С. 5—9.
6. **Мазур И. И., Шапиро В. Д., Ольдерогге Н. Г., Полковников А. В.** Управление проектами. М.: Омега-Л, 2009.
7. **Q & As for the PMBOK Guide, Third Edition.** Project Management Institute, USA, 2005.
8. **Макаров И. М., Виноградская Т. М., Рубчинский А. А., Соколов В. В.** Теория выбора и принятия решений. М.: Наука, 1982. 327 с.
9. **Furnham A.** The brainstorming Myth // Business Strategy Review. 2000. V. 11, N 4. P. 21—29.
10. **Ларичев О. И.** Теория принятия решений. М.: Наука. 2007. 328 с.
11. **Петренко В. Ф.** Основы психосемантики. М.: МГУ. 1997. 208 с.
12. **Толстова Ю. Н.** Основы многомерного шкалирования. М.: Изд. дом "Университет", 2006. 274 с.
13. **Терехина А. Ю.** Многомерное шкалирование в психологии // Психологический журнал. 1983. Т. 4, № 1. С. 76—88.
14. **Труды** международной конференции "ЮНЕСКО между двумя этапами Всемирного саммита по информационному обществу". 2005. URL: http://confifap.cpic.ru/conf2005/rus/info/progr_ru.htm
15. **Организация Экономического Сотрудничества и Развития (ОЭСР).** Наука, экономика и промышленность. Перспективы. 2008. URL: <http://www.oecd.org/html>

УДК 004.89

Л. Е. Брусенцов, аспирант, инженер,
Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
ЗАО "Интел А/О", г. Новосибирск,
e-mail: leonid.brusencov@intel.com

Архитектура инструмента поиска оптимальных ключей компиляции

Все большие надежды возлагаются на оптимизирующие компиляторы, в частности, это связано с расширением многоядерных архитектур процессоров. Такие компиляторы очень сложны и требуют тонкой настройки. Цель работы — создание автоматизированного инструмента поиска оптимальных настроек.

Ключевые слова: оптимизирующий компилятор, итеративный поиск, статистические данные, трансформация программ

Введение

Современные программные проекты занимают тысячи человеко-лет разработки, ни один человек не в состоянии полностью разобраться в их структуре. Первым приоритетом становится упрощение исходного кода на всех уровнях — от архитектуры до отдельных функций, что часто плохо сказывается на размере и производительности получаемого кода. Однако исследователям и на производстве необходимо создавать эффективные программные системы, удовлетворяющие современным, высоким стандартам, поэтому активно используются оптимизирующие компиляторы.

Компилятор — очень сложная система, оптимизирующая часть которой реализована для упрощения как набор независимых этапов (трансформаций кода). С помощью их комбинирования достигаются различные уровни оптимизации, удовлетворяющие некоторым критериям. Наиболее часто используемые из них — объем, энергопотребление и скорость исполнения.

Но влияние трансформации на код вкуче с другими трансформациями непредсказуемо, разный исходный код, разные аппаратные архитектуры и разные критерии требуют разных подходов, комбинации не могут быть универсальными. Чтобы смягчить проблему, применяемые оптимизации, а также их работа настраиваются с помощью внутренних опций компилятора. Пользователям предос-

тавляется небольшой набор макроопций, представляющих собой фиксированные наборы значений всех опций.

Популярной техникой стал итеративный поиск значений опций компилятора по некоторому алгоритму, на каждой итерации которого происходят перестроение и профилировка исходного приложения. Однако это увеличивает время, необходимое для получения оптимизированного кода из исходных текстов программы в сотни-тысячи раз.

Было найдено много способов ускорения поиска, однако для полного перебора требуется порядка 2^{3000} итераций, и даже применение всех подходов не позволяет сократить время в достаточной степени.

В данной работе предлагается автоматическая распределенная система итеративного поиска эффективных опций оптимизации компилятора Интел. Впервые поиск ведется по всем внутренним опциям и для каждой функции приложения независимо благодаря модификации компилятора.

Связанные работы

Итеративные оптимизации — очень популярный подход в ответ на все более усложняющиеся архитектуры процессоров. Полный поиск в пространстве значений опций может дать заметный (в 2,65 раз на задаче перемножения матриц) прирост производительности по сравнению со статическими моделями [1]. Существуют доказательства, почему именно такие подходы приносят прирост на современных архитектурах [2].

Появились публикации, в которых объясняется, как данный подход можно использовать на практике, например, для улучшения параметров оптимизации в библиотеках [3] или для лучшего определения статической модели выбора параметров оптимизаций.

Существует огромное число статей, посвященных данной области исследования, можно выделить несколько смежных направлений деятельности. Это jit-компиляция, использование нескольких скомпилированных вариантов функций и многое другое. Были разработаны целые системы работы с трансформациями (банки знаний), позволяющие осуществлять оптимизирующие и даже распараллеливающие преобразования программ в непроедурном виде [4]. Но нигде нет законченного решения, позволяющего получать наилучший код для всех

ситуаций, как нет и методик оценки, каким он должен быть.

Совершенствуются и отдельные трансформации, например, благодаря лучшей компоновке данных в памяти можно достичь увеличения производительности на 9 % и 5 % для тестов Spec95 и Spec2000 на микропроцессоре "Эльбрус" [5]. Алгоритмы GCSE () и PRE (partial redundancy elimination), обладая широкими возможностями по адаптации, позволяют сократить среднее время работы тестов Spec95 на 10 % [6]. Оптимизация алгоритма ListScheduling может увеличить производительность для отдельных тестов Spec95 на 1 % [7]. Такие величины считаются очень значительными.

С некоторыми другими подходами можно ознакомиться в работе [8].

Специфика задачи

Оптимизация конкретных приложений для конкретных вычислительных устройств предполагает проведение измерений производительности получаемых вариантов исполняемого кода на компьютерах, идентичных целевому. Однако часть работы не привязана к архитектуре вычислителя (например, его компиляция и некоторые виды профилирования).

Оптимизируемые приложения бывают различными, неизвестно заранее, сколько может понадобиться машинных ресурсов для их исполнения, тем более в случае параллельных программ (возможно автоматическое распараллеливание при компиляции некоторых вариантов).

Существует множество способов ускорения поиска, выработаны различные алгоритмы работы в пространствах значений опций, однако не решена проблема поиска теоретически достижимых величин оптимизации исследуемого кода для целевой машины, а полный перебор невозможен. Это значит, что работу приходится вести практически вслепую, нет никаких достоверных признаков того, что поиск пора заканчивать. Поэтому поиски запускаются на длительное время, во время которых возможны отказы узлов и появление новых требований к системе.

На результат измерения могут влиять системные процессы, которые непредсказуемо изменяют время исполнения исследуемого приложения.

Работа системы итеративного поиска сопряжена с накоплением большого числа разнородной информации.

Требования к системе итеративного поиска

1. Машины, на которых проводятся измерения результатов компиляции, должны быть идентичными целевой платформе.

2. Не допускается запуск посторонних задач при профилировке, требуется ограничить число работающих фоновых служб, недопустим параллельный запуск нескольких версий оптимизируемого приложения.

3. Операционные системы и наборы динамических библиотек должны быть идентичными, поскольку потенциально принимают участие в работе приложения.

4. Для надежности получаемых данных необходимо, чтобы трансляция проводилась одной и той же версией компилятора и его библиотек, опции компилятора указывали на одну и ту же целевую архитектуру (т. е. чтобы компилятор собирал приложение, предназначенное для запуска при одних и тех же условиях).

5. Система должна быть рассчитана на длительное время работы и быть устойчивой к аппаратным отказам и возможным сбоям программного обеспечения. Необходимо иметь возможность внесения изменений в программное обеспечение системы во время работы.

6. Необходимы наглядное представление текущего состояния системы и возможность управления.

7. Система должна предусматривать сохранение статистики о найденных решениях в долгосрочной перспективе.

8. Для хранения и эффективной обработки больших массивов собранной информации требуется организовать хранилище с быстрым и гибким способом доступа.

Архитектура автоматизированного инструмента

Архитектура инструмента схематично представлена на рис. 1. Пользователь отправляет исходный



Рис. 1. Архитектура автоматизированного инструмента

код своего проекта через веб-интерфейс, выбирает различные параметры поиска и наблюдает за ходом работы. Все данные формируются как новая задача (далее поток) и передаются для обработки.

Генератор значений опций внедрен в исходники компилятора и представляет собой независимое приложение (т. е. возможно его последовательное исполнение отдельно от всей системы). С помощью XML-интерфейса он обменивается данными с компилятором, поддерживает алгоритмы поиска для каждой функции оптимизируемого приложения по отдельности, анализирует получаемые данные и хранит их во временном хранилище для поддержания работы алгоритмов [9]. Последовательность его действий регулируется планировщиком, который, например, по наличию свободных ресурсов принимает решение о создании новых подзадач.

По ходу работы все данные, которые могут прямо или косвенно влиять на результаты, такие как информация о профилировании и построении приложения и его отдельных участков, характеристики использованных машин, значения опций, шумы и многое другое сохраняются в единой глобальной базе данных MySQL для дальнейшей обработки с помощью библиотеки анализа. Работу с ней планируется организовать с помощью интерактивного веб-приложения, которое позволит аналитически исследовать получаемые результаты.

В качестве обратной связи веб-интерфейс получает данные о состоянии каждого потока: о проблемных итерациях, о достигнутых значениях производительности и т. д. для динамического отображения статуса пользователю. Пользователь может приостановить и возобновить свою задачу, внести некоторые изменения в параметры поиска.

На выходе получается таблица с результатами в одном из выбранных пользователем формате, который может непосредственно читать человек, скомпилированное приложение с наилучшими найденными значениями опций компилятора, а также XML-файл, совместимый с компилятором, описывающий эти значения.

Распределенная архитектура системы итеративного поиска

Система функционирует на множестве машин, объединенных с помощью общей памяти для обмена данными (файловое хранилище с предоставлением доступа через сервисы стандартных протоколов обмена данными, например SAMBA). На каждом компьютере работает децентрализованный узел, выбирающий и исполняющий подходящие задачи для своей несущей архитектуры (рис. 2).

Разделяемая память объемом 50 Гбайт — выделенный сервер очередей сообщений, служит для общения отдельных узлов системы, а также хранит

различные версии компиляторов и библиотек, наборы опций компиляторов и свежие дистрибутивы узлов системы. Для надежности он снабжен источником бесперебойного питания и средствами инкрементального резервирования информации. Для минимизации сетевого трафика все данные сжимаются архиватором WinZip®.

Для организации мониторинга интерфейса пользователя, а также накопления статистики выделен управляющий сервер с установленными веб-сервером и базой данных MySQL. Источник бесперебойного питания обеспечивает его непрерывную работу.

Задачи пользователя разбиваются на независимые подзадачи, такие как построение приложения с заданными значениями опций и профилирование. Узел системы с программой-сервисом обменивается подзадачами и данными с помощью текстовых сообщений, помещаемых на сервер очередей сообщений. При наличии свободных ресурсов инициируется исполнение новой подзадачи. В задачах описываются необходимые ограничения для исполнения, такие как операционная система, версии библиотек, характеристики вычислительного устройства (для корректного профилирования производительности) и др.

На рабочем узле установлен модульный сервис, каждый модуль выполняется в отдельном потоке из отдельной динамической библиотеки, благодаря чему возможно быстрое обновление на лету. Модули общаются через память процесса и могут приостанавливаться при необходимости. Специальные модули поддерживают машины в работоспособном состоянии, очищают ненужные временные файлы, осуществляют перезагрузку, мониторинг и т. д.

В случае ошибок предпринимаются попытки повторного исполнения задания с ведением журнала. При определенном числе неудач подзадача считается невыполненной, при этом итерация потока пропускается.

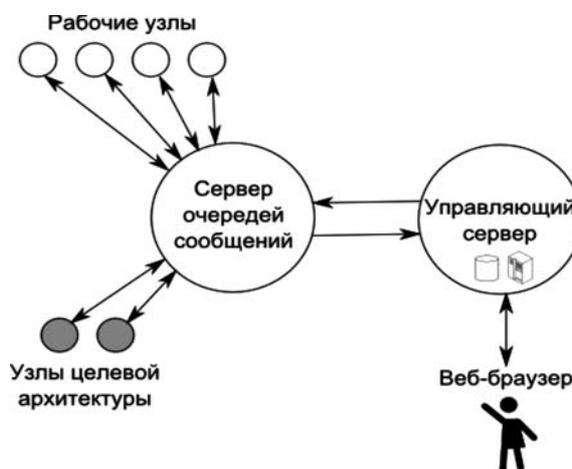


Рис. 2. Программная архитектура системы

В данном случае программа-планировщик определяет, когда делать отправку задания, а когда принимать готовый результат на основе числа выполненных и ожидающих задач, а также доступных ресурсов.

Статистические алгоритмы

В рамках проекта было создано несколько статистических алгоритмов, которые динамически накапливают данные, используемые впоследствии для выбора наиболее вероятных значений опций. В самом простом из них учитываются только вероятность встречи некоторого значения опции $P(s_i) = P(t_x = v_{xy})$, где s_i — элемент последовательности из всех опций; t_x — одна из опций компилятора; v_{xy} — значение опции t_x под индексом y . То есть тут нет никакой привязки к взаимовлиянию опций.

Более сложный алгоритм основан на модели Маркова, т. е. вероятность встречи набора параметров определяется как

$$P(s) = P(s_1) \prod_{i=2}^L P(s_i | s_{i-1}),$$

где $P(s_i | s_{i-1})$ — это вероятность использования s_i при условии использования s_{i-1} . В данном случае необходимо в качестве статистики накапливать матрицы $P = \{P(s_i)\}$ и $T = \{P(s_i | s_{i-1})\}$ и динамически их пополнять при каждом новом запуске. Вероятности вычисляются простым подсчетом числа попаданий в "удачные" последовательности.

Последний алгоритм стал доработкой алгоритма Маркова, которая учитывает свойства скомпилированного кода, взаимовлияние опций друг на друга, а также степень ускорения вычислений. Для этого были введены новые параметры X и Y — соответственно свойства входного исходного кода программы и свойства выходного кода после оптимизации.

В этом случае матрица P преобразуется во множество $P(X) = P(t_i = v_{ix} | X)$, аналогично преобразуется матрица T , а вероятности накапливаются относительно получаемых значений оптимизации d , выраженных как отношение результата к результату, получаемому с настройками по умолчанию. Таким образом, вычисляется

$$\Delta = (d + \delta Y) \Gamma(\text{notdef} - 1),$$

где notdef — это число опций с измененными значениями для учета взаимовлияния; Γ — распределение Гаусса; δY — изменение характеристик выходного кода (величина положительная), чтобы не пропустить потенциальные значения отдельных оп-

ций. Затем, если принять что в прогоне участвовала только одна опция t_j , то выполняется следующее:

$$\forall i | P(t_i) \neq 0: P'(t_i) = P(t_i) \frac{S - P(t_j)\Delta}{S};$$

$$P'(t_j) = P(t_j) + P(t_j)\Delta,$$

где

$$S = \sum_{\substack{t \neq j \\ P(t) \neq 0}} P(t),$$

при этом соблюдается, что $P(t_i) \geq 0$ (подбором Δ). Аналогичные расчеты проводятся в случае множества опций.

То есть Δ используется как усредненное смещение для накапливания относительной вероятности. Устойчивость такого решения должна обеспечиваться хорошо подобранными параметрами X и Y . При этом должны быть верны следующие равенства:

$$\sum_{\substack{i=1..n \\ i=1..n_i}} P(t_i = v_{ij} | X) = 1;$$

$$\sum_{\substack{i=1..n \\ i=1..n_i}} P(t_i = v_{ij} | t_x = v_{xy}; X) = 1.$$

Свойства кода X и Y получаются из модифицированного компилятора, анализирующего по некоторым выбранным характеристикам оптимизируемый код. На данном этапе характеристики были выбраны с помощью умозаключений экспертов в области оптимизации. В частности, в них входят длина кода в инструкциях и байтах, типы используемых инструкций, среднее расстояние между инструкциями перехода, наличие и вложенность циклов и т. д., всего около 40. По значениям характеристик образуется некоторая метрика, позволяющая оценивать степень различия анализируемых кодов.

Результаты испытаний реализации системы

Предложенная архитектура была опробована на восьми разнородных компьютерах. Из них шесть соответствовали целевой архитектуре — четырехъядерный процессор Intel® Xeon® 5160, предоставленные 8 Гбайт оперативной памяти, операционная система Microsoft Windows® Server 2003 × 64 Edition Service Pack 2.

Предложенная распределенная децентрализованная система с поддержкой возобновления опрадала себя при внезапном отключении электропитания. Управление и мониторинг через веб-интерфейс оказались значительно более удобными, чем традиционные консольные подходы.

По результатам наших экспериментов с тестами SPEC CPU2000 оказалось, что время, затрачиваемое

на обмен данными через распределенное хранилище, составило порядка 8,5 % от общего времени выполнения итерации. Поскольку построения и профилирования стали выполняться на независимых машинах, общая экономия времени оказалась на уровне 45 %.

Повысилась общая утилизация машинных ресурсов, поскольку теперь на одной и той же машине запускается сразу несколько построений параллельно (система многопроцессорная). Таким образом, средняя процессорная загруженность поднялась с 25 до 32 % (к сожалению, профилирование выполняется только в один поток во избежание взаимовлияния).

В процессе работы было выявлено значительное влияние работающих на машинах стандартных сервисов ОС на показания профилировщика. С помощью отключения всех ненужных (или неизвестных) служб удалось снизить шумы (разницу между сериями замеров) со стабильного уровня в 5 % до десятых долей процента.

В ходе простых тестовых прогонов, которые заняли около полумесяца (порядка 2000 итераций, 25 тестов, 6 машин для профилирования) были обнаружены интересные результаты. Так, например, некоторые экземпляры обрабатывали на 80 % быстрее, однако или производили неверные результаты, или завершали работу некорректно. Поскольку работал самый простой алгоритм, который на каждой итерации задавал только одной опции нестандартное значение, найденные корректные величины ускорения не превышают 5 %. Однако даже такие приросты являются важным результатом и вселяют большие надежды на результаты поиска среди комбинаций опций.

Более того, результаты указывают на некоторые скрытые проблемы в самом компиляторе, иногда он некорректно завершал свою работу, иногда получался некорректный выходной код приложения. Все эти данные могут быть использованы для дальнейшего улучшения компилятора.

В процессе работы для каждого получаемого экземпляра приложения компилятор определяет некоторый набор характеристик, который будет подвергнут статистическому анализу для нахождения корреляции с данными профилировщика и, как следствие, лучшего определения стратегии поиска в пространстве.

Заключение

В данной работе был создан автоматический распределенный децентрализованный инструмент поиска оптимальных значений опций компилятора, с помощью которого были исследованы все опции

компилятора Intel® Compiler 11.1 на предмет улучшения производительности. Было выявлено, что на тестах SPEC CPU2000 некоторые отдельно взятые опции могут существенно влиять на время исполнения (87 опций уменьшили время работы хотя бы одного теста более чем на 5 %). В основном они отвечают за оптимизацию циклов, векторизацию и выравнивание данных в памяти.

Для улучшения результатов был модифицирован компилятор, что позволило задавать индивидуальные значения опциям для каждой функции приложения независимо. Ранее наши исследования показали, что такая оптимизация на тестах SPEC CPU2000 дает заметный прирост на 8 тестах из 22 всего при 100 итерациях, наилучший результат — шестикратное ускорение теста 173.applu.

Для упрощения работы с системой был создан графический веб-интерфейс, позволяющий запускать и управлять множеством параллельных поисков и отображать в реальном времени предварительный анализ получаемых данных.

В настоящее время инструмент используется только внутри компании Интел для улучшения характеристик компилятора, однако планируется частичный перенос проекта в продукт (особенно компиляторную часть) и предоставление доступа к интерфейсу более широкому сообществу разработчиков.

Работа выполнена в компании "ЗАО Интел А/О" с участием Института автоматизации и электротехники СО РАН.

Список литературы

1. Bodin F., Kisuki T., Knijnenburg P., O'Boyle M., and Rohou E. Iterative compilation in a non-linear optimization space // Proc. ACM Workshop on Profile and Feedback Directed Compilation. organized in conjunction with PACT98. 1998.
2. Cooper K., Subramanian D., and Torczon L. Adaptive optimizing compilers for the 21st century // J. of Supercomputing. 2002. 32 (1).
3. Bilmes J., Asanovic K., Chin C., and Demmel J. Optimizing matrix multiply using PHiPAC: A portable, high-performance, ANSI C coding methodology // Proc. ICS. 1997. P. 340—347.
4. Князева М. А., Плохих С. А. Концепция системы управления специализированного банка знаний о преобразованиях программ // Информационные технологии. 2009. № 5. С. 36—40.
5. Галазин А. Б., Грабежной А. В., Нейман-заде М. И. Оптимизация размещения данных для эффективного исполнения программ для архитектур с многобанковой кэш-памятью данных // Информационные технологии. 2008. № 3. С. 35—39.
6. Филиппов А. Н. Метод нумерации значений и использование его результатов при оптимизации программ // Информационные технологии. 2009. № 4. С. 43—49.
7. Шлыков С. Л. Учет конфликтов по исполнителю устройством при планировании операций в алгоритме "ListScheduling" // Информационные технологии. 2007. № 7. С. 26—30.
8. Брусенцов Л. Автоматическая оптимизация при компиляции // Открытые системы. 2011. № 2.
9. Chirtsov A., Brusencov L., Cherny I., Grebenkin S., Ermolaev S. Maximizing Intel® Compiler Performance Using Iterative Feedback Directed Optimization // Materials of Software Engineering Conference (Russia). 2008. P. 517—533.

Е. В. Алымова, научный сотр.,
Южный федеральный университет,
г. Ростов-на-Дону,
e-mail: langnbsp@gmail.com

Критерий полноты тестовых наборов, ориентированных на проверку распараллеливающих преобразований программ*

Предлагается методика построения тестовых наборов для проверки корректности распараллеливающих и оптимизирующих преобразований программ в компиляторе. Описывается критерий полноты множества позитивных и негативных тестов для преобразований.

Ключевые слова: критерий полноты тестирования, распараллеливающие преобразования программ, оптимизирующий компилятор, автоматическая генерация тестов

Введение

Методы автоматической генерации тестов разрабатываются для различных модулей оптимизирующих компиляторов. Методики построения тестов для синтаксических анализаторов предложены в статьях [3, 11, 13]. Работа [3] посвящена способу генерации тестов на основе формального описания поведения тестируемого синтаксического анализатора. Работа [11] является продолжением предыдущего исследования. В ней рассматривается способ генерации тестов на основе абстрактной модели поведения тестируемой программы, критерии тестового покрытия формулируются в терминах построенной модели. В работе [13] описан алгоритм вывода предложений языка по контекстно-свободным грамматикам. Набор предложений считается полным, если для каждого правила данной грамматики во множестве тестов присутствует предложение языка, в выводе которого используется это правило.

Методы автоматического тестирования модулей проверки статической семантики в компиляторах описываются в работе [2]. Эти методы основаны на представлении тестируемых модулей в виде булевых функций.

В данной статье объектом тестирования выбраны оптимизирующие и распараллеливающие преобра-

зования программ. Для выбранного объекта тестирования формулируется критерий полноты тестовых наборов с учетом особенностей преобразований.

Предложенная методика реализуется в генераторе тестов [1], который на вход принимает формальные грамматики вида [10] и формальное описание условий применимости тестируемого преобразования.

Методика, описанная в данной статье, разработана для тестирования модуля оптимизаций распараллеливающей системы [6].

Преобразования как объект тестирования

Преобразование — это изменение фрагментов программы в целях улучшения ее качества (например, повышение быстродействия или уменьшение объема требуемой памяти) [7, с. 10]. Всякое оптимизирующее или распараллеливающее преобразование определяется правилами трансформации (например, в виде множества пар заменяемого и заменяющего фрагментов), а также контекстными условиями — условиями на допустимые связи преобразуемого фрагмента с остальной программой [4, с. 79]. Соблюдение контекстных условий гарантирует, что трансформация не наносит ущерб работоспособности программы.

Назовем совокупность описания контекстных условий и заменяемого фрагмента *условиями применимости преобразования*.

Выделим классы ошибок, которые возникают в процессе преобразования программы:

- нарушение синтаксической и семантической корректности результирующей программы;
- нарушение функциональной эквивалентности исходной и результирующей программ;
- ошибочное определение возможности применимости преобразования.

Требование синтаксической и семантической корректности результирующей программы предполагает, что в процессе преобразования корректно распознаются различные участки кода исходной программы, и эти участки преобразуются с учетом правил синтаксиса и семантики языка программирования, на котором исходная программа написана [5].

Нарушение функциональной эквивалентности исходной и результирующей программ приводит к тому, что при одинаковых входных данных исходная и результирующая программы будут давать разные результаты. При этом результирующая программа может быть синтаксически и семантически корректной [9, 12].

Корректное определение возможности преобразования предполагает, что изменение фрагментов кода проходит с соблюдением контекстных условий. Ошибочное применение преобразования мо-

* Работа поддержана проектом "Создание высокотехнологичного производства комплексных решений в области предметно-ориентированных облачных вычислений для нужд науки, промышленности, бизнеса и социальной сферы", шифр 2010-218-01-209.

жет привести к нарушению функциональной эквивалентности исходной и результирующей программ. К этому же классу ошибок будем относить случай, когда преобразование не выполняется на том участке кода, где это возможно [8].

В дальнейшем под преобразованием будем понимать функцию $T(p)$, где p — это программа из множества всех возможных программ на выбранном языке программирования. Значением функции является преобразованная программа, если преобразование возможно, или исходная программа в противном случае.

Тестом для преобразования является синтаксически и семантически корректная программа на выбранном языке программирования вместе с последовательностями входных и выходных данных для этой программы. Тест считается пройденным, если при одних и тех же входных данных результаты исполнения исходной и преобразованной программ совпадают. Задача тестирования — выявить ошибки описанных выше классов.

Критерий полноты тестового набора

В общем случае областью определения функции $T(p)$ является множество P всех синтаксически и семантически корректных программ на выбранном языке программирования.

Обозначим множество всех операторов $Q = \{C_1, \dots, C_n\}$, где n — число операторов выбранного языка программирования.

Множество m -к операторов — это декартова степень множества операторов Q : $|Q^m| = n^m$, $m = 1, \dots, \infty$.

Выделим из множества Q^m подмножество $Q_{0,m}$ последовательностей операторов, синтаксически и семантически корректных с точки зрения выбранного языка программирования.

Для каждой последовательности $t \in Q_{0,m}$ во множестве P найдется программа, содержащая эту последовательность. Обозначим множество таких программ $PQ_{0,m}$.

Выделим из множества $PQ_{0,m}$ подмножество $PT_k Q_{0,m}$ программ, для которых значением функции $T_k(p)$ (k — идентификатор преобразования, $p \in PQ_{0,m}$) является преобразованная программа.

Программа p принадлежит множеству $PT_k Q_{0,m}$, если p содержит фрагмент кода, удовлетворяющий условиям применимости преобразования.

Сформулируем критерий полноты тестового набора для каждого целого числа $r = 1, \dots, m$: тестовый набор ранга r для k -го преобразования полон, если этот набор содержит все программы из множества $PT_k Q_{0,r}$.

Построенный по сформулированному критерию набор тестов ранга 1 покрывает все операторы выбранного языка программирования, которые могут составлять последовательности, подходящие для преобразования. Это минимально допустимый тестовый набор, выявляющий ошибки нарушения синтаксиса и семантики результирующей программы.

Формализация условий применимости преобразования

Для того чтобы сформировать множество $PT_k Q_{0,m}$ для конкретного преобразования, необходимо иметь формальное описание условий применимости этого преобразования. Условия определяют состав операторов и виды информационных зависимостей фрагмента кода, подходящего для преобразования. Для хранения формального описания условий применимости используется конфигурационный файл в формате XML, который строится по следующему шаблону:

```
<program class=" %название преобразования %">
  <params {список параметров программы} />
  <body>
    <stat %имяОператора% {список параметров} /> |
    <block id = %ID% {dependency} m = %целое
      число% {список параметров}>
      <stat %Оператор% {список параметров} />
    </block>|
    <stat %имяОператора% m = %целое число%
      {список параметров}>
      <stat %имяОператора% {список параметров}
        /> |
      <block id = %ID% {dependency}{список
        параметров}>
        <stat %имяОператора% {список
          параметров} />
        </block>
      </stat %имяОператора% >
    </body>
  </program>
```

Конфигурация задает состав операторов тела программы и позволяет управлять информационными зависимостями блоков операторов посредством расстановки специальных меток.

Конструкция "`<stat %имяОператора% />`" задает конкретный оператор языка программирования. Если оператор представляет собой управляющую структуру (например, условный оператор), то будем говорить, что этот оператор имеет тело. В списке параметров конструкции "`<stat %имяОператора% />`" перечисляются имена операторов, которые могут составлять тело этого оператора. Список параметров имеет вид: "`stat %имяОператора % = %значение%`". Значение задается целым числом. Если оно равно единице, то в теле оператора появляется один оператор, иначе генерируется последовательность, в которой этот оператор повторяется столько раз, сколько задано параметром. При этом заголовок оператора копируется, а вся последовательность при генерации логически считается одним оператором. Для операторов присваивания и безусловного перехода список параметров пуст.

Конструкция "`</block >`" определяет блок операторов, который можно вынести в подпрограмму

с сохранением синтаксической и семантической корректности. Данная конструкция позволяет гарантировать генерацию фрагментов программы, имеющих один вход и один выход. Блок операторов удовлетворяет следующим условиям:

- ни один оператор из блока не находится в зоне действия условного оператора, который не содержится в этом блоке;
- ни один оператор из блока не находится в теле цикла, заголовок которого не принадлежит этому блоку;
- все операторы безусловного перехода ссылаются на метки только тех операторов, которые принадлежат блоку;
- ни один оператор из блока не имеет метку, на которую ссылаются операторы, не принадлежащие этому блоку.

Список параметров для блока аналогичен списку параметров для оператора, имеющего тело.

Атрибут "dependency" применим только к блокам. Значением этого атрибута является список идентификаторов блоков, связанных с текущим блоком информационными зависимостями (при этом связь направлена от текущего блока к блокам, объявленным в списке).

Конструкция "m = %целое число%" для блоков и операторов, имеющих тело, задает число операторов этого блока или тела. Список параметров и значение *m* определяет тело оператора или блока как последовательность длины *m* операторов из списка параметров.

Конфигурация для множества позитивных тестов

Рассмотрим конфигурационный файл, описывающий множество позитивных тестов для преобразования "Разбиение цикла" [7, с. 46—50, 9, 12]. Преобразование "Разбиение цикла" заменяет цикл

```
DO 333 I = 1, N
  S1
  .....
  Sk
  S(k + 1)
  .....
  Sm
333 CONTINUE
```

на фрагмент программы, состоящий из последовательности двух циклов:

```
DO 111 I = 1, N
  S1
  .....
  Sk
111 CONTINUE
DO 222 I = 1, N
  S(k + 1)
  .....
  Sm
222 CONTINUE
```

Для корректного применения данного преобразования должны быть выполнены следующие условия:

- каждый из фрагментов программы S_1, \dots, S_k и $S_{(k+1)}, \dots, S_m$ имеют один вход и один выход;
- не существует такой дуги графа информационных связей (v_1, v_2) , что $v_1 \in S_i, k + 1 \leq i \leq m; v_2 \in S_j, 1 \leq j \leq k$.

Конфигурационный файл имеет вид:

```
<?xml version = "1.0" encoding = "UTF-8"?>
<program class = "loop_distribution">
  <params ... />
  <body>
    <statFor>
      <block id = "1" dependency = "2" m = "3"
statAssign="1" statIf="1">
        <statIf statAssign = "1" />
      </block>
      <block id = "2" m = "4" statAssign = "1"
statIf = "1">
        <statIf statAssign = "1" statGoTo = "1"
/>
      </block>
    </statFor>
  </body>
</program>
```

Данная конфигурация определяет программы, состоящие из одного оператора цикла. Тело цикла разбито на два блока, между которыми нет зависимостей, направленных снизу вверх (атрибут dependency для второго блока отсутствует). Телом первого блока является последовательность из множества троек, которые можно составить из операторов присваивания и условного оператора. Телом второго блока является последовательность, принадлежащая множеству четверок, которые можно составить из оператора присваивания и условного оператора. Число программ в полном тестовом наборе для данной конфигурации равно $2^4 \times 2^3 = 128$.

Конфигурация для множества негативных тестов

Негативным тестом для преобразования является тестовая программа, содержащая фрагмент кода, который частично удовлетворяет условиям применимости преобразования. Тест считается пройденным, если преобразование этого фрагмента кода не было выполнено.

Конфигурационный файл, в котором нарушено второе условие применимости преобразования "Разбиение цикла", имеет вид:

```
<?xml version = "1.0" encoding = "UTF-8"?>
<program class = "loop_distribution">
  <params ... />
  <body>
    <statFor>
      <block id = "1" dependency = "2" m = "3"
statAssign = "1" statIf = "1">
        <statIf statAssign = "1" />
      </block>
```

```

    <block id = "2" dependency = "1" m = "4"
statAssign = "1" statIf = "1">
    <statIf statAssign = "1" statGoTo = "1"
/>
    </block>
</statFor>
</body>
</program>

```

Данная конфигурация описывает тестовые программы, по структуре аналогичные тестовым программам из позитивного множества. Тело цикла разбито на два блока, между которыми присутствуют зависимости, направленные снизу вверх (определен атрибут `dependency` для второго блока). Число программ в полном тестовом наборе для данной конфигурации также равно $2^4 \times 2^3 = 128$.

Список литературы

1. Алымова Е. В. Автоматическая генерация тестов на основе конфигурационных файлов для оптимизирующих преобразований компилятора // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естеств. науки. 2010. № 3. С. 5—8.
2. Архипова М. В. Генерация тестов для семантических анализаторов // Вычислительные методы и программирование. 2006. Т. 7, раздел 2. С. 55—70.
3. Демаков А. В., Зеленова С. А., Зеленов С. В. Тестирование парсеров текстов на формальных языках // Программные

системы и инструменты (тематический сборник факультета ВМиК МГУ). 2001. № 2. С. 150—156.

4. Касьянов В. Н. Оптимизирующие преобразования программ. М.: Наука, 1988.
5. Нис З. Я. Автоматизация проверок семантической корректности распараллеливающих преобразований // Труды III международной конференции "Параллельные вычисления и задачи управления" (РАСО'2006). 2006.
6. Открытая распараллеливающая система. URL: //http://ops.rsu.ru/ ДВОР
7. Штейнберг Б. Я. Математические методы распараллеливания рекуррентных циклов для суперкомпьютеров с параллельной памятью. Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 2004.
8. Штейнберг Б. Я., Алымова Е. В., Баглий А. П., Гуда С. А., Кравченко Е. Н., Морылев Р. И., Нис З. Я., Петренко В. В., Скиба И. С., Шаповалов В. Н., Штейнберг О. Б. Особенности реализации распараллеливающих преобразований программ в ДВОР // Труды V международной конференции "Параллельные вычисления и задачи управления" (РАСО'2010). 2010.
9. Allen R., Kennedy K. Optimizing Compilers for Modern Architectures. Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
10. ANSI C Yacc grammar. URL: http://www.lysator.liu.se/c/ANSI-C-grammar-y.html
11. Kossatchev A. S., Petrenko A. K., Zelenov S. V., Zelenova S. A. Application of Model-Based Approach for Automated Testing of Optimizing Compilers // Proceedings of the International Workshop on Program Understanding (Novosibirsk — Altai Mountains, Russia), July 14—16. 2003. P. 81—88.
12. Muchnick S. Advanced Compiler Design and Implementation. Morgan Kaufmann Publishers, 1997.
13. Purdom P. A Sentence Generator For Testing Parsers // BIT. 1972. № 2. P. 336—375.

УДК 004

А. И. Таганов, канд. техн. наук, доц.,
Рязанский государственный
радиотехнический университет,
e-mail: alxtag@yandex.ru

Методы идентификации, анализа и сокращения проектных рисков качества программных изделий в условиях нечеткости

Рассматриваются методы формализации процессов идентификации, анализа и сокращения проектных рисков качества программных изделий в условиях нечеткости проектных данных.

Ключевые слова: проектный риск, идентификация, анализ, мониторинг, нечеткие методы и алгоритмы

Введение

Важным направлением повышения результативности и эффективности функционирования процессно-ориентированных CASE-технологий является расширение их функциональных возможно-

стей посредством включения в их состав новых процессов, ориентированных на решение актуальной проблемы повышения качества проектируемых программных изделий (ПИ) на основе стратегии сокращения проектных рисков качества по стадиям жизненного цикла программного проекта (ПП). Проектные риски сложных программных изделий являются объективным явлением, связанным со многими видами неопределенности, имеющими место на различных этапах выполнения ПП и оказывающими влияние на принятие проектных и управленческих решений, в том числе решений по характеристикам качества ПИ [1—3].

Под проектными рисками качества ПИ здесь понимается все множество идентифицированных рисков ситуаций проекта, которые могут проявиться и оказать негативное воздействие на характеристики качества ПИ. При этом с учетом ISO 9126 проектные риски качества здесь классифицируются на проектные риски внутреннего качества, на проектные риски внешнего качества и на проектные риски качества программных изделий в использовании [4, 5].

Успешное решение проблемы сокращения проектных рисков качества по всем стадиям жизненного цикла ПП является достаточно сложной зада-

чей [2, 3] и в настоящее время ее решение невозможно без применения новых информационных технологий, составной частью которых являются интеллектуальные методы и средства обработки проектной информации. К последним методам следует отнести методы теории нечетких множеств, позволяющие на модельном уровне рассмотреть проблемы идентификации проектных рисков, проблемы анализа проектных рисков и проблемы мониторинга проектных рисков и тем самым расширить круг успешно решаемых задач по формализации и автоматизации процессов сокращения проектных рисков качества ПИ в условиях неопределенности.

1. Анализ методов сокращения проектных рисков качества

Задачи поддержки принятия решений по проектным рискам качества в условиях неопределенности представляют собой слабоструктурированные задачи, которые имеют место на этапах идентификации, анализа и мониторинга процесса сокращения проектных рисков качества ПИ. Для решения такого типа задач используют методы теории нечетких множеств [7, 8]. Применение теории нечетких множеств и ее приложений к решению проблемы сокращения проектных рисков позволяет построить формальные схемы решения слабоструктурированных задач по проектным рискам, которые могут характеризоваться той или иной степенью неопределенности, обусловленной неполнотой, внутренней противоречивостью, неоднозначностью и размытостью исходных данных, представляющих собой приближенные количественные или качественные оценки параметров программного проекта.

1.1. Методы идентификации проектных рисков

Идентификация проектных рисков качества ПИ представляет собой специальный процесс, ориентированный на выявление потенциальных рисков качества и документирование их характеристик. Область определения такой задачи может быть представлена кортежем:

$$\langle Q, H, R, A, G, L \rangle, \quad (1)$$

где Q — заданное множество исходных данных (описания внешней среды проекта, внутренней среды проекта, отклонений в процессе реализации проекта, альтернатив реализации проекта и др.); H — заданная модель характеристик качества ПИ; $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ — искомое множество проектных рисков качества; A — множество альтернатив реагирования на идентифицированное множество R ; G — граф связности элементов множества R ;

L — набор методов и средств, ориентированных на определение множеств R, A и построение графа G .

Успешность решения задачи с областью определения (1) во многом зависит от используемого набора методов, входящих в состав множества L . В инженерной практике такой набор методов обычно включает в себя: метод мозгового штурма, метод Дельфи, метод построения дерева решений, анализ SWOT, анализ контрольных списков, метод графического отображения моделей рисков с помощью диаграмм и др. [2, 3]. В дополнение к указанным методам в работе [6] предложен способ отображения рискованной информации по проекту на компьютерном экране в виде графических контурных моделей рискованных полей проекта в заданной системе координат. Такая форма представления проектной рискованной информации является весьма удобной при коллективном анализе рисков проекта и принятии менеджерами согласованных решений по вопросам управления рисками.

1.2. Методы анализа проектных рисков качества

По определению, представленному в работах [3, 5], этап анализа проектных рисков качества ПИ заключается в ранжировании по важности всех идентифицированных рисков с последующим выделением по заданным критериям некоторой совокупности рисков, которые передаются на следующие этапы планирования и мониторинга рисков. Предлагаемый здесь подход к решению указанной задачи в условиях нечеткости проектных данных включает в себя решение двух прикладных задач [7]:

- определение вектора степеней влияния идентифицированных проектных рисков на обобщенный (интегральный) критерий качества проекта;
- оптимизация состава проектных рисков качества, передаваемых на следующие этапы, связанные с планированием и мониторингом проектных рисков.

Область определения первой задачи может быть представлена следующим кортежем [5]:

$$\langle R(t), H(t), f_s, P_s, G(t), W(R(t)), D \rangle, \quad (2)$$

где $R(t)$ — множество идентифицированных рисков проекта на момент времени t ; $H(t)$ — модель характеристик качества ПИ на текущем этапе проекта; f_s — отображение $R(t)$ в $H(t)$, определяющее оценки влияния последствий $R(t)$ на характеристики качества проекта; P_s — структура предпочтений специалистов (экспертов) по рискам; $G(t)$ — граф связности проектных рисков качества ПИ; $W(R(t))$ — искомый вектор степеней влияния последствий $R(t)$ на обобщенный критерий качества программного проекта; $D = \{D1 \div D5\}$ — набор предлагаемых алгоритмов для определения вектора

$W(R(t))$ с учетом представленных на определенном этапе проекта исходных данных.

Для решения задачи в постановке с областью определения (2) предлагаются следующие подходы и способы построения алгоритмов $D = \{D1 \div D5\}$ [5, 7]:

- алгоритм $D1$, позволяющий определять (по стадиям жизненного цикла проекта) вектор $W(R(t))$ на основе следующих исходных данных: модель $H(t)$ задана множеством независимых характеристик качества ПИ; $R(t)$ содержит множество независимых рисков; f_s и P_s представлены экспертным способом на основе количественных оценок;
- алгоритм $D2$, отличающийся от $D1$ тем, что экспертные оценки специалистов по проектным рискам заданы вербальным способом;
- алгоритм $D3$, отличающийся от $D1$ и $D2$ тем, что модель $H(t)$ представлена деревом характеристик качества проекта ПИ [4];
- алгоритм $D4$, позволяющий на основе данных, полученных при использовании одного из $D1, D2, D3$, учитывать наличие однозначной связности рисков $R(t)$ по стадиям жизненного цикла проекта;
- алгоритм $D5$, отличающийся от $D4$ тем, что дополнительно позволяет учитывать субъективную связность проектных рисков $R(t)$.

В основу обоснованного построения предложенных алгоритмов $D = \{D1 \div D5\}$ положены прикладные методы теории нечетких множеств, модифицированный метод анализа иерархий и многокритериальные модели принятия решений в условиях неопределенности [5–8].

Вторая задача, связанная с определением совокупности контролируемых проектных рисков качества $R(t)^* \subset R(t)$ по критерию их наибольшего суммарного влияния на обобщенный показатель качества ПИ, имеет следующую область определения [5]:

$$\langle R(t), W(R(t)), Pr(t), U \rangle, \quad (3)$$

где $R(t)$ и $W(R(t))$ — соответственно заданное множество проектных рисков и заданный вектор степеней влияния этих рисков на обобщенный критерий качества проекта ПИ; $Pr(t)$ — структура предпочтений экспертов по ресурсам проекта, которая ставит в соответствие каждому риску из $R(t)$ требуемые ресурсы на управление этим риском; $U = \{U1, U2\}$ — набор алгоритмов, необходимый для решения задачи по определению $R(t)^*$ с учетом заданных условий и ограничений.

В работах [5, 7] предложены два подхода к решению второй задачи, т. е. к определению $R(t)^* \subset R(t)$:

- первый подход, связанный с построением алгоритма $U1$, ориентированного на решение задачи с областью определения (3) в том случае, когда в исходных данных присутствуют усло-

вия нечеткости проектных данных и отсутствуют жесткие ресурсные ограничения на управление проектными рисками качества ПИ;

- второй подход отражает построение алгоритма $U2$, отличающегося от $U1$ возможностью решения указанной задачи при наличии в исходных данных заданных предпочтений экспертов по ресурсам, выделенных в проекте для управления рисками.

В работе [7] предложены способы построения алгоритмов $U1$ и $U2$, основанные на использовании положений теории нечетких множеств и методов многокритериального выбора альтернатив в условиях неопределенности [7, 8]. Определенный такими способами оптимизированный состав $R(t)^*$ передается далее на этап мониторинга и сокращения проектных рисков качества ПИ [2, 3].

2. Способы формализация этапа мониторинга проектных рисков

2.1. Постановка задачи

Функциональное назначение этапа мониторинга и сокращения проектных рисков качества ПИ заключается в решении двух задач. Первая задача связана с определением по ходу программного проекта рискованных ситуаций, подобных тем, которые зафиксированы в $R(t)^*$. Решение второй задачи заключается в определении для каждого выявленного проектного риска адекватной альтернативы реагирования (смягчения риска) [2, 3].

Область определения задачи идентификации рисков на этапе мониторинга может быть представлена кортежем [5]

$$\langle S, w(t), f, h, Ps(t), Z \rangle, \quad (4)$$

где $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ — набор эталонных рискованных ситуаций проекта, соответствующих $R(t)^*$, которые хранятся в библиотеке контролируемых рисков; $w(t)$ — текущая рискованная ситуация проекта; f — отображение $w(t)$ в S , характеризующее степень их соответствия; h — порог достоверности нечеткого соответствия эталонной и текущей ситуации проекта; $Ps(t)$ — структура предпочтений экспертов по рискам; Z — набор алгоритмов, позволяющих определять соответствие текущей ситуации проекта $w(t)$ (с некоторым порогом достоверности нечеткого соответствия h) ситуациям из набора эталонных ситуаций S .

Алгоритмы решения первой задачи с областью определения (4) представлены в [9] и основываются на использовании и развитии расплывчатых ситуационных моделей принятия решений в условиях нечеткости [10].

Область определения и решения второй задачи, связанной с определением оптимальной альтерна-

тивы реагирования на идентифицированное рисковое событие, может быть представлена кортежем

$$\langle A(R_i), R_i, G, P_a, V \rangle, \quad (5)$$

где $A(R_i) = \{A_1(R_i), \dots, A_p(R_i)\}$ — множество альтернатив реагирования на идентифицированное рисковое событие R_i ; G — отображение $A(R_i)$ на R_i ; P_a — структура предпочтений экспертов по рискам; $V = \{V1, V2, V3\}$ — набор требуемых алгоритмов для решения задачи определения наиболее предпочтительной (рациональной) альтернативы реагирования A^* на идентифицированное рисковое событие R_i согласно P_a .

2.2. Решение задачи

Для решения задачи с областью определения (5) в статье рассматриваются способы построения алгоритмов $V = \{V1, V2, V3\}$, основывающиеся на использовании положений теории нечетких множеств и решении задачи в условиях нечеткости исходных данных. Эти способы отличаются также тем, что критерии важности альтернатив реагирования на проектные риски рассматриваются здесь в терминах предпочтительности альтернатив на заданном множестве альтернатив $A(R_i) = A$. В этом случае для любой пары альтернатив реагирования $A_i, A_j \in A$ под значениями $\mu_{J_W}(A_i, A_j)$ понимается степень предпочтения " A_i не хуже A_j " в записи $A_i \geq A_j$. Тогда решение задачи (5) заключается в выборе наиболее предпочтительной альтернативы из множества A , на котором задано нечеткое отношение предпочтения J_W .

Первый способ (алгоритм $V1$) решения поставленной задачи с областью определения (5) основывается на использовании опыта одного эксперта по рискам. Считается, что эксперт по рискам в терминах предпочтительности определяет матрицу предпочтительности альтернатив реагирования на идентифицированное рисковое событие R_i . В соответствии с предлагаемым способом далее для нечеткого отношения предпочтения J_W строится нечеткое отношение строгого предпочтения J_W^S , определяемое функцией принадлежности

$$\mu_{J_W^S} = \begin{cases} \mu_{J_W}(A_i, A_j) - \mu_{J_W}(A_j, A_i), \\ \text{если } \mu_{J_W}(A_i, A_j) > \mu_{J_W}(A_j, A_i); \\ 0, \text{ если } \mu_{J_W}(A_i, A_j) \leq \mu_{J_W}(A_j, A_i). \end{cases} \quad (6)$$

После этого вычисляется нечеткое подмножество недоминируемых альтернатив реагирования $A_R^{nd} \subset A$, ассоциированное с J_W и включающее те

альтернативы, которые не доминируют ни над какими другими альтернативами реагирования, определяемыми функцией принадлежности:

$$\mu_{J_W^{nd}}(A_i) = 1 - \max_{A_j \in A} \mu_{J_W^S}(A_j, A_i). \quad (7)$$

Для любой альтернативы реагирования $A_j \in A$ значение $\mu_{J_W^{nd}}(A_j)$ понимается как степень недоминируемости этой альтернативы, т. е. степень, с которой A_j не доминирует ни над одной из альтернатив реагирования множества A ; $\mu_{J_W^{nd}}(A_j) = \alpha$ означает, что никакая альтернатива A_j не может быть лучше A_i со степенью доминирования α ; иначе говоря, может доминировать над другими альтернативами, но со степенью не выше $1 - \alpha$. Рациональным будем считать выбор альтернатив, имеющих по возможности большую степень принадлежности множеству $A_{J_W^{nd}}$. И, следовательно, за оптимальную примем альтернативу A^* , для которой значение $\mu_{J_W^{nd}}(A^*)$ максимально:

$$A^* = \arg \max_{A_j \in A} \mu_{J_W^{nd}}(A_j).$$

Если наибольшую степень недоминируемости имеет не одна, а несколько альтернатив, то менеджер по рискам может выбрать одну из них исходя из каких-либо иных соображений либо расширить круг экспертов для формирования исходных данных задачи и решить поставленную задачу на основе второго и третьего способов, которые рассмотрены далее по тексту.

Второй способ (алгоритм $V2$) учитывает возможности привлечения группы менеджеров по рискам для задания предпочтительности альтернатив реагирования на идентифицированное рисковое событие и позволяет получить более объективное решение задачи с областью определения (5). В этом варианте на множестве всевозможных альтернатив реагирования $A = \{A_1, A_2, \dots, A_{N_A}\}$ каждый эксперт по рискам задает свое видение важности альтернатив реагирования в терминах предпочтительности J_{W_k} . Главный менеджер (руководитель проекта) по-разному может относиться к мнению каждого эксперта по рискам, что может находить отражение в весовых коэффициентах λ_k (где $0 \leq \lambda_k \leq 1$, $\sum \lambda_k = 1$), соответствующих каждому из специалистов.

В этих условиях для определения оптимальной альтернативы реагирования на идентифицированное рисковое событие, в соответствии с предлагае-

мым вторым способом (алгоритмом $V2$), необходимо для каждого отношения предпочтения J_{W_k} построить нечеткое отношение строгого предпочтения $J_{W_k}^S$, функция принадлежности которого определяется по формулам (6). Далее построить свертку P отношений предпочтения как пересечение нечетких отношений строгого предпочтения экспертов, по формуле

$$P = \cap J_{W_k}^S(A_i, A_j) = \min\{\mu(A_i, A_j)\}. \quad (8)$$

Таким образом, получается новое нечеткое отношение нестрогого предпочтения. Далее на основе P можно построить отношение строгого предпочтения $P^S = P/P^T$ с функцией принадлежности μ_P^S

$$\mu(J_{W^S}^S, A_i, A_j) = \begin{cases} \mu(J_{W^S}, A_i, A_j) - \mu(J_{W^S}, A_j, A_i), \\ \text{если } \mu(J_{W^S}, A_i, A_j) > \mu(J_{W^S}, A_j, A_i); \\ 0, \text{ если } \mu(J_{W^S}, A_i, A_j) \leq \mu(J_{W^S}, A_j, A_i). \end{cases}$$

Следующим шагом следует определить множество недоминируемых альтернатив $U(P^S, nd)$ с функцией принадлежности

$$\mu^S(nd, A_i) = 1 - \max_j\{\mu_P^S(nd, A_j)\}. \quad (9)$$

На следующем шаге необходимо построить выпуклую свертку Q отношений J_{W_k} , которая определяется как $Q = \Sigma \lambda_k J_{W_k}$ с функцией принадлежности

$$\mu_Q(A_i, A_j) = \Sigma \lambda_k \mu(A_i, A_j). \quad (10)$$

Для нечеткого отношения предпочтения Q аналогично P^S строится отношение строгого предпочтения Q^S и множество недоминируемых альтернатив $U(Q^S, nd)$. Из формул (8)–(10) можно сделать вывод, что множества $U(R^S, nd)$ и $U(Q^S, nd)$ несут дополняющую друг друга информацию о недоминируемости альтернатив реагирования.

Далее рассматривается пересечение полученных множеств $U(R^S, nd)$ и $U(Q^S, nd)$ с функцией принадлежности

$$\mu^{nd}(A_i) = \min(\mu_P^{nd}(A_i), \mu_Q^{nd}(A_i)).$$

Рациональным считается выбор той альтернативы A^* из A , для которой значение $\mu^{nd}(A^*)$ максимально:

$$A^* = \arg \max \mu^{nd}(A_i), A_i \in A.$$

Третий способ (алгоритм $V3$) решения задачи с областью определения (5) характеризуется тем,

что значимость мнений экспертов по рискам оценивается с помощью нечеткого отношения предпочтения J_N , заданного на множестве экспертов E с функциями принадлежности $\mu_{J_N}(e_k, e_l)$, $e_k, e_l \in E$, значения которых обозначают степень предпочтения мнения эксперта e_k по сравнению с мнением эксперта e_l . В данном случае для решения поставленной задачи необходимо аналогично второму способу для каждого J_{W_k} построить $J_{W_k}^S$ и A_k^{nd} .

Далее для ясности введем обозначение $\mu_k^{nd}(A_i) = \mu_\Phi(A_i, e_k)$ и тем самым зададим нечеткое соответствие Φ между множествами A и E .

На следующем шаге построим свертку Γ в виде композиции соответствий $\Gamma = \Phi^T J_N \Phi$, причем результирующее отношение Γ определяется как произведение Φ^T, J_N, Φ . То есть получается единое результирующее отношение, определенное с учетом информации об относительной важности нечетких отношений предпочтения J_{W_k} . С отношением Γ ассоциируются отношение Γ^S и множество A_r^{nd} .

Корректируется множество A_r^{nd} до множества A_r^{*nd} с функцией принадлежности

$$\mu_\Gamma^{*nd}(A_i) = \min(\mu_\Gamma^{nd}(A_i), \mu_\Gamma(A_i, A_j)).$$

Выбирается та альтернатива, для которой значение функции принадлежности скорректированного нечеткого множества A_r^{*nd} недоминируемых альтернатив максимально. Достоинством рассмотренных способов (алгоритмов $V = \{V1, V2, V3\}$) решения задачи с областью определения (5) в условиях нечеткости проектных данных является простота их программной реализации.

Заключение

Рассмотренные в работе модели, методы и алгоритмы идентификации, анализа и мониторинга проектных рисков качества программных изделий позволяют обеспечить решение актуальной задачи сокращения проектных рисков качества на формализованном уровне в условиях нечеткости. При этом простая программная реализация указанного инструментария и его использование в составе интегрированных CASE-технологий способствует повышению результативности программной индустрии и повышению качества проектируемых программных изделий.

Список литературы

1. Фатрелл Р. Т., Шафер Д. Ф., Шафер Л. И. Управление программными проектами: достижение оптимального качества при минимальных затратах: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. 1136 с.
2. ANSI/PMI 99-001-2004. Руководство к Своду знаний по управлению проектами. Четвертое издание (Руководство РМВОК). 2004.
3. Липаев В. В. Анализ и сокращение рисков проектов сложных программных средств. М.: СИНТЕГ, 2005. — 224 с.
4. ГОСТ Р ИСО МЭК 9126-1-4. Информационная технология — характеристики и метрики качества программного обеспечения: Ч. 1. Характеристики и субхарактеристики качества.
5. Таганов А. И. Методика анализа и сокращения рисков проектов сложных программных систем по характеристикам качества // Вестник РГРТУ. Рязань, 2010. Вып. 30. С. 77—82.
6. Таганов А. И. Способы построения графических моделей рисков проекта на основе структурно-символьного метода

представления // Системы управления и информационные технологии. Воронеж: Научная книга, 2010. № 2 (40). С. 43—47.

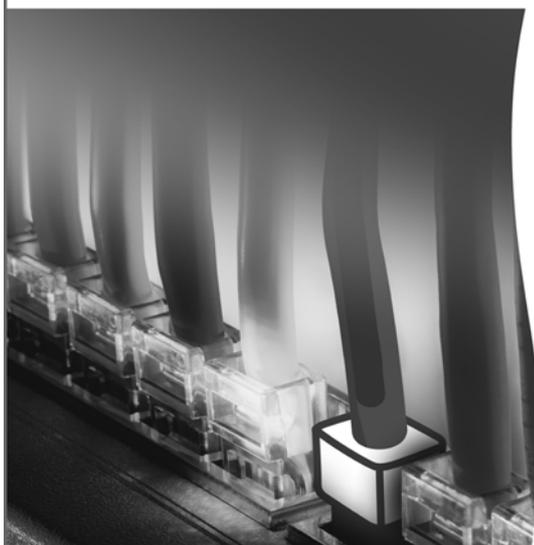
7. Таганов А. И. Применение нечетких множеств для формализации процессов анализа и идентификации важности рисков программного проекта // Системы управления и информационные технологии. Воронеж: Научная книга, 2007. № 4 (30). С. 46—51.

8. Борисов А. Н., Алексеев А. В., Меркурьева Г. В. и др. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. М.: Радио и связь, 1989. 304 с.

9. Таганов А. И., Таганов Р. А. Применение нечетких ситуационных моделей для идентификации рисков программного проекта // Системы управления и информационные технологии. Воронеж: Научная книга, 2007. № 4. 2 (30). С. 297—303.

10. Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Коровин С. Я. Расплывчатые ситуационные модели принятия решений. Таганрог: ТРТИ, 1986. 92 с.

ПРАВИТЕЛЬСТВО УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
МИНИСТЕРСТВО ИНФОРМАТИЗАЦИИ И СВЯЗИ
УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
АДМИНИСТРАЦИЯ ГОРОДА ИЖЕВСКА
УДМУРТСКАЯ ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПАЛАТА
КЛУБ ИТ-ДИРЕКТОРОВ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР «УДМУРТИЯ»



ПРИГЛАШАЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ К УЧАСТИЮ В ВЫСТАВКЕ!



ИНФОТЕХ/2011

ВЫСТАВКА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

29 сентября - 2 октября

ТЕМАТИКИ ВЫСТАВКИ

IT для государства

• Электронное правительство • Системы информационной безопасности • Межведомственный документооборот • Технологии обработки данных

IT для бизнеса

• BPM, ERP, CRM системы • Электронный документооборот • Центры обработки данных • WEB 2.0 • Системы информационной безопасности • Системы автоматизации финансового сектора • Логистические решения

IT для жизни

• 3D, планшетные компьютеры • Умный дом • Мультимедиа • Hi-End и Hi-Fi аппаратура • Цифровое фото • Социальные сети • Игры • Мобильные устройства • Интернет и сеть для дома • Персональная безопасность

Системы, средства и услуги связи

Место проведения:

г. Ижевск, ул. Кооперативная, 9 (ФОЦ «Здоровье»)

Тел./факс: (3412) 733-585, 733-587, 733-591(доб. 1194,1187)

e-mail: it@vcudmurtia.ru; www.it.vcudm.ru

Генеральный
радиопартнер:



Информационные партнеры:



Интернет-спонсоры:



УДК 519.63

И. Е. Квасов, аспирант,
И. Б. Петров, д-р физ.-мат. наук, зав. каф.,
А. В. Санников, студент,
А. В. Фаворская, студентка
 Московский физико-технический институт
 (государственный университет)
 e-mail: petrov@mipt.ru

Компьютерное моделирование пространственных динамических процессов сеточно-характеристическим методом на неструктурированных тетраэдральных сетках

Разработан сеточно-характеристический метод на неструктурированных тетраэдральных сетках с использованием интерполяции высоких порядков для моделирования сложных пространственных динамических процессов в гетерогенных средах. Данный метод имеет большую общность и пригоден для подробного исследования волновой картины.

Ключевые слова: сеточно-характеристический метод, тетраэдральные сетки, интерполяция высоких порядков, сейсмология, сейсморазведка

Введение

В работе предложены усовершенствованные методы пространственного численного моделирования распространения волн в сложных гетерогенных средах. Эти методы применимы и для геологической среды с большим числом полостей и трещин, расположенных без строгих закономерностей и имеющих различную форму. При такой постановке трехмерных задач оптимальным является использование неструктурированных тетраэдральных сеток.

Так как система уравнений математической модели состояния сплошной линейно-упругой среды [1] является гиперболической и требуется аккуратный расчет волновых процессов, целесообразно применение именно сеточно-характеристического метода [2] с использованием интерполяции [3] высоких порядков. Примеры использования сеточно-характеристического метода с квадратичной ин-

терполяцией с ограничителем на неструктурированных треугольных сетках для решения задач сейсморазведки можно найти в работах [4–6].

Постановка задачи

Согласно [1, 6] состояние бесконечно малого объема сплошной линейно-упругой среды подчиняется следующим уравнениям:

$$\rho \partial_t \mathbf{v} = (\nabla \cdot \mathbf{T})^T, \quad (1)$$

$$\partial_t \mathbf{T} = \lambda (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} + \mu (\nabla \otimes \mathbf{v} + (\nabla \otimes \mathbf{v})^T). \quad (2)$$

Уравнение (1) является локальным уравнением движения. В нем ρ — плотность материала; \mathbf{v} — скорость движения; \mathbf{T} — тензор напряжений Коши, являющийся симметричным в силу закона парности касательных напряжений. Уравнение (2) выводится из закона Гука путем дифференцирования по времени. В нем λ, μ — параметры Ляме, определяющие свойства упругого материала.

В формулах (1), (2) использованы следующие обозначения:

$$\partial_t a \equiv \frac{\partial a}{\partial t} \text{ — частная производная поля } a \text{ по } t;$$

\mathbf{I} — единичный тензор второго ранга.

$\mathbf{a} \otimes \mathbf{b}$ — тензорное произведение векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} ,
 $(\mathbf{a} \otimes \mathbf{b})^{ij} = a^i b^j$.

Численный метод

Для численного решения системы (1), (2) используется сеточно-характеристический метод на тетраэдральных сетках, позволяющий строить корректные численные алгоритмы для расчета граничных точек и точек, лежащих на поверхностях раздела сред.

Выбираются три произвольных направления, что обеспечивает изотропность метода, и вводится новая система координат (ξ_1, ξ_2, ξ_3) . В ней систему (1), (2) можно представить в следующем виде:

$$\partial_t \mathbf{q} + \mathbf{A}_1 \partial_{\xi_1} \mathbf{q} + \mathbf{A}_2 \partial_{\xi_2} \mathbf{q} + \mathbf{A}_3 \partial_{\xi_3} \mathbf{q} = 0. \quad (3)$$

В формуле (3) под вектором \mathbf{q} понимается вектор, составленный из трех компонент скорости и шести компонент симметричного тензора напряжений.

Для каждой из трех систем вида

$$\partial_t \mathbf{q} + \mathbf{A}_1 \partial_{\xi_1} \mathbf{q} = 0 \quad (4)$$

справедливо следующее точное выражение:

$$\mathbf{q}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau) = \sum_{i=1}^I \mathbf{X}_i \mathbf{q}(\xi_1 - c_i \tau, \xi_2, \xi_3, t), \quad (5)$$

где \mathbf{X}_i — некие матрицы, выражающиеся через компоненты матрицы \mathbf{A}_1 ; c_i — собственные числа матрицы \mathbf{A}_1 ; τ — шаг интегрирования по времени.

Используя в формуле (5) интерполяцию высокого порядка и последовательно применяя для каждого из направлений ξ_1, ξ_2, ξ_3 формулы, аналогичные (5), получаем способ нахождения решения на следующем временном слое.

Результаты

Рассматриваются четыре задачи:

- моделирование торцевого удара в стенку куба;
- моделирование сферического взрыва в центре куба;

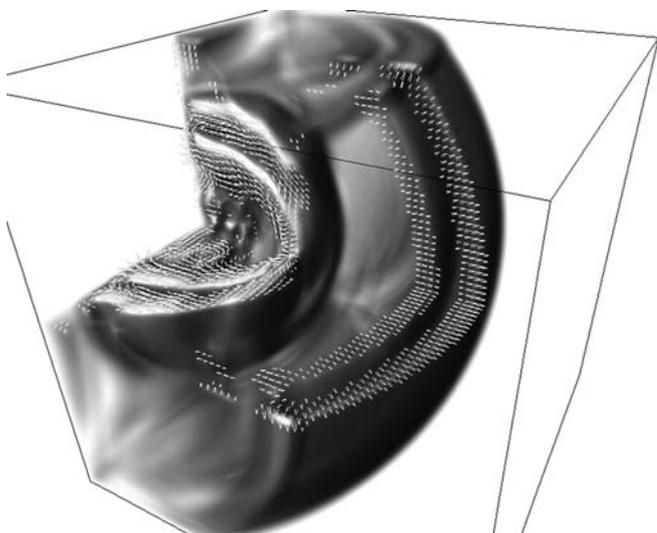


Рис. 1. Задача о торцевом ударе. Трехмерный случай

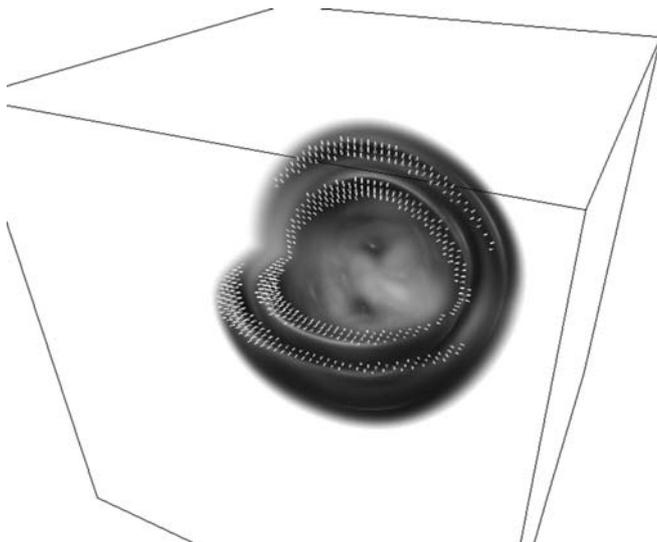


Рис. 2. Задача о сферическом взрыве в центре куба. Трехмерный случай

- моделирование приповерхностного сейсмического сферического взрыва в линейно-упругой среде;
- моделирование землетрясения в земной коре.

Во всех четырех случаях область интегрирования представляет собой куб, в котором сгенерирована тетраэдральная сетка. Использовалась интерполяция с ограничителем на основе кубической. На всех сторонах куба задано условие свободной границы.

На рис. 1 изображен результат моделирования торцевого удара в центр стенки куба, а на рис. 2 — сферического взрыва в центре куба. Сетка состоит из приблизительно 200 тыс. не разбитых на вспомогательные тетраэдров. Было сделано около 100 шагов по времени.

На рис. 3 представлен результат моделирования приповерхностного сейсмического взрыва, а на рис. 4 — результат моделирования землетрясения. Сетка состоит приблизительно из 500 тыс. неразби-

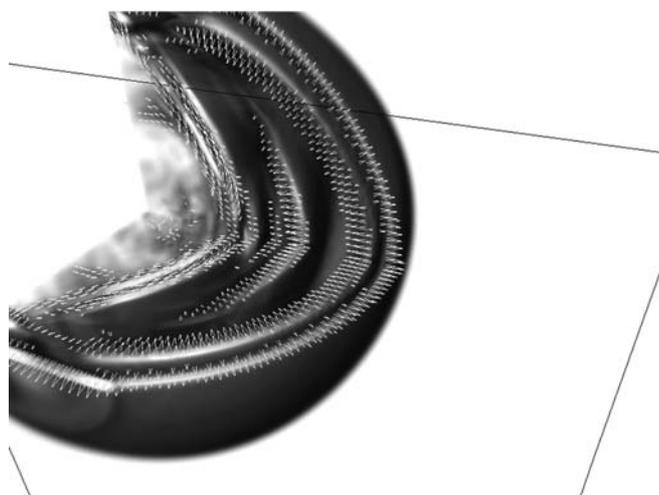


Рис. 3. Задача о приповерхностном сейсмическом сферическом взрыве. Трехмерный случай

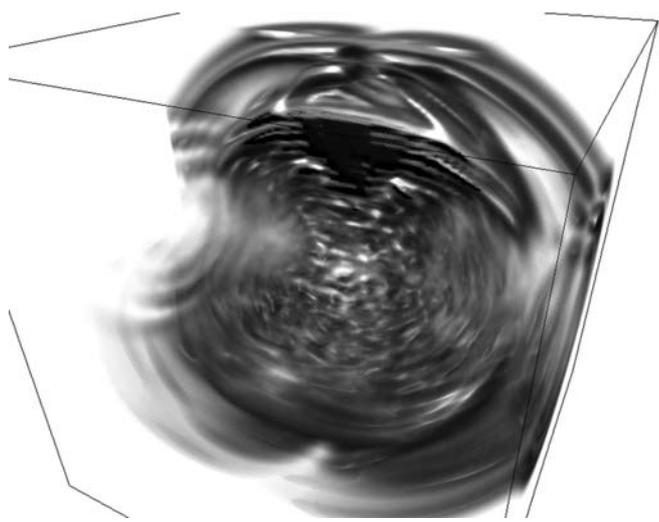


Рис. 4. Моделирование землетрясения. Трехмерный случай

тых тетраэдров. При моделировании приповерхностного взрыва было сделано 1200 шагов по времени, а при моделировании землетрясения — 700.

На всех рисунках густоте визуализированной среды соответствует модуль скорости. На рис. 1—3 стрелочками показано ее направление. Видна картина возникающих волн: объемных сейсмических продольных и поперечных, а также поверхностных сейсмических волн.

Список литературы

1. Кондауров В. И., Фортгов В. Е. Основы термомеханики конденсированной среды. М.: МФТИ, 2002. 256 с.

2. Магомедов К. М., Холодов А. С. Сеточно-характеристические численные методы. М.: Наука, 1988. 288 с.

3. Петров И. Б., Лобанов А. И. Лекции по вычислительной математике. М.: Интернет-университет информационных технологий, 2006. 523 с.

4. Квасов И. Е., Петров И. Б., Челноков Ф. Б. Расчет волновых процессов в неоднородных пространственных конструкциях // Сб. науч. тр. МФТИ: Моделирование процессов обработки информации. М.: МФТИ, 2007. С. 4—15.

5. Панкратов С. А., Мацневский Н. С., Петров И. Б. Численное моделирование деформационных динамических процессов в задачах сейсморазведки сеточно-характеристическим методом // Сб. науч. тр. МФТИ: Моделирование процессов обработки информации. М.: МФТИ, 2007. С. 30—37.

6. Челноков Ф. Б. Численное моделирование деформационных динамических процессов в средах со сложной структурой // Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. 05.13.18. 2005.

УДК 519.63

И. Б. Петров, д-р физ.-мат. наук, зав. каф.,
А. В. Фаворская, студентка,
Московский физико-технический институт
(государственный университет),
e-mail: petrov@mipt.ru

Библиотека методов интерполяции высоких порядков на неструктурированных треугольных и тетраэдральных сетках

Разработаны методы интерполяции высоких порядков на неструктурированных треугольных и тетраэдральных сетках: интерполяция полиномами с первой по пятую степень включительно, интерполяция с ограничителем, на основе полиномиальных степеней со второй по пятую включительно, кусочно-линейная интерполяция. Написана библиотека, реализующая все перечисленные методы, и проведено ее численное тестирование.

Ключевые слова: интерполяция высоких порядков, треугольные сетки, тетраэдральные сетки, неструктурированные сетки

Введение

В ряде задач механики деформируемого тела, например в задачах сейсмической разведки, используется сеточно-характеристический метод [1] на неструктурированных треугольных сетках для двумерных задач и тетраэдральных сеток для трехмерных задач. Как правило, при выборе таких типов сеток ограничиваются методами первого порядка аппроксимации, так как вычисляются только

значения в вершинах, а для определения функции, более сложной, чем линейная, требуются значения в большем числе точек.

При использовании сеточно-характеристического метода возникает потребность определять решение на пересечении характеристики с предшествующим временным слоем исходя из значений в ближайших узлах. Поскольку координаты точек пересечения зависят от выбора координатных осей, от шага интегрирования, точного вида сетки в окрестности точки, то желательно уметь интерполировать [2] их в любой точке. Также процедуры интерполяции могут быть востребованы в случае использования деформируемых сеток, при введении новых треугольников (тетраэдров), значения в вершинах которых необходимо будет проинициализировать.

В работе [3] представлены следующие методы интерполяции на треугольных сетках: полиномиальная интерполяция с первой по четвертую степени, соответствующая квадратичной кусочно-линейная интерполяция и интерполяция с ограничителем с использованием квадратичного и кубического полиномов.

В работе предложены методы полиномиальной, кусочно-линейной интерполяции и интерполяции с ограничителем для полиномов с первой по пятую степень включительно как на треугольных, так и на тетраэдральных сетках. На основе полученных формул была написана библиотека и проведено ее тестирование.

Реконструкция полиномами

Для определения полиномиального поля степени N , зависящего от x и y , требуется знать зна-

чения в $\frac{(N+1)(N+2)}{2}$ точках, которые в дальнейшем будут называться опорными. А для определения полиномиального поля степени N , зависящего от x, y и z , требуется знать значения в $\frac{(N+1)(N+2)(N+3)}{6}$ опорных точках.

Предлагается следующий способ расстановки опорных точек. В треугольнике ABC (тетраэдре $ABCD$) проводятся прямые (плоскости), параллельные его сторонам (граням) и делящие каждую из его сторон (ребер) на N равных частей. Опорные точки нумеруются, как показано на рис. 1 на примере $N = 3$ для тетраэдра. Когда речь идет о треугольных сетках, под векторами будем понимать двумерные векторы вида $\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix}$, когда речь идет о тетраэдральных сетках — трехмерные векторы. Обозначим векторы вершин треугольника $\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \mathbf{r}_C$ а векторы вершин тетраэдра — $\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \mathbf{r}_C, \mathbf{r}_D$.

Для каждого заданного N по соответствующим формулам вычисляются веса опорных точек $w_{abc}(\mathbf{r})$ и $w_{abcd}(\mathbf{r})$. Значение полинома в искомой точке \mathbf{r} определяется по формулам

$$v(\mathbf{r}) = \sum_{a,b,c} w_{abc}(\mathbf{r})v_{abc} \quad (1)$$

и

$$v(\mathbf{r}) = \sum_{a,b,c,d} w_{abcd}(\mathbf{r})v_{abcd} \quad (2)$$

для треугольников и тетраэдров соответственно.

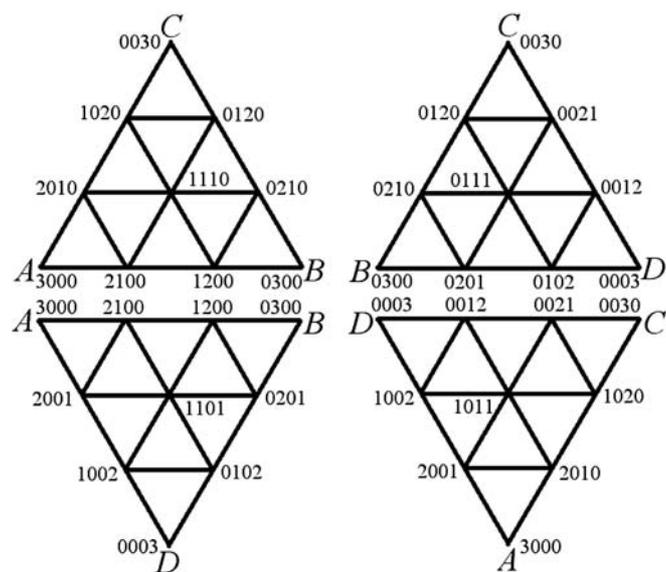


Рис. 1. Опорные точки в тетраэдре для кубической интерполяции

В формулах (1), (2) $v_j = v(\mathbf{r}_j)$ — значение интерполируемой функции в опорной точке \mathbf{r}_j .

Кусочно-линейная интерполяция

Для каждого заданного N прямые, с помощью которых вводятся опорные точки, разбивают треугольник на N подобных ему малых треугольников, а плоскости разбивают тетраэдр на подобные ему малые тетраэдры и восьмигранники. В случае $N = 2$ получается четыре малых тетраэдра и один восьмигранник, изображенный на рис. 2.

При кусочно-линейной интерполяции в треугольнике значение в любой его точке определяется путем линейной интерполяции по вершинам того малого треугольника, куда эта точка попала.

При кусочно-линейной интерполяции в тетраэдре возможны два варианта. Если точка попадает в малый тетраэдр, то значения в ней определяются по опорным точкам в вершинах этого малого тетраэдра. Если точка попадает в восьмигранник, то значение в ней определяется по опорным точкам в вершинах этого восьмигранника, для чего в восьмиграннике одним из трех возможных способов проводится ось, разбивающая его на четыре тетраэдра, имеющих объемы, равные объемам других малых тетраэдров, но не являющихся подобными им. Далее определяется, в какой из этих четырех тетраэдров попадает точка, и значение в ней интерполируется по опорным точкам в его вершинах. Кусочно-линейный интерполиант не может иметь строгих экстремумов ни в каких точках, кроме опорных.

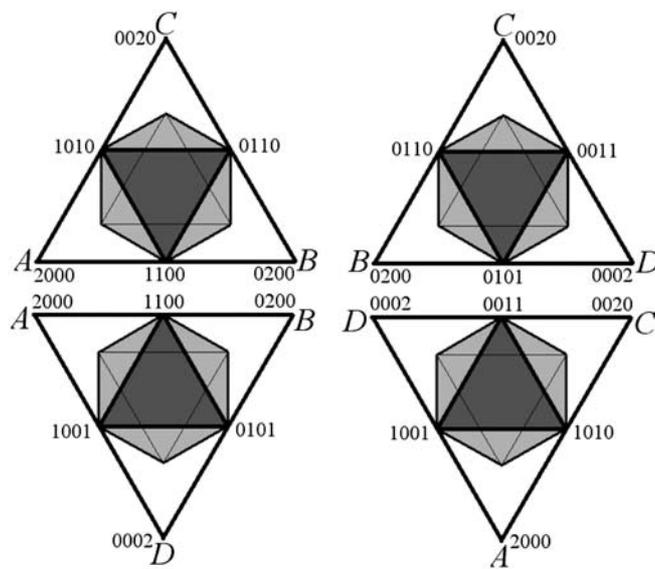


Рис. 2. Восьмигранник для опорных точек квадратичной интерполяции

Интерполяция с ограничителем

Приведем алгоритм построения интерполянта с ограничителем на треугольных (тетраэдральных) сетках на основе интерполяции полиномом порядка N .

1. Определяем значение пробной функции заданной точке r с помощью полиномиальной интерполяции порядка N , пусть оно равно $v_N(r)$.

2. Определяем, в каком из малых треугольников (тетраэдров) лежит точка r (в случае попадания в восьмигранник, как и при кусочно-линейной интерполяции, вводим вспомогательную ось).

3. Сравниваем $v_N(r)$ с минимумом значений в вершинах m и максимумом значений в вершинах M этого треугольника (тетраэдра).

3.1. Если $m \leq v_N(r) \leq M$, то значение интерполянта в точке r : $v_N(r)$.

3.2. Если $v_N(r) < m$, то значение интерполянта в точке r : m .

3.3. Если $v_N(r) > M$, то значение интерполянта в точке r : M .

Использование интерполяции с ограничителем позволяет устранять осцилляции полиномов, возникающие при наличии разрывов в интерполируемых функциях.

Сравнение разработанных методов

Если интерполируемая функция является полиномом степени $n \leq N$, то интерполянт в точности совпадает с ней, что было подтверждено соответствующими тестовыми расчетами. Поэтому интерес представляет поведение интерполянта в случаях, когда интерполируемая функция является полиномом степени $m > N$ или же вообще не является полиномом, или даже непрерывной функцией. Соответствующее тестирование показало, что использование ограничителя позволяет устранять возникающие для некоторых интерполируемых функций полиномиальные осцилляции и не портить их гладкость в ситуациях, когда осцилляций не возникает.

Для демонстрации работы ограничителя на рис. 3, 4 приведены срезы полиномиальных интерполянтов и интерполянтов с ограничителем со-

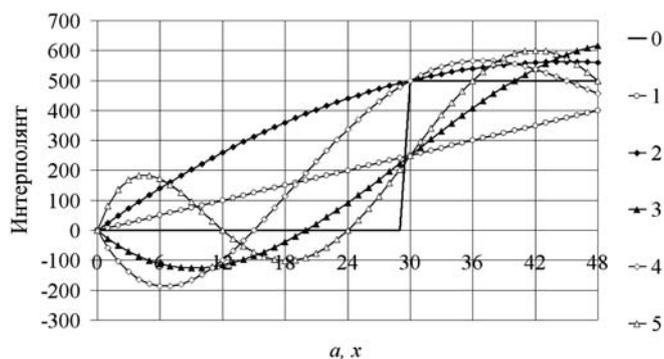


Рис. 3. Полиномиальные интерполянты

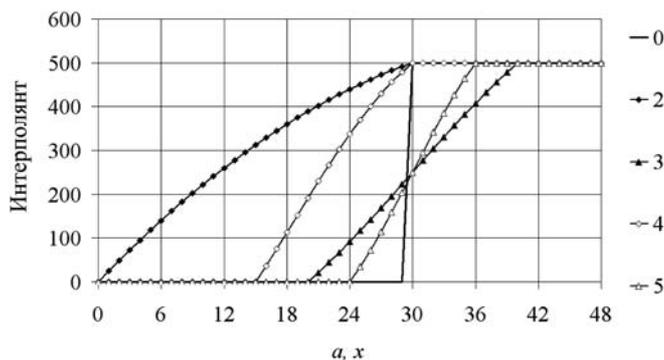


Рис. 4. Интерполянты с ограничителем

ответственно вдоль прямой, не пересекающей ни одной опорной точки в тетраэдре и параллельной оси x , для разрывной интерполируемой функции. Нулем обозначается интерполируемая функция, остальные номера указывают на степень используемого полинома.

Список литературы

1. Магомедов К. М., Холодов А. С. Сеточно-характеристические численные методы. М.: Наука, 1988. 288 с.
2. Петров И. Б., Лобанов А. И. Лекции по вычислительной математике. М.: Интернет-университет информационных технологий, 2006. 523 с.
3. Челноков Ф. Б. Численное моделирование деформационных динамических процессов в средах со сложной структурой // Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. 05.13.18. М., 2005.

Н. И. Бунькина, канд. техн. наук, доц.,
Д. В. Лакеев, аспирант,
 Национальный исследовательский
 технологический университет "МИСиС",
 e-mail: lakeyev@yandex.ru

Задачи составления расписаний с альтернативными приборами. Решение с помощью генетических алгоритмов

Описан генетический алгоритм для решения задачи job-shop, характеризующейся наличием альтернативных приборов. Рассматриваемая задача является одной из самых сложных среди задач комбинаторной оптимизации и относится к числу NP-трудных. В статье раскрываются идеи представления расписаний и преобразования невыполнимых расписаний в выполнимые. Вычислительные эксперименты показали, что предложенный метод позволяет находить близкие к оптимальным решения для стандартных вычислительных тестов и имеет полиномиальную сложность.

Ключевые слова: задачи составления расписаний, генетические алгоритмы, альтернативные приборы, job-shop

Задачи составления расписаний являются одними из самых сложных среди всех задач исследования операций. Для некоторых из них были разработаны эффективные точные алгоритмы решения, имеющие полиномиальную сложность, в то время как другие являются NP-трудными, отыскание точного решения для которых затруднено.

Далее рассматривается метод решения задачи составления расписаний с системой обслуживания job-shop, характеризующейся наличием в системе альтернативных приборов и обслуживанием требований партиями.

Постановка задачи

Пусть имеется система, включающая в себя набор приборов разных типов, каждый из которых характеризуется выполняемой им технологической операцией. В рамках указанной системы требуется обслужить некоторое число партий требований.

Каждая партия характеризуется числом требований, входящих в ее состав, длительностями обработки этих требований на том или ином приборе и индивидуальным технологическим маршрутом (последовательностью операций, которые должны быть выполнены в процессе ее обслуживания). Мо-

мент времени, когда отдельное требование покидает прибор, совпадает с моментом, когда прибор прекращает работу по ее обслуживанию, т. е. имеет место индивидуальное завершение обработки. Вследствие этого, требования одной партии могут проходить обслуживание одновременно, но на разных приборах. Кроме этого, партии требований могут образовывать очередь, и партия, поступившая на обслуживание первой, не обязательно должна быть обработана в первую очередь.

Для каждой технологической операции задано свое множество допустимых исполнителей. То есть в системе может присутствовать несколько приборов, способных выполнить одну и ту же технологическую операцию (не обязательно за одинаковое время), которые далее будут называться альтернативными. Требования одной партии могут обрабатываться такими приборами одновременно, причем число отдельных требований, обслуживаемых каждым из альтернативных приборов, является частью принимаемого решения.

Для описанной системы требуется составить расписание, в котором работы закрепляются за приборами, и определяется порядок их выполнения, причем общее время завершения обслуживания всех требований должно быть минимально.

Способ представления данных

Сформулированная задача является NP-трудной и для ее решения имеет смысл применять какой-либо из приближенных методов. Стоит выделить генетические алгоритмы, эффективно функционирующие на многоэкстремальном пространстве поиска и имеющие высокую скорость работы. Данный метод успешно использовали многие исследователи при решении задач рассматриваемого класса, он показал хорошие результаты.

Для представления расписаний задачи job-shop в виде, пригодном для применения генетических алгоритмов, используют следующие подходы [1, 2]:

- 1) представление на основе операций;
- 2) представление на основе работ;
- 3) представление на основе списка предпочтений;
- 4) представление на основе отношений пар работ;
- 5) представление на основе приоритетных правил;
- 6) представление на основе дизъюнктивного графа;
- 7) представление на основе времени завершения;
- 8) представление на основе машин;
- 9) представление на основе произвольных ключей.

Подходы 1, 2, 4, 7 и 9 являются прямыми, в которых решения непосредственно кодируются в хро-

мосомах — числовых последовательностях, с которыми работают генетические алгоритмы.

Генетические алгоритмы в этом случае напрямую используются для поиска лучшего из решений.

В непрямых подходах в хромосомах кодируются правила назначения работ, и генетические алгоритмы используются для нахождения лучшей последовательности этих правил. К подобным подходам относятся подходы 3, 5, 6 и 8.

Приведенные подходы представления расписаний не могут быть применены к рассматриваемой задаче, так как не рассчитаны на наличие в системе альтернативных приборов и обслуживание требований партиями. Поэтому предлагается модифицировать один из известных подходов с тем, чтобы учесть обозначенные особенности. Исходя из этого для представления расписаний был выбран подход 2 (представление на основе работ). Данный выбор также обусловлен хорошими показателями работы генетических алгоритмов с подобным представлением данных [2].

В этом случае задача составления расписаний для группы приборов сводится к составлению расписаний работ для каждого прибора в отдельности, где кодируемые параметры отвечают за порядок обслуживания на каждом из приборов. Тогда хромосома будет представлять собой конкатенацию отдельных блоков, каждый из которых отвечает за последовательность выполнения работ на отдельном приборе, причем размер этих блоков будет разным, так как на каждом из приборов должно быть обслужено разное число партий требований. Структура хромосомы будет иметь вид, представленный на рис. 1.

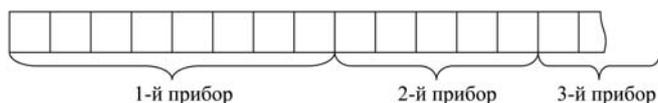


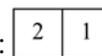
Рис. 1. Структура хромосомы

Представление расписания работ предлагается выполнять согласно следующей схеме. Пусть в системе существует единственный прибор, выполняющий определенную технологическую операцию, и n_1 партий требований, которые должны быть обслужены на данном приборе. Тогда номер партии, обслуживаемой этим прибором первой, кодируется в хромосоме в первую очередь. Номер партии, обслуживаемой второй, выбирается из оставшихся $n - 1$ партий и кодируется во вторую очередь, и т. д. Номер партии, обслуживаемой в последнюю очередь, не кодируется, так как его можно определить по остаточному принципу. Описанный способ ко-

дирования можно проиллюстрировать с помощью рис. 2.

$n_1 = 3$.

Значения, закодированные в хромосоме:



Последовательность работ:

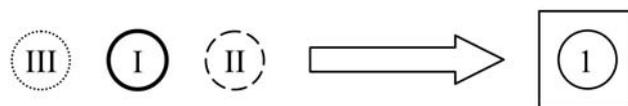


Рис. 2. Расписание работ для прибора, выполняющего определенную технологическую операцию

Указанный способ кодирования применим лишь в том случае, когда в рассматриваемой системе не существует приборов, являющихся альтернативными относительно выполнения какой-либо технологической операции. В соответствии с постановкой задачи в системе допускается наличие таких приборов, поэтому обслуживание отдельной партии требований может происходить как на одном из них, так и на нескольких. Исходя из этого информация о том, на каких из альтернативных приборов должна быть обработана та или иная партия, также должна содержать хромосома.

Пусть имеется m_1 альтернативных приборов, выполняющих определенную операцию. Тогда перед каждым номером партии, обслуживаемой на данных приборах и закодированной описанным ранее способом, задается m_1 дополнительных значений, каждое из которых соответствует отдельному альтернативному прибору и характеризует его участие в обработке данной партии. Описанный способ кодирования можно проиллюстрировать с помощью рис. 3.

$n_1 = 3$. $m_1 = 2$.

Значения, закодированные в хромосоме:



Последовательность работ:

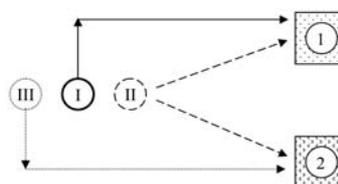


Рис. 3. Расписание работ для альтернативных приборов

Закодированная предлагаемым способом последовательность выполнения работ однозначно определяет возможное расписание с учетом того, что технологические маршруты в рассматриваемой задаче не являются строго фиксированными, это позволяет использовать для ее решения генетический алгоритм.

Алгоритм гармонизации

Стоит отметить, что часть расписаний, кодируемых описанным ранее способом, не может быть реализована на практике, так как содержит взаимоисключающие последовательности выполнения работ. Более того, такие расписания постоянно образуются в ходе работы генетического алгоритма в результате применения генетических операторов. Поэтому закодированные последовательности выполнения работ необходимо преобразовать так, чтобы любая из них была практически реализуемой. При этом речь идет не о внесении изменений в имеющуюся хромосому, что могло бы снизить вариабельность популяции, а об особой интерпретации имеющейся информации на этапе декодирования. Данная процедура носит название алгоритма гармонизации [3]. С учетом используемого способа кодирования была разработана соответствующая процедура, которая функционирует следующим образом.

Пусть в качестве исходных данных задачи задана матрица технологических маршрутов $G = (g_{ij})$, $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$, элементами которой являются порядковые номера операций, которым должна быть подвергнута j -я партия деталей на i -м приборе (здесь n — число партий, m — число приборов). Если j -я партия не требует обслуживания на i -м приборе, то $g_{ij} = 0$. Тогда для оценки получаемых в ходе работы генетического алгоритма расписаний на предмет их реализуемости требуется введение дополнительной матрицы $\bar{G} = (\bar{g}_{ij})$, содержащей номера технологических операций в очередях на обслуживание. Элементы указанной матрицы вычисляются следующим образом:

$$\bar{g}_{ij} = g_{ip_{ij}}, \text{ где } i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n,$$

где p_{ij} — элемент перестановки партий требований, кодируемой в хромосоме и задающей порядок выполнения работ на приборах.

Алгоритм гармонизации функционирует согласно следующей схеме:

1. Для приборов $i = 1, 2, \dots, m$: если партия, которая должна быть обслужена на i -м приборе в соответствии с расписанием, находится на технологическом этапе, соответствующем заданному с помощью матрицы \bar{G} , то обслужить ее, перейдя к рассмотрению следующей партии на i -м приборе.

2. Если на шаге 1 была выполнена хотя бы одна работа, то перейти к шагу 4.

3. Для приборов $i = 1, 2, \dots, m$: если в расписании работ для i -го прибора имеется партия, находящаяся на технологическом этапе, соответствующем заданному с помощью матрицы \bar{G} , то осуществить перестановку в расписании найденной

партии с первой партией, внести соответствующие коррективы в матрицу \bar{G} и перейти к шагу 4.

4. Если хотя бы на одном приборе происходит обслуживание, то перейти к шагу 1.

Смысл приведенной процедуры заключается в том, что в рассматриваемом расписании определяются этапы, когда ни одна из партий в очередях на обслуживание не может пройти обработку согласно закодированному в хромосоме порядку, и в одной из очередей осуществляется перестановка работ, позволяющая устранить подобную коллизию.

Результаты

Для оценки скорости работы предложенного генетического алгоритма в зависимости от числа приборов, от числа партий требований и от общего числа требований, присутствующих в системе, был проведен ряд тестов. Критерием служило время выполнения заданного числа итераций. Анализ полученных в ходе вычислительных экспериментов данных позволяет сделать вывод о том, что временная зависимость предложенного метода от числа приборов составляет $t = O(m^{1,7})$ от числа партий требований $t = O(n^{1,45})$, в то время как та же зависимость от общего числа обслуживаемых требований является линейной.

История решения тестов Фишера—Томпсона

Год	Автор	Алгоритм	ft06	ft10	ft20
1969	Balas	BAB	55	1177	1231
1975	McMahon	BAB	55	972	1165
1985	Barker/McMahon	BAB	55	960	1303
1988	Adams	Shifting bottleneck	55	930	1178
1989	Carlier/Pinson	BAB	55	930	1165
1991	Nakano/Yamada	GA	55	965	1215
1992	Yamada/Nakano	GA	55	930	1184
1992	Dorndorf/Pesch	GA	55	938	1178
1993	Storer	Problem and Heuristic Space	55	954	1180
1993	Dorndorf/Pesch	GA	55	930	1165
1994	Mattfeld/Kopfer	GA	55	930	1165
1995	Dorndorf/Pesch	GA	55	938	1178
1995	Kobayashi/Ono/Yamamura	GA	55	930	1178
1995	Croce	GA	55	946	1178
1996	Yamada/Nakano	GA	55	930	1165
1996	Nowicki/Smutnicki	Tabu Search	55	930	1165
1999	Goncalves/Beirao	GA	55	936	1177
2001	Aiex	GRASP	55	930	1165
2001	Wang and Zheng	Hybrid Genetic	55	930	1165
2002	Goncalves/Mendes/Resende	GA	55	930	1165
2005	Tunglun/Ryo/Takao	GA	55	930	1165
2007	Ripon	GA	55	930	1180

Оценка точности получаемых результатов для задач составления расписаний с системой обслуживания *job-shop* представляет собой значительную сложность. Это связано с тем, что для произвольно взятой задачи невозможно определить, насколько близко полученное решение к оптимальному. Поэтому для оценки эффективности разрабатываемых алгоритмов вычислительные эксперименты проводят на задачах, для которых известны точные решения. С этой целью исследователями был предложен ряд тестовых заданий, наибольшую популярность среди которых получили тесты, разработанные Фишером и Томпсоном и носящие названия ft06, ft10, ft20 (в некоторых источниках mt06, mt10, mt20) [4]. Для этих тестовых заданий известны точные решения, которые равны 55, 930 и 1165 соответственно. История решения тестов Фишера-Томпсона приведена в таблице.

В результате проведенных вычислительных экспериментов с помощью разработанного генетического алгоритма были получены следующие ре-

зультаты: ft06 — 55; ft10 — 1032; ft20 — 1205. Приведенные значения не являются оптимальными, но показывают приемлемость предлагаемого подхода для решения задачи составления расписаний с учетом того, что сфера его применения распространяется на гораздо более сложные задачи, нежели ft06, ft10, ft20 (наличие в системе альтернативных приборов, обслуживание требований партиями, наличие переналадок, иные критерии задачи).

Список литературы

1. **Moon I., Lee J.** Genetic Algorithm Application to the Job Shop Scheduling Problem with Alternative Routings // Technical report. Brain Korea 21 Logistics Team. Pusan National University. 2000.
2. **Ponnambalam S. G., Aravindan P., Sreenivasa Rao P.** Comparative evaluation of genetic algorithms for job-shop scheduling // Production Planning & Control. 2001. Vol. 12, № 6. P. 560—574.
3. **Yamada T., Nakano R.** Genetic Algorithms for Job-Shop Scheduling Problems. // Proc. of Modern Heuristic for Decision Support (UNICOM seminar, London. 18—19 March, 1997). P. 67—81.
4. **Muth J. F., Thompson G. L.** Industrial Scheduling. — Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1963.

2—3 декабря 2011 г. в Москве пройдет

ЮБИЛЕЙНАЯ Десятая Международная конференция в области обеспечения качества ПО "Software Quality Assurance Days"



На конференции планируется обсуждение ключевых вопросов по следующим тематикам:

- функциональное тестирование;
- интеграционное тестирование;
- тестирование производительности;
- автоматизация тестирования и инструментальные средства;
- конфигурационное тестирование;
- тестирование удобства использования (usability);
- тестирование защищенности (security);
- статические методы обеспечения качества;
- внедрение процессов тестирования на предприятии;
- управление процессами обеспечения качества ПО;
- менеджмент команд тестировщиков и инженеров качества ПО;
- аутсорсинг тестирования;
- тестирование системных приложений (не Web), а также тестирования игр и мобильных приложений;
- мотивация проектной команды и сертификация специалистов в области обеспечения качества ПО.

Подробную информацию см. на сайте конференции
<http://it-conf.ru/ru/content/379.htm>

УДК 527.62.007

Х. Г. Асадов, д-р техн. наук, нач. отдела,
К. Х. Исмаилов, канд. техн. наук, доц.,
 Национальная авиационная академия
 НИИ аэрокосмической информатики
 Национального аэрокосмического агентства,
 г. Баку
 e-mail: asadzade@rambler.ru

Информационный метод позицирования объектов

Показано, что для построения системы позицирования можно использовать как степень затухания, так и скорость распространения сигнала, которые зависят от метеорологических и частотных параметров. Предложен информационный метод позицирования по признаку максимума целевого информационного функционала. Изложена итерационная процедура реализации предложенного метода информационного позицирования.

Ключевые слова: позицирование, затухание, навигация, оптимизация, итеративная процедура

В общем случае термин "позицирование" связан со словом "позиция", которое обозначает место, участок, позу, расположение, ранг, статус и т. д.

Позицирование — это целенаправленное действие для определения позиции объекта относительно базовых фиксированных точек. Наиболее современным техническим средством позицирования является Глобальная система позицирования, являющаяся космической радионавигационной системой США, позволяющая определить с помощью GPS-приемников трехмерные геометрические (географические) координаты, а также время в любой точке своего местопребывания.

Основными проблемами в технике позицирования с помощью GPS-приемников является точность, надежность и быстродействие работы системы обнаружения местонахождения.

В операции позицирования объект A , содержащий приемник (см. рисунок), пытается определить свою позицию относительно нескольких передатчиков P_1, P_2, \dots, P_n , принимая засинхронизированные сигналы со спутников, имеющих на борту эти передатчики.

Основной операцией в позицировании является определение расстояний между приемником и передатчиками. Для определения этих расстояний можно воспользоваться двумя путями, используя соответственно два показателя:

- степень ослабления сигнала при прохождении расстояния между приемником и передатчиками;
- время прохождения сигнала между приемником и передатчиками.

Покажем, как могут быть определены расстояния между приемником и передатчиками в общих случаях.

В первом случае, например, если рассматривать акустические волны, то для плоских волн имеем [1]:

$$P(x) = P_0 e^{-mx}, \quad (1)$$

где P_0 — энергия источника акустических волн; $P(x)$ — энергия акустического сигнала на расстоянии x ; m — коэффициент ослабления.

Из формулы (1) имеем:

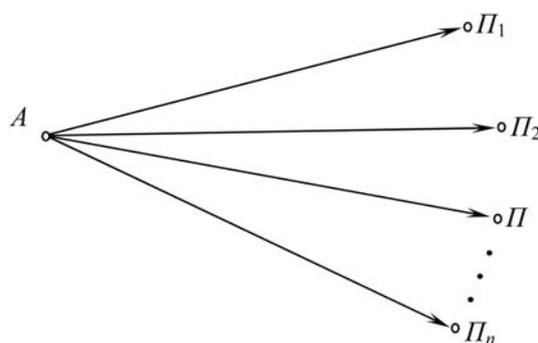
$$x = \frac{1}{m} \ln \frac{P_0}{P(x)}. \quad (2)$$

Так как согласно [1] имеется зависимость

$$m = f(T, F, W),$$

где T — температура воздуха; F — частота акустического сигнала; W — влажность воздуха, а также $x = vt$, где v — скорость распространения звука; t — время, возможны различные комбинации установления зависимости x от $P(x)$, учитывающие вводимые меры температурной компенсации.

Во втором случае, например, если рассматривать электромагнитные волны в системе GPS, то ско-



Схематическое представление позицирования

рость распространения электромагнитных волн значительно зависит от метеорологических факторов. Например, как указано в работах [2, 3], в современных системах GPS задержка распространения сигнала из-за дождей, рассеяния, влияния ионосферы, водных паров, вулканического пепла и т. д. может привести к геометрической погрешности 20 мм на 1 км пути. Очевидно, что применительно к спутниковой системе GPS такая погрешность может вызвать неточность позиционирования до нескольких метров, что в некоторых случаях оказывается недопустимым.

Таким образом, в обоих случаях возможны характерные погрешности определения расстояний из-за метеорологических факторов, которые частично компенсируются подбором частоты зондирующего сигнала.

С учетом сказанного выше можно предложить информационный метод позиционирования, обладающий некоторым потенциалом для дальнейшего повышения точности.

Суть предлагаемого метода заключается в следующем. Передатчики непрерывно генерируют случайные сигналы, которые распространяются во всех направлениях.

Рассматриваем первый механизм определения длины пути. В этом случае количество информации M_i , принятой приемником от i -го передатчика, определится как

$$M_i = T_{\text{дл.с}} \log_2 \left[\frac{U_i(T_{\text{дл.п}_i})}{\Delta U} + 1 \right], \quad (3)$$

где $T_{\text{дл.с}}$ — длительность i -го принятого сигнала; U_i — амплитуда исходного сигнала; $T_{\text{дл.п}_i}$ — длительность распространения сигнала от передатчика до приемника i ; ΔU — квант сигнала.

Для всех n каналов имеем

$$M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n T_{\text{дл.с}_i} \log_2 \left[\frac{U_i(T_{\text{дл.п}_i})}{\Delta U} + 1 \right]. \quad (4)$$

Если рассматривать случай отсутствия движения объекта относительно сенсоров, то можно предположить, что

$$\sum_{i=1}^n T_{\text{дл.п}_i} = c = \text{const}. \quad (5)$$

Допустим, что имеется возможность изменения $T_{\text{дл.с}_i}$ — длительности сигнала, принятого с i -го передатчика.

Тогда потребуется нахождение такой функции

$$T_{\text{дл.п}_i} = \psi(T_{\text{дл.с}_i}), \quad (6)$$

при которой приведенный ниже функционал достигает максимума

$$M_{\Sigma}^{(1)} = \sum_{i=1}^n T_{\text{дл.с}_i} \log_2 \left[\frac{U_i(T_{\text{дл.п}_i})}{\Delta U} + 1 \right] + \lambda \sum_{i=1}^n \psi(T_{\text{дл.с}_i}), \quad (7)$$

где λ — множитель Лагранжа.

С учетом формулы (6) функционал (7) перепишем в следующем виде:

$$M_{\Sigma}^{(1)} = \sum_{i=1}^n T_{\text{дл.с}_i} \log_2 \left[\frac{U_i(\psi(T_{\text{дл.с}_i}))}{\Delta U} + 1 \right] + \lambda \sum_{i=1}^n \psi(T_{\text{дл.с}_i}). \quad (8)$$

Если учесть, что ΔU означает шумы измерения, то $\frac{U_i(\psi(T_{\text{дл.с}_i}))}{\Delta U}$ означает отношение сигнал/шум χ .

Введем в рассмотрение функцию

$$\chi = \chi(\psi(T_{\text{дл.с}_i})). \quad (9)$$

С учетом формулы (9) выражение (8) в непрерывном виде запишем следующим образом:

$$M_S^{(1)} = \int_0^{T_{\text{дл.с. max}}} T_{\text{дл.с}} \log_2 [\chi(\psi(T_{\text{дл.с}})) + 1] dT_{\text{дл.с}} + \lambda \int_0^{T_{\text{дл.с. max}}} \psi(T_{\text{дл.с}}) dT_{\text{дл.с}}. \quad (10)$$

Выражение (5) в непрерывном виде запишем как

$$\int_0^{T_{\text{дл.с. max}}} \psi(T_{\text{дл.с}}) dT_{\text{дл.с}} = c_1 = \text{const}. \quad (11)$$

Функцию $\chi(\psi(T_{\text{дл.с}}))$ представим в виде

$$\chi(\psi(T_{\text{дл.с}})) = \chi_0 + \chi' \psi(T_{\text{дл.с}}). \quad (12)$$

С учетом формулы (12) функционал (10) запишем в виде

$$M_S^{(1)} = \int_0^{T_{\text{дл.с. max}}} T_{\text{дл.с}} \log_2 [\chi_0 + \chi' \psi(T_{\text{дл.с}}) + 1] dT_{\text{дл.с}} + \lambda \int_0^{T_{\text{дл.с. max}}} \psi(T_{\text{дл.с}}) dT_{\text{дл.с}}. \quad (13)$$

При этом непрерывный аналог искомой функции (6) имеет вид

$$T_{\text{дл.п}} = \psi(T_{\text{дл.с}}). \quad (14)$$

Вычислим функцию (14), при которой функционал (13) достигает максимального значения.

Для этого воспользуемся методом Эйлера. Согласно этому методу из выражения (13) получаем

$$\frac{T_{\text{дл.с}}\chi'}{\ln 2[\chi_0 + \chi'\psi(T_{\text{дл.с}}) + 1]} + \lambda = 0. \quad (15)$$

Из формулы (15) находим

$$T_{\text{дл.п}} = \psi(T_{\text{дл.с}}) = -\left[\frac{T_{\text{дл.с}}}{\lambda \ln 2} + \frac{\chi_0}{\chi'} + \frac{1}{\chi'}\right]. \quad (16)$$

Учитывая формулы (16) и (11), получаем

$$-\int_0^{T_{\text{дл.с.макс}}} \left[\frac{T_{\text{дл.с}}}{\lambda \ln 2} + \frac{\chi_0}{\chi'} + \frac{1}{\chi'}\right] dT_{\text{дл.с}} = c_1. \quad (17)$$

Из выражения (17) имеем

$$\lambda = -\frac{T_{\text{дл.с.макс}}^2}{2 \ln 2 \left[c_1 + \frac{T_{\text{дл.с.макс}}\chi_0}{\chi'} + \frac{T_{\text{дл.с.макс}}}{\chi'} \right]}. \quad (18)$$

Учитывая формулы (18) и (15), получаем

$$\psi(T_{\text{дл.с}}) = \frac{2T_{\text{дл.с}}\chi'\gamma}{\chi'T_{\text{дл.с.макс}}^2} - \frac{\chi_0}{\chi'} + \frac{1}{\chi'}. \quad (19)$$

С учетом отрицательности χ из выражения (19) имеем

$$T_{\text{дл.п}} = \psi(T_{\text{дл.с}}) = \frac{2T_{\text{дл.с}}\gamma}{T_{\text{дл.с.макс}}^2} + \frac{\chi_0 + 1}{|\chi'|}. \quad (20)$$

Из выражения (20) ясно, что если величина системного параметра γ отрицательна, то с увеличением $T_{\text{дл.с}}$ значение $T_{\text{дл.п}}$ должно уменьшаться. Однако, если γ является положительной величиной, то $T_{\text{дл.п}}$ будет расти с увеличением $T_{\text{дл.с}}$.

Покажем, что функционал (13) одномадный.

Для этого достаточно вычислить производную выражения (15) по ψ и убедиться, что она всегда отрицательна.

С учетом сказанного можно предложить следующую итерационную процедуру реализации информационного метода позиционирования:

1. Составляется набор $\{T_{\text{дл.с}1}, T_{\text{дл.с}2}, T_{\text{дл.с}3}\}$.
2. Осуществляется ротация элементов набора по сенсорам.
3. Вычисляется величина функционала (13).
4. Ротация останавливается тогда, когда функционал (13) достигает максимального значения.
5. С учетом результатов перебора и функции (16) вычисляются значения $T_{\text{дл.п}}$, которые пропорциональны расстояниям от сенсоров до объекта.
6. Осуществляется итерационное повторение пп. 1–5, при этом добивается сходимость полученных величин $T_{\text{дл.п.}i}$ к одной точке.
7. На основании полученных расстояний до объекта осуществляется позиционирование объекта.

* * *

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования.

- ◆ Показано, что для построения системы позиционирования можно использовать как степень затухания, так и скорость распространения сигнала, которые зависят от метеорологических и частотных параметров.
- ◆ Предложен информационный метод позиционирования, где позиционирование осуществляется по признаку максимума целевого информационного функционала.
- ◆ Изложена итерационная процедура реализации предложенного метода информационного позиционирования.

Список литературы

1. Behn D. A. Environmental effects on the Speed of sound // Journal of Audio Engineering Society. 1988. V. 36, N 4. April.
2. Solheim F. S., Vivekanandan R. H., Rocken Ch. Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates // Journal of Geophysical Research. 1999. V. 104. N 08. April. 27. P. 9663–9670.
3. Paros J., Yilmaz M. Broadband Meteorological Sensors Co-located with GPS Receivers for Geophysical and Atmospheric Measurements. URL: www.paroscientific.com/pdf/broadbandsensors.pdf

Б. Г. Ибрагимов, д-р техн. наук., проф.,
e-mail: i.bayram@mail.ru,

Азербайджанский технический университет,
Г. Г. Ибрагимов, канд. техн. наук., ст. науч. сотр.,
Институт Кибернетики НАНА

Эффективность передачи мультимедийного трафика многофункциональным абонентским и сетевым терминалом

Исследуется звено мультисервисных сетей связи с коммутацией пакетов, образованное абонентскими и сетевыми терминалами мультимедийного типа. На основе исследования эффективности функционирования системы создана математическая модель терминального оборудования звена мультисервисных сетей связи и получены аналитические выражения для оценки их сетевых характеристик.

Ключевые слова: неоднородный трафик, абонентский и сетевой терминал, звено мультисервисной сети, высокоскоростной доступ, качество услуг

Введение

Одним из актуальных направлений развития единой универсальной телекоммуникационной инфраструктуры на базе современных информационных технологий является создание мультисервисных сетей связи, образованных абонентскими и сетевыми терминалами мультимедийного типа.

В современном телекоммуникационном пространстве появление новых видов неоднородного трафика и гарантированное качество его обслуживания требуют создания высокоэффективного терминального оборудования звена мультисервисных сетей связи, с помощью которых пользователям предоставляется удобный интерфейс для доступа к широким информационно-коммуникационным услугам и возможность многоскоростного обслуживания. Учитывая важность создания сети связи следующего поколения на базе NGN-технологий (*Next Generation Network*) с коммутацией пакетов для гарантированного качества обслуживания QoS (*Quality of Service*) неоднородного трафика следует обратить особое внимание на его характеристики [1, 2]. В таких сетях пользователи получают высокоскоростной и широкополосный доступ с помощью абонентских и сетевых терминалов. Важный вопрос, возникающий при этом, — оценка качества обслуживания пользователей,

которая зависит как от алгоритма доступа к услугам, так и от эффективности функционирования звеньев мультисервисной сети.

В работе рассматривается решение сформулированной выше задачи — исследование и оценка характеристик эффективности многофункционального абонентского и сетевого терминала (МАиСТ) звена мультисервисных сетей связи.

Общая постановка задачи

Установлено в работах [2, 3], что основными и наиболее востребованными услугами связи являются доступ в сети АТМ (*Asynchronous Transfer Mode*), Интернет и IP-телефония (*Internet Protocol*), в которых необходимо более детально исследовать поток трафика. Эти услуги требуют многоскоростных систем обслуживания, достаточного объема абонентского и сетевого ресурса, различной скорости передачи — начиная от 64 кбит/с до 155 Мбит/с. При реализации вышеуказанных услуг в звене сети появляется источник нагрузки, который генерирует неоднородный трафик реального времени. Причем каждый источник нагрузки предъявляет определенные требования к характеристикам терминального оборудования звена мультисервисных сетей связи. Для гарантированного обслуживания этих нагрузок сеть должна обеспечить определенные характеристики: максимальные значения пропускной способности, среднюю задержку при передаче пакета, повышенные коэффициенты эффективного использования ресурсов абонентских и сетевых терминалов и др.

Решение рассматриваемой задачи требует комплексного подхода при исследовании основных характеристик МАиСТ мультисервисных сетей связи с коммутацией пакетов. Возникает важная задача разработки математической модели (ММ) звена мультисервисных сетей связи, образованной абонентскими и сетевыми терминалами мультимедийного типа.

Для формализации задачи предлагается математическая модель, которая будет наиболее точно отражать телекоммуникационные процессы, протекающие в исследуемом звене сети при оказании услуг, и позволит получить аналитические выражения для вычисления основных характеристик.

Описание модели и анализ показателей звена сети связи

Для точного описания мультимедийного трафика, проходящего между звеньями сети и ее абонентскими и сетевыми элементами, требуется анализ их статистических характеристик и выбор адекватной ММ самоподобного (фрактального)

случайного процесса. Исследования статистических свойств информационных потоков неоднородного трафика показали [4, 5], что трафик в телекоммуникационных системах является случайным процессом $r(t)$.

Рассматриваемое звено сети представляет собой систему массового обслуживания (СМО) типа $M/G/N_m/N_{\text{бн}}$ с некоторыми допущениями, так называемыми "тяжелыми хвостами", в которых процесс поступления потоков пакетов на обслуживание является пуассоновским с интенсивностью λ_i , $i = \overline{1, n}$, распределение длительности обслуживания — произвольное, N_m обслуживающих терминалов имеют общий буферный накопитель (БН) емкости $N_{\text{бн}}$.

Предположим, что $i_p(t)$, $i_{\text{нр}}(t)$, $i_b(t)$ — число терминалов, занятых обслуживанием речевых, неречевых и видеотрафиков в момент времени t , соответственно. Так как пакеты в широкополосных сетях телекоммуникации занимают единичный терминальный ресурс, где скорость абонентского и сетевого терминала $V \geq 64$ кбит/с, то $[i_p(t) + i_{\text{нр}}(t) + i_b(t)] \leq N_m$. Здесь V — скорость передачи трафика, выраженная в единицах терминального ресурса, требуемого для обслуживания поступающих заявок абонентскими и сетевыми терминалами. Случайный процесс $r(t)$, описывающий функционирование СМО, задается компонентами $r(t) = \{i_p(t), i_{\text{нр}}(t), i_b(t)\}$, непрерывно зависящими от параметра времени $t \in (0, T]$, и принимает значения в конечном пространстве состояний S [3].

Сформировав основные допущения, можно перейти к непосредственному анализу и описанию показателей звена сетей связи. Они основываются на математической модели СМО. Допустим, что в модуль БН входного коммутатора поступают стационарные гетерогенные пуассоновские потоки пакетов с параметрами λ_p , $\lambda_{\text{нр}}$, λ_b , создаваемые различными типами источников (голос, факс, Internet, данные, видео и др.) нагрузки. Длительность обслуживания i -го трафика имеет произвольную функцию распределения $b_i(t)$, $i = \overline{1, n}$. Предполагается, что функция распределения $b_i(t)$ — непрерывная, и существуют средние значения $b_i = \mu_i^{-1}$, $i = \overline{1, n}$, где n — общее число типов потока трафика и все n поступающих потоков трафика независимы.

Процесс занятости терминалов в такой модели описывается (с некоторыми допущениями) одномерным марковским процессом состояния системы, который задается параметром k . Множество возможных состояний

$$(i_p, i_{\text{нр}}, i_b) \in S, S = \{(k): 0 \leq k \leq N_m\}. \quad (1)$$

Предположим, что пакеты, поступившие от источников пакетов в момент времени, когда все абонентские и сетевые терминалы заняты, не по-

кидают системы с неограниченным числом мест для ожидания, а становятся в очередь на ожидание. При освобождении терминалов сетей связи пакеты, находящиеся в очереди на ожидание, принимаются на обслуживание по дисциплине FIFO. Здесь скорость поступления потоков пакетов на звено зависит от текущего состояния системы — числа уже поступивших пакетов. Получившийся марковский процесс является процессом рождения и гибели. Эти условия можно сформулировать с помощью процесса размножения и гибели в следующем виде:

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_k, k = 0, 1, \dots, N_m + N_{\text{бн}}; \\ \mu_k &= \begin{cases} k\mu, & \text{при } 0 \leq k \leq N_m; \\ N_m\mu, & \text{при } N_m \leq k \leq N_m + \nu, \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

где ν — число пакетов в буферном накопителе, $0 \leq \nu \leq N_{\text{бн}}$; μ — средняя интенсивность обслуживания потоков пакетов; k — состояние системы. Для существования стационарного распределения очереди будем считать, что $\lambda_k, \mu_k > 0$, и коэффициент загрузки системы $\rho = (\lambda/\mu \cdot N_m) < 1$.

Учитывая модель СМО и постановку задачи, исследуемые характеристики терминального оборудования мультисервисных сетей связи делим условно на три большие группы показателей: сетевые $E_{\text{эс}}$, услуги связи K_{QoS} и терминальные $E_{\text{эт}}$, с помощью которых возможно математически сформулировать предложенный подход.

Математическая формулировка предложенного подхода для выбора критериев, оценивающих характеристики терминального оборудования звена мультисервисных сетей связи при передаче i -го потока пакетов неоднородного трафика, может быть представлена следующей группой показателей:

$$Q_{ik\text{ф}} = \{E_{i\text{эс}}, K_{iQoS}, E_{i\text{эт}}\}, i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где $E_{i\text{эс}}$, K_{iQoS} , $E_{i\text{эт}}$ — показатели сетевых характеристик, услуг связи и абонентских и сетевых терминалов при передаче i -го потока пакетов неоднородного трафика.

Выражения (2) и (3) описывают показатели функционирования МАиСТ мультисервисных сетей связи.

Схема функционирования исследуемой модели звена сети

На основе системно-технического анализа характеристик мультисервисных телекоммуникационных сетей связи предлагается схема функционирования исследуемой модели звена, состоящая из абонентских и сетевых терминалов, которая показана на рис. 1.

Представленная схема для реализации алгоритма "End to end" содержит следующие функциональные блочно-модульные системы: буферные

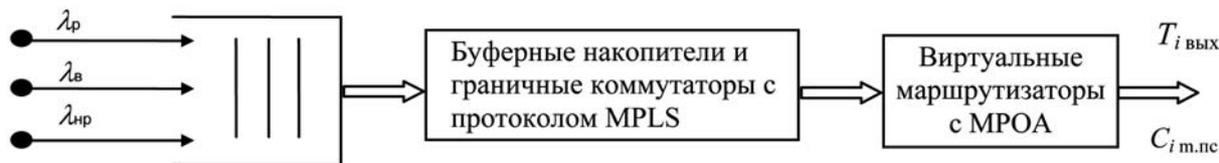


Рис. 1. Схема функционирования модели звена мультисервисных сетей связи, образованной абонентскими и сетевыми терминалами

накопители и граничные коммутаторы, виртуальные маршрутизаторы с использованием протоколов MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) и МРОА (*Multiprotocol over ATM*) для совместного обслуживания речевых и неречевых трафиков [5].

Здесь, на сетевом уровне, происходит анализ потоков пакетов, создаваемых источниками нагрузки с помощью абонентских и сетевых терминалов (модемов, граничных коммутаторов, виртуальных маршрутизаторов и др.), позволяющих определить характеристики мультисервисных сетей связи для обеспечения гарантированного QoS.

Используемые виртуальные маршрутизаторы, как статистический мультиплексор, имеющий БН конечного размера, могут выделять и обрабатывать, в первую очередь, чувствительные к задержкам пакеты речи и видео с использованием протоколов МРОА и передавать их в магистральный уровень сети [5].

Применение механизма МРОА позволяет объединить локальные сети IP с магистралями ATM, обеспечивая разнообразие интерфейсов и скоростей передачи от 64 кбит/с до 2,5 Гбит/с.

Оценка показателей терминального оборудования звена сети связи

На основе ММ с ожиданием для оценки показателей эффективности функционирования терминального оборудования мультисервисных сетей связи, определим вероятность отказа P_{Nm} в немедленном обслуживании потоков пакетов, т. е. вероятность ожидания потоков пакетов в очереди на обслуживание, значение которой может быть определено по формуле [3, 5]

$$P_{Nm}(N_{бн}, P_0) = \frac{P_0}{(N_m - 1)!(N_m - a)} a^{N_m}, \quad (4)$$

где P_0 — вероятность того, что все терминальное оборудование свободно, и с учетом обобщенных параметров потока пакетов a неоднородного трафика P_0 выражается следующим образом:

$$P_0(k, a) = \left[\sum_{k=0}^{N_m-1} \frac{a^k}{k!} + \frac{a^{N_m}}{(N_m - 1)!(N_m - a)} \right]^{-1}, \quad k = 0, \dots, N_m - 1. \quad (5)$$

Здесь одними из важных параметров СМО при требуемом их качестве функционирования явля-

ются обобщенные параметры потоков пакетов неоднородного трафика, которые можно найти таким образом:

$$a = N_m T_{св} \sum_{i=0}^n \lambda_i, \quad i = \overline{1, n},$$

или

$$a = N_m T_{св} \lambda = \rho N_m, \quad \rho = T_{св} \lambda, \quad \lambda = \sum_{i=0}^n \lambda_i \quad (6)$$

где $T_{св}$ — среднее время обслуживания трафика системой.

Одной из ключевых характеристик для оценки эффективности системы является пропускная способность МАиСТ звена сетей связи в условиях допустимой загрузки $\rho_{i,доп}$ при передаче i -го потока пакета, которая определяется следующим выражением:

$$C_{i,м.пс}(\rho_i \geq \rho_{i,доп}) = [V_{i,мр} N_{i,м}] K_{i,сж}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

где $V_{i,мр}$ — скорость работы абонентских и сетевых терминалов при передаче i -го потока пакетов; $K_{i,сж}$ — коэффициент сжатия трафика i -го потока пакетов на основе дифференциальных алгоритмов данных и алгоритмов интерполяции речевых и видеосигналов (ITU-T, G.727A, G.723.1, $K_{i,сж} \geq 4, \dots, 8$).

В мультисервисных сетях связи в реальных масштабах времени главной характеристикой гарантированного качества обслуживания неоднородного трафика является среднее время задержки передачи пакетов речевого и видеотрафиков.

На основе алгоритма "End to end" и схемы функционирования модели звена сетей связи определим среднюю задержку прохождения речевого трафика по сети связи от момента его поступления в БН звена передающего терминала входного порта $T_{j,i,вх}$ до момента прибытия его в граничный БН звена приемного терминала $T_{j,i,вых}$ выходного порта:

$$\begin{aligned} T_{i,ср.з}(\lambda_p, N_{бн} \leq N_{бн,доп}) &= \\ &= \frac{1}{K_{i,сж}} \sum_{j=1}^{N_m} [T_{j,i,вых} - T_{j,i,вх}] \leq T_{i,ср.з,доп}, \\ & \quad j = \overline{1, N_m}, \quad 1 \leq i \leq n, \end{aligned} \quad (8)$$

где N_m — число МАиСТ в звеньях сети связи, через которые проходит поток пакетов речевого трафика. Естественно, для речевого трафика по рекоменда-

циям ITU-T G.114 допустимое $T_{i,cr.з.доп} \leq 150, \dots, 300$ мс. Предельным значением задержки для IP-сети считается $T_{i,cr.з.доп} \leq 400$ мс [3].

Выражение (8) характеризует полную задержку передачи пакетов по звену сети связи и влияние показателей QoS неоднородного трафика. Кроме того, анализ выражения (8) показал, что использование ограниченного числа абонентских и сетевых терминалов N_m способствует минимизации времени $T_{i,cr.з}$ передачи i -го трафика.

На рис. 2 представлена графическая зависимость среднего времени задержки передачи потоков пакетов от числа МАиСТ при заданной скорости передачи.

Анализ графической зависимости $T_{cr.з} = F(\rho_i, N_m, V_{i,m})$ показывает, что использование минимального числа абонентских и сетевых терминалов $N_m \leq (30, \dots, 35)$, способствует минимизации среднего времени $T_{cr.з}$ передачи потоков пакетов при заданной скорости работы звена сети $V_{i,mr} \leq (64 \dots 2048)$ кбит/с и коэффициенте загрузки звена сети $\rho_i = 0,35 \dots 0,40$, отвечающей требованиям отказоустойчивости системы.

Исследования показали [3, 6], что для поддержки архитектуры IntServ и DiffServ в мультисервисных сетях связи необходимо эффективное использование терминальных и сетевых ресурсов. При нормальном функционировании звена сетей связи, когда отсутствует неограниченное возрастание оче-

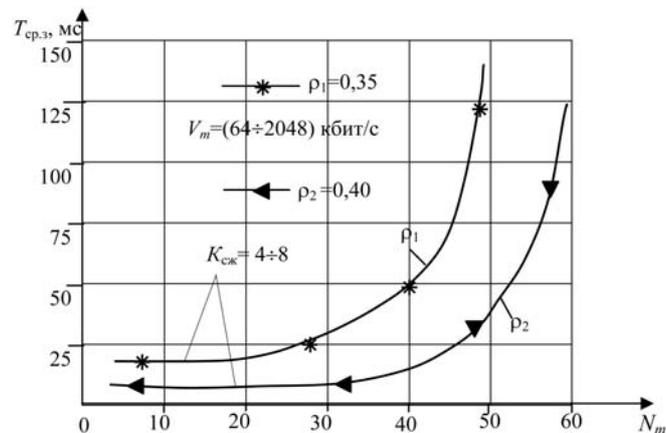


Рис. 2. График зависимости среднего времени задержки передачи пакета от числа МАиСТ при заданной скорости передачи потоков пакетов

реди, коэффициенты эффективного использования ресурсов терминального оборудования $\eta_{T,O}$ (коммутаторы, интегральные мультиплексоры, маршрутизаторы и др.) должны быть меньше единицы:

$$\eta_{T,O}(V_{i,mr}, N_m) = \sum_{i=1}^n \frac{C_{i,m.пс}}{N_m V_{i,mr}} b_i^{-1} < 1, i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Выполнение условия (9) позволяет определить резервы ресурсов терминального оборудования звена мультисервисных сетей связи:

$$R_{T,O} = 1 - \eta_{T,O}(V_{i,mr}, N_m). \quad (10)$$

Полученные соотношения дают возможность точнее оценить эффективное использование ресурсов системы обслуживания.

Заключение

Таким образом, определив основные характеристики математической модели СМО, становится возможным формирование требований к мультисервисным сетям связи и ее многофункциональным абонентским и сетевым терминалам для обеспечения гарантированного качества оказываемых услуг.

В результате исследований получены аналитические выражения, которые могут быть использованы для проектирования терминального оборудования звена мультисервисных сетей связи, позволяющие проводить интервальную оценку их характеристик эффективности процессов функционирования при оказании информационно-телекоммуникационных услуг.

Список литературы

1. Деарт В. Ю. Мультисервисные сети связи. Транспортные сети и сети доступа. М.: Инсвязиздат, 2008. 168 с.
2. Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003. 512 с.
3. Лагутин В. С., Степанов С. Н. Телетрафик мультисервисных сетей связи. М.: Радио и связь, 2000. 320 с.
4. Кучерявый Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. СПб.: Наука и Техника, 2004. 336 с.
5. Ибрагимов Б. Г., Мамедов Ш. М. Об одном методе оценки качества функционирования мультисервисных сетей связи // Телекоммуникации. 2008. № 1. С. 8–11.
6. Шахов В. Г., Коваленко О. Н. Модель распределения пропускной способности каналов мультисервисной сети между потоками с различными параметрами качества обслуживания // Информационные технологии. 2010. № 3. С. 23–26.

УДК 534.6 + 612.172.4:57.02

А. А. Кузнецов, канд. физ.-мат. наук., доц.,
Владимирский госуниверситет,
e-mail: artemi-k@mail.ru

Принципы структурно-топологического анализа диаграмм ритма сердца

Дано определение ярусной точечной диаграммы ритма сердца и обоснована необходимость ее применения. Приведены инструменты и технология анализа реальной и виртуальной ярусной диаграммы ритма сердца. Определены макропараметры и микропараметры ярусной точечной диаграммы ритма сердца. Между ними в условиях дискретной адаптации определены функциональные связи. Сформулированы принципы предложенной информационной технологии анализа диаграмм ритма сердца.

Ключевые слова: диаграмма ритма сердца, функциональное состояние организма, ярусная структура, информационная энтропия, количество информации

Постановка задачи

Физиологические исследования живых организмов принято подразделять на нормальные и патологические. Нормальная физиология изучает характерные особенности и закономерности метаболизма и онтогенеза живых организмов, устанавливая параметры и критерии гомеостаза условного здоровья. Патологическая физиология исследует возникающие отклонения от установленных норм и возможности их устранения. Причины патогенеза, определяемые переходными (донозологическими) состояниями, не являются предметом исследования физиологии организма человека. Медицина остро нуждается в собственной физике и математике, но системная "сложность" [1] объекта и запрет проведения активных экспериментов, оставляет возможности лишь для пассивных исследований. В области донозологической диагностики многочисленные исследования переходных процессов с привлечением информационных технологий и ресурсов нелинейной динамики чаще всего принимают математический уклон и проводятся безотносительно статуса объекта и четкого определения переходного режима. "Сложность" объекта исследования можно определить неодноодно-

стью времени для ритмических процессов онтогенеза, что делает проблематичным эффективное применение статистического, частотного, частотно-временного, фрактального анализа и математического моделирования [2–6]. В общем случае многомодальность параметрических распределений и отсутствие геометрической инвариантности диаграмм ритма сердца, как управляющего процесса [4–6], объясняются, прежде всего, разведенными в пространстве и времени системами контроля, регуляции и управления ритмов сердца на фоне превалирования хаотической составляющей [5–8]. Кроме этого, все реализации ритмов в форме диаграмм имеют равномерную шкалу отсчетов, но не имеют равномерной шкалы времени. Но именно это обстоятельство, трансформируя "во благо" проблемы с дискретностью измерений, создает предпосылки для эффективного структурно-топологического анализа диаграмм ритмов. Дискретная реализация регистрируемого непрерывного сигнала в графическом формате представляется точечной диаграммой с собственной характерной топологической структурой закодированной информации о процессах, протекающих не только в самом сердце и кровеносной системе, но и в различных функциональных системах организма: центральной и периферийной нервной системе, различных рецепторах и т. п. [9, 10].

Цель работы — разработка базовых принципов информационной технологии обработки и структурно-топологического анализа точечных диаграмм ритма сердца (ДРС) для определения адекватных физических и математических критериев текущего функционального состояния организма.

Ярусная структура диаграмм ритма сердца

Двадцатиминутные регистрации электрокардиограмм (ЭКГ) проводили с помощью монитора Холтера комплекса амбулаторной регистрации электрокардиосигнала "AnnA Flash 3000" [11] с использованием двухполюсных отведений: первый электрод располагали во втором межреберном положении у правого края грудины, второй электрод — в области верхушки сердца. Данные каждой ЭКГ в лицензированной программе "ES-green" [12] конвертировались в ритмограммы в форме цифровых рядов последовательности значений R — R -интервалов.

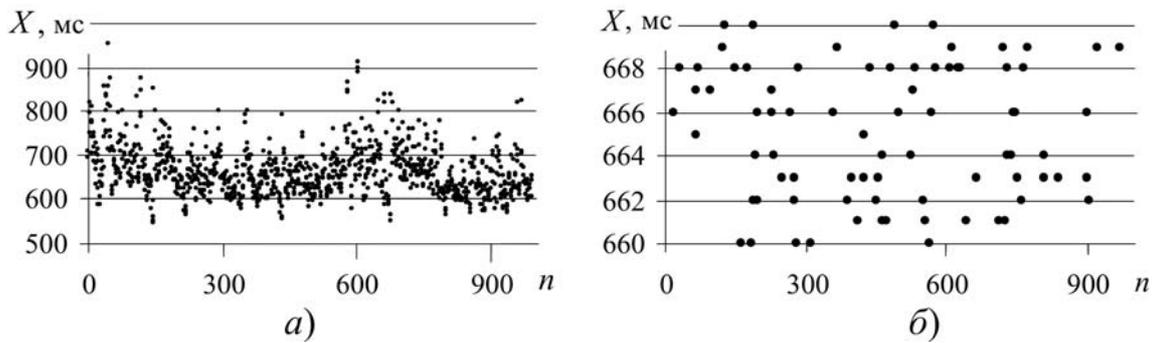


Рис. 1. ДРС условно здоровой обследуемой Е. (а) и фрагмент этой ДРС (б)

При записи ЭКГ приборные измерения придают ДРС структурно-топологические особенности: на частоте сканирования 1000 Гц (шаг дискретизации $\Delta x = 1$ мс) точечная ДРС (рис. 1, а) по вертикали приобретает ярусную структуру, визуально напоминающую "нотное письмо" (рис. 1, б) [5, 13, 14].

В пределах интервала времени регистрации и вариационного размаха ΔX ярусные значения $R-R$ -интервалов (X) на ДРС, общим числом $k_{\text{я}} = (\Delta X/\Delta x) + 1$, подразделяют на наполненные — "рабочие" ($k_{\text{я}}^*$) и не наполненные "нерабочие". Наполнение падает в направлениях от яруса, имеющего значение моды, но фазовое поле "выткано" так, что в проекции на ось отсчетов $0n$ не пропущена ни одна точка.

Ярус на ДРС — понятие по смыслу адекватное карману гистограммы. Каждый i -й ярус имеет фиксированное значение x_i и содержит n_i значений.

Общее число значений $n = \sum_{i=1}^k n_i$, где k — число

ярусов. Соседние ярусы на ДРС отделены друг от друга межъярусным промежутком шириной Δx .

Суммарное число "фазовых ячеек" на ярусах всегда сильно избыточно в сравнении с числом значений $R-R$ -интервалов, поэтому при формировании ДРС предоставляется возможность выбора. Распространение этого механизма на всю структуру ДРС привносит хаотическую составляющую внутреннего управления ритмом. Без учета сильных управляющих ритмических компонент со стороны центральной нервной системы, ритм должен приближаться к гауссовому шуму с максимальным отношением числа "рабочих" ярусов к общему их числу на ДРС.

Ярусная технология энтропийного анализа ДРС

При исследовании диаграмм ритма сердца применен термодинамический подход, определяющий анализ диаграмм ритма целиком в форме макросостояния системы ритма. Макросостояние задано совокупностью микросостояний в форме ярусов дискретных значений $R-R$ -интервалов в их по-

следовательности. Представим ярусную структуру ДРС в форме реализации макроскопического состояния системы с фиксированными значениями макропараметров. Каждому макросостоянию поставим в соответствие набор микросостояний — фазовых ярусов.

Известно [6, 15], что количество информации I_X , приобретаемое при полном выяснении состояния физической системы X , равно энтропии $H(X) = - \sum_{i=1} p_i \log_2 p_i$ этой системы. Степень неопределенности состояний системы ритма сердца может определяться как вероятностями (p_i) ее возможных состояний, так и их числом, поэтому существует возможность перехода от вероятностных категорий к макропараметрам ДРС [6]:

$$I_X = \frac{A}{n} [\ln \Gamma + B], \text{ где } \Gamma = \frac{n!}{\prod_{i=1} n_i!},$$

$$B = 0,5 \left[\ln \frac{n}{\prod_{i=1} n_i} + 1,83(k-1) \right], A = 1/\ln 2.$$

Абсолютная погрешность $\Delta I^* = AB/n$ с ростом n асимптотически стремится к нулю и при $n > 1000$ величиной B можно пренебречь с относительной погрешностью 4 % [6]. Величина Γ приобретает смысл термодинамической вероятности, определяющей число микросостояний, посредством которых реализуется макросостояние системы X . С учетом этого формула принимает окончательный расчетный вид $I_X = \frac{A}{n} \ln \Gamma$.

Для реальной ДРС действительной является лишь одна комбинация, а подавляющее число остальных (отвергнутых) остается в мнимой области. Поэтому величина $I_{\Sigma} = I_X n$ определяет количество информации, недостающее до полного описания всей ярусной диаграммы ритма. В рамках такого

толкования величина I_X , определенная с точностью до значения AB/n и обозначаемая автором далее I^* (для ДРС), определяет среднее количество информации, недостающее до полного описания единицы ритма (одного отсчета). Величина I^* показывает богатство или обедненность выбора при реализации действительного значения R — R -интервала. С одной стороны, текущим состоянием ритма непрерывно предлагается I^* ярусов при принятии среднего решения. С другой стороны, при принятии решения для каждого яруса фазы существует лишь два взаимоисключающих исхода: открытие или закрытие фазовой ячейки. Поэтому не исключается возможность использования в качестве единицы измерения количества информации 1 бит.

Для ДРС здоровых молодых людей функция $I_\Sigma(n)$ описывается линейной зависимостью вида $I_\Sigma = an - b$ уже при $n > (120...150)$ с достоверностью аппроксимации $R^2 > 0,90$ [5, 6, 14]. Достоверность аппроксимации к линейному закону тем выше, чем больше объем выборки. Скорость аккумуляции количества информации ритмом $a = dI_\Sigma/dn$ имеет смысл информационной энтропии I^* . В таком случае $I_\Sigma = I^*n$ является общим числом степеней свободы ярусной точечной ДРС: реализованных (n) и отвергнутых ($m = I_\Sigma - n = n(I^* - 1)$). Значение I_Σ зависит только от частоты считывания информации и объема n набираемой выборки.

Если одну ДРС большого объема с I_Σ и I^* разбить на две равного объема с $I_{\Sigma 1}$, I_1^* и $I_{\Sigma 2}$, I_2^* , то при слабой зависимости от n можно ожидать, что $I_\Sigma \approx I_{\Sigma 1} + I_{\Sigma 2}$, а $I^* \approx I_1^* \approx I_2^*$. Если две ДРС разных людей имеют одно и то же значение I^* , то эти ДРС как реализации ритма сердца подобны по критерию неупорядоченности распределения то-

чечных значений R — R -интервалов на координатной сетке (X, n) .

Виртуальная диаграмма ритма сердца

Максимальное число комбинаций (Γ_{\max}) микропереходов при формировании ДРС определяет стационарную хаотическую составляющую процесса ритма. Такая связь между величиной I^* и интенсивностью хаотической составляющей в ритме сердца позволяет утверждать, что при максимальном значении I_{\max}^* хаотическая составляющая в ритме сердца наиболее выражена, а распределение R — R -интервалов на ДРС приближается к нормальному распределению [6—8, 17]. Идеализация ритма сердца в сторону абсолютного превалирования хаотической составляющей приводит к понятию идеализированной ДРС. Крайней идеализацией такого режима ритма может служить "виртуальный ритм" с реализацией в форме цифрового ряда, полученного генерацией случайных чисел по нормальному закону и по заданным значениям объема выборки n стандартного отклонения σ и шага дискретизации Δx реальной ДРС здорового молодого организма [6, 13]. При заданном шаге дискретизации количество информации является функцией объема выборки и стандартного отклонения. В семействе линейных функций $I_{\Sigma}(n, \sigma)$ (рис. 2) тангенс угла наклона $I_\Gamma^* = dI_{\Sigma}/dn$ определяется индивидуальным значением стандартного отклонения. Информационная энтропия I_Γ^* виртуальной диаграммы ритма сердца (ВДРС) I^* по значению всегда превышает значение I^* соответствующей ДРС с одномодальным распределением [6, 13, 18].

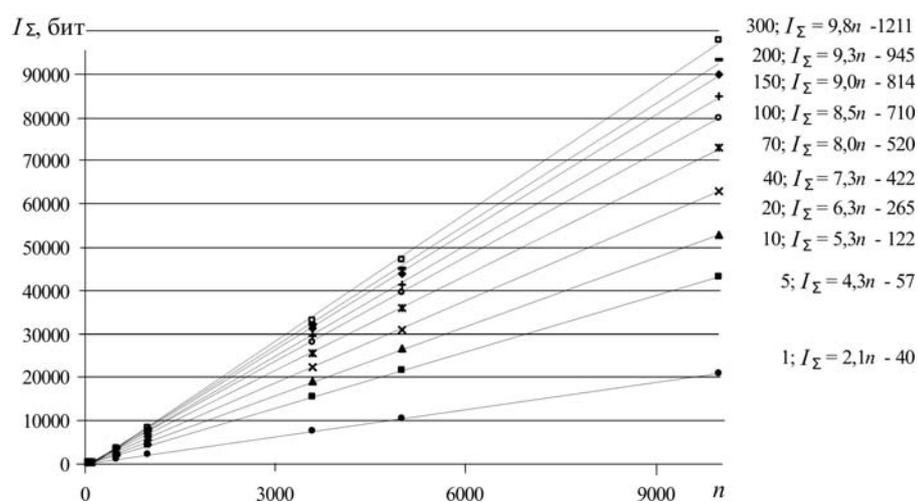


Рис. 2. Графики $I_\Sigma(n, \sigma)$ для ВДРС. Приведены значения σ и уравнения линий тренда ($R^2 = 1$)

Сравним функциональные зависимости энтропии в форме математического ожидания $H(X) = \log_2[(2\pi e)^{1/2}\sigma/\Delta x]$ для непрерывного бесконечного множества случайных чисел, распределенных по нормальному закону, и информационной энтропии $I_\Gamma^*(n, \sigma)$ для нескольких конечных выборочных цифровых рядов, полученных процедурой генерации случайных чисел по нормальному закону. Результаты расчета приведены в форме графиков на рис. 3 для объемов выборок n от 50 до ∞ . Значение информационной энтропии I_Γ^* ВДРС при $n \rightarrow \infty$ монотонно приближается к значению эн-

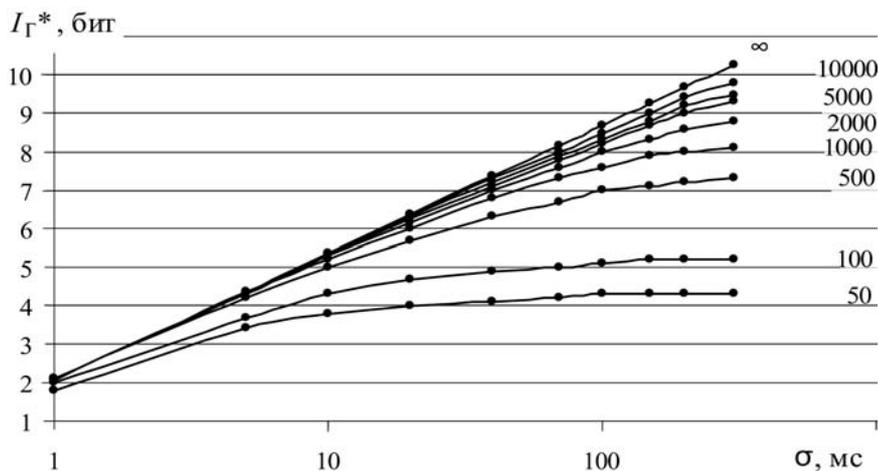


Рис. 3. Графики зависимости $I_G^*(\sigma, n)$

тропии $H(X)$ [6, 15] (рис. 3). При заданном значении σ и росте n расчетное значение I^* может сколь угодно близко приближаться "снизу" к соответствующему значению $H(X)$, никогда его не достигая.

Результаты расчета по этим двум величинам расходятся тем больше, чем меньше значение n . Например, при $n = 1000$ отсчетов расхождение достигает 10 % при реальном значении $\sigma = 70$ мс. Такое расхождение объясняется тем, что связующим звеном между двумя формами записи энтропии является формула Стирлинга для случая $n \rightarrow \infty$ [6]. По этой же причине шаг дискретизации Δx , определенный приборной частотой, не равен выборочному среднему расстоянию между ярусами, т. е. среднему значению межъярусного промежутка $\langle \Delta_{\text{яп}} \rangle$. С ростом n число межъярусных промежутков ($N_{\text{мяп}} = k_{\text{я}} - 1$) на ВДРС монотонно растет, а значение $\langle \Delta_{\text{яп}} \rangle \rightarrow \Delta x$ при $n \rightarrow \infty$ (рис. 4). В таком случае приближение $\langle \Delta_{\text{яп}} \rangle \rightarrow \Delta x$ для реальных ДРС следует считать показателем роста представительности хаотической составляющей в

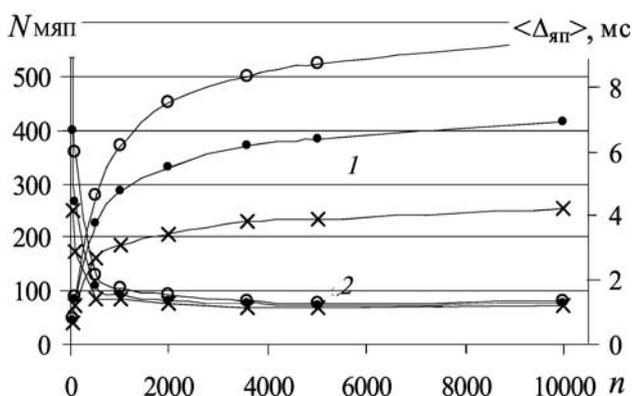


Рис. 4. Графики $N_{\text{мяп}}(n)$ (1) и $\langle \Delta_{\text{яп}} \rangle(n)$ (2) виртуальных диаграмм ритма сердца при заданных $\sigma = 40$ мс (x), $\sigma = 70$ мс (o) и $\sigma = 100$ мс (o)

ритме сердца, а степень расхождения величин $\langle \Delta_{\text{яп}} \rangle$ и Δx становится дополнительным результирующим показателем уровня превалирования внешних влияний регуляции и управления.

Формулы структурно-топологического анализа ДРС

Индивидуальные особенности ритма сердца найти несложно как при коротких, так и при длинных записях. Сложно найти общие закономерности ритма сердца одного человека, разные последовательные интервалы времени. Еще сложнее найти общие закономерности динамики ритма сердца разных здоровых людей.

Если формуле $H(X) \approx \log_2(4,13\sigma/\Delta x)$ поставить в адекватное соответствие форму записи $I_G^* \approx \log_2(4,13\sigma/\langle \Delta_{\text{яп}} \rangle)$, то при $n \rightarrow \infty$ они совпадут. При этом можно оценить, что $4,13\sigma/\langle \Delta_{\text{яп}} \rangle \approx 3\sigma/\Delta x$ (рис. 4) и формула $I_G^* \approx \log_2(4,13\sigma/\langle \Delta_{\text{яп}} \rangle)$ описывает предельный режим ритма, информационная энтропия ДРС которого определена формулой $I_{\text{max}}^* = \log_2(3\sigma/\Delta x)$ [14]. Очевидно, что всегда выполняется тройное неравенство: $H(X) > I_G^* \geq I_{\text{max}}^* \geq I^*$. Верхняя "математическая граница", с одной стороны, является идеализацией, а с другой стороны, — эталоном для ритма сердца как маркер "правой границы нормы".

Если энтропии в форме математического ожидания цифрового ряда случайных величин, распределенных по нормальному закону $H(X) \approx \log_2(4,13\sigma/\Delta x)$, принять шаг дискретизации исходной непрерывной функции $\Delta x = 1$ мс, то $H(X) \approx \log_2(4,13\sigma)$, где σ измеряется в миллисекундах. При $\Delta x = 2$ мс, получим $H(X) \approx \log_2(4,13\sigma) - 1$, при $\Delta x = 4$ мс, $H(X) \approx \log_2(4,13\sigma) - 2$ и т. д. Точка на графике $H(\sigma, \Delta x)$ сдвигается влево на 1 бит при изменении значения Δx кратно двум. Если $\Delta x = 0,5$ мс, точка на указанном графике (см. рис. 3) сместится на 1 бит вправо. При фиксированном значении σ график $H(\Delta x)$ будет линейным в полулогарифмическом масштабе. Следуя той же логике для реальных ДРС, и с учетом экспериментальных данных $I^* \approx \log_2[(3\sigma)/(2^i \Delta x)]$, где $i = 0, 1, 2, \dots, 6$ [5]. При сопоставлении теоретической и экспериментальной форм записи энтропии $H(X)$ и I^* значение σ оказывается одинаковым, поэтому переменными параметрами могут быть Δx и i . Приведенные выше формулы связывают параметры ярусной макро-

Групповые и серийные параметры энтропии для ДРС и вДРС

Обследуемые	$N_{\text{рег}}$	i , бит	I^* , бит	I_{max}^* , бит	I_{Γ}^* , бит	$H(X)$, бит
Группа 32_2008	32	0,4±0,16	7,3±0,2	—	7,4±0,1	8,2±0,1
Группа 31_2009	71	0,2±0,11	7,2±0,2	—	7,3±0,1	7,95±0,2
Серия Д_2009	26	0,1±0,04	—	7,0±0,1	7,1±0,1	7,55±0,1
Серия Ю_2009	52	1,8±0,03	5,6±0,1	—	7,2±0,1	7,95±0,1

структуры ДРС I_{Σ} , σ с параметрами ее микро-структуры I^* , $\langle \Delta_{\text{ЯП}} \rangle$ и i .

Резонно предположить, что и остальные параметры энтропии, составляющие указанное выше тройное неравенство, так же могут зависеть от величины Δx . Для приборной реализации предложенных принципов структурно-топологического анализа ДРС, определяющих технику измерений величины I^* , можно убедиться в устойчивости неравенства $H(X) > I_{\Gamma}^* \geq I_{\text{max}}^* \geq I^*$ при изменении частоты сканирования прибора.

В заданном интервале времени записи ЭКГ при изменении приборной частоты сканирования (например, при использовании иного регистратора) пропорционально меняется размер цифрового ряда ЭКГ. При использовании частоты сканирования 500, 1000 Гц и выше размер цифрового ряда ритмограммы и значение стандартного отклонения практически не меняются. Шаг дискретизации падает пропорционально росту частоты, а число ярусов и межъярусных промежутков пропорционально возрастает. Но для вДРС сохраняется приближение $\langle \Delta_{\text{ЯП}} \rangle \rightarrow \Delta x$ при $n \rightarrow \infty$. Следовательно, соответствующее значение I_{Γ}^* будет при этом меняться так же как и значения величин $H(X)$ и I^* . Величина I_{max}^* принимает всегда промежуточное значение, так как характеризует ритм сердца при условии адаптации к условиям регистрации, поэтому для величины I_{max}^* значение параметра i всегда приближается к нулю.

В таблице приведены экспериментальные и расчетные данные структурно-топологического анализа ДРС, полученные при двадцатиминутных записях ЭКГ при фиксированном значении $\Delta x = 1$ мс, для двух групп молодых условно здоровых людей (в возрасте 18—22 года) и двух серий посуточных регистраций девушки (Д) и юноши (Ю) в возрасте 22 года. Регистрации ЭКГ в группах проведены в положении сидя в лабораторных условиях и в интервале времени март — апрель 2008 и 2009 годов. Количество регистраций ($N_{\text{рег}}$) в группах было либо единичное, либо повторное через неделю. Серийные регистрации проведены в положении лежа в домашних условиях: серия Д — в интервале времени апрель — май 2009 г, серия Ю — в интервале времени июнь — август 2009 г.

Экспериментальный результат серии Д определен как I_{max}^* , так как он наилучшим образом соответствует требованиям этого параметра: относительный физический покой в положении лежа с интервалом адаптации к регистрации и $i \approx 0$. Остальные результаты не соответствуют либо первому, либо второму требованию.

Переходные процессы естественной смены качества режима ритма сердца происходят в интервале от двух до шести месяцев и "включаются" внешними процессами влияния. В этом смысле для фиксации указанных изменений требуется параметр, не зависящий от длины записи ЭКГ, а именно, относительная информационная энтропия I^*/I_{Γ}^* . Разница или отношение между I_{Γ}^* и I^* показывают отклонение ритма сердца от нормального закона распределения или степень хаотичности ритма. Например, $I^*/I_{\Gamma}^* = 0,8$ означает наличие в ритме 20 % детерминистской составляющей, или условную 20-процентную регуляцию ритма.

Принципы структурно-топологического анализа ДРС

1. Приборные измерения придают ДРС структурно-топологические особенности ярусной структуры, что позволяет трактовать ее как реализацию макросостояния ритма и применить к ней структурно-топологический анализ неупорядоченности распределения значений $R-R$ -интервалов по микросостояниям с использованием параметров количества информации I_{Σ} и информационной энтропии I^* .

2. При адаптации организма к внешним условиям значение I^* ДРС растет и приближается к максимально возможному значению для заданных условий, характеризуемых параметром дискретной адаптации i , выполняющим функцию избытка продукции энтропии. При $i \rightarrow 0$ величина I^* растет, приближаясь к I_{max}^* , характеризующей ДРС при состоянии относительного физического и эмоционального покоя человека.

3. Распределение точечных значений $R-R$ -интервалов на ДРС при указанном выше приближении стремится к нормальному распределению с шириной 3σ . Идеализация приближения приводит к идеализации объекта исследования к форме

виртуальной ДРС с нормальным распределением, неупорядоченность топологической структуры которой определена величиной I_{Γ}^* .

4. Величина I_{Γ}^* всегда определена при $i = 0$, характеризует ДРС при состоянии абсолютного физического и эмоционального покоя, т. е. в ДРС "неуправляемого сердца" и может служить количественной оценкой физиологической нормы ритма сердца по признаку максимальной неупорядоченности ярусной структуры диаграммы ритма конечного размера.

5. При $n \rightarrow \infty$ функция $I_{\Gamma}^*(n, \sigma)$ монотонно растет и приближается к функции $H(X) = \log_2[(2\pi e)^{1/2} \sigma / \Delta x]$ энтропии, заданной в форме математического ожидания непрерывного бесконечного множества случайных чисел, распределенных по нормальному закону.

6. При сравнительном анализе реальной ДРС и соответствующей ей виртуальной ДРС выполняется тройное неравенство: $H(X) > I_{\Gamma}^* \geq I_{\max}^* \geq I^*$. Верхняя "математическая граница" является параметрической оценкой "эталонного ритма сердца", а значения $H(X)$ — маркером "правой границы нормы ритма сердца".

7. Между макропараметрами I_{Σ} , σ ярусной ДРС с параметрами ее микроструктуры I^* , $\langle \Delta_{\text{ЯП}} \rangle$ и i в условиях дискретной адаптации существуют функциональные связи, устойчивые к изменению длины записи ЭКГ.

Заключение

Ярусная технология энтропийного анализа, основанная на принципах структурно-топологического исследования точечных ярусных диаграмм реализаций процессов, может быть применена к сигналам любой природы и является модифицированной информационной технологией анализа кодированных диаграмм сигналов по признаку информативности. Отличие от известной технологии заключается в использовании новой формы исходного объекта — точечной ярусной диаграммы реализации процесса. Карман гистограммы имеет минимально возможный размер, задаваемый максимальной приборной частотой сканирования, что приводит к использованию вместо карманов

ярусов, а вместо вероятностных категорий числовых оценок количества информации и информационной энтропии.

Информационный анализ степени хаотичности процессов по признаку неупорядоченности диаграмм допускает сравнение цифровых рядов реализаций сигналов при выполнении лишь одного условия: при одинаковом количестве значащих цифр значений параметров, шаг дискретизации цифровых параметрических рядов также должен быть одинаковым.

Список литературы

1. **Николис Г., Пригожин И.** Познание сложного. Введение: пер. с англ. — М.: Мир, 1990. 334 с.
2. **Холоднюк М., Клич А., Кубичек М., Марек М.** Методы анализа нелинейных математических моделей: пер. с чешск. — М.: Мир, 1991. 368 с.
3. **Федер Е.** Фракталы: пер. с англ. — М.: Мир, 1991. 254 с.
4. **Пределы предсказуемости** / Под ред. Ю. А. Кравцова. М.: ЦентрКом, 1997. 256 с.
5. **Кузнецов А. А.** Методы анализа и обработки электрокардиографических сигналов: Новые подходы к выделению информации. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2008. 140 с.
6. **Кузнецов А. А.** Энтропия ритма сердца: монография. — Владимир: Изд-во ВлГУ, 2009. 172 с.
7. **Pool R.** Is it healthy to be chaotic? // Science. 1989. V. 243. P. 604.
8. **Babloyantz A., Destexhe A.** Is the normal heart a periodic oscillator // Biol. Cybern. 1988. V. 58. P. 203.
9. **Баевский Р. М., Берсенева А. П.** Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. М.: Медицина, 1997. 235 с.
10. **Биологические ритмы.** В 2-х томах. Т. 1 / Пер. с англ. под ред. Ю. Ашоффа. М.: Мир, 1984. 414 с.
11. **Прилуцкий Д. А., Кузнецов А. А., Плеханов А. А.** Накопитель ЭКГ "AnnAFlash2000" // Методы и средства измерений физических величин. — Н. Новгород: НГТУ, 2006. С. 31.
12. **Medical Computer Systems, Zelenograd, Moscow:** URL: <http://www.mks.ru>
13. **Кузнецов А. А.** Структурно-топологические особенности диаграмм ритма сердца // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7, № 3. С. 80—85.
14. **Кузнецов А. А.** Структурно-топологический анализ диаграмм электрокардиосигналов // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 1. С. 27—43.
15. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей: учеб. для вузов. — М.: Высш. шк., 1999. 576 с.
16. **Кузнецов А. А.** Количество информации как критерий упорядоченности ярусной структуры R — R -интервалограммы // Вестник новых медицинских технологий. 2009. Т. XVI, № 1. С. 10—12.
17. **Эйдукайтис А., Варонекас Г., Жемайтис Д.** Применение теории хаоса для анализа сердечного ритма в различных стадиях сна у здоровых лиц // Физиология человека. 2004. Т. 30, № 5. С. 56—61.
18. **Кузнецов А. А.** Сравнительный анализ упорядоченности реальной и виртуальной структуры R — R -интервалограммы // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 9. С. 1—4.

Е. А. Сирота, канд. физ.-мат. наук, ассистент,
Воронежский государственный университет,
e-mail: atoris@list.ru

Информационная система управления производством гемокомпонентов "Службы крови"

Приведены результаты разработки программного комплекса, обеспечивающего сбор, хранение, обработку информации о потребностях лечебной сети и оптимизацию объемов заготовки цельной крови и компонентов крови Государственным учреждением здравоохранения областной станции переливания крови ("Службой крови"). Описана математическая модель процесса управления запасами крови региональной "Службой крови" в интересах трансфузионного обеспечения лечебных профилактических учреждений, которая использовалась при разработке программного комплекса.

Ключевые слова: программный комплекс, математическая модель, процесс управления запасами крови

Введение

Современные методы теории управления производственными процессами не нашли должного применения в столь актуальной отрасли здравоохранения, как производственная и клиническая трансфузиология, объединенные общим названием "Служба крови". Государственная целевая программа по реформированию "Службы крови" [1] предполагает исследование и внедрение в практическую медицину программ по оптимизации процессов управления на всех этапах выполняемых работ (от заготовки донорской крови, переработки ее на компоненты и препараты, проведения специальной программы "карантинизация плазмы" и до обеспечения трансфузионного пособия пациентам больницы) особенно актуальными.

В этой области в нашей стране существуют следующие проблемы:

- стихийность в процессе управления региональными "Службами крови";
- отсутствие средств прогнозирования объемов цельной крови, необходимых для своевременного обеспечения лечебных профилактических учреждений (ЛПУ);
- потеря запасов крови и потребность в оптимизации процесса ее возобновления.

Одним из возможных путей решения указанных проблем является создание и исследование информационных систем и новых технологий, обеспе-

чивающих оптимизацию объемов заготовки цельной крови и плазмы, необходимой для своевременного обеспечения больниц на заданный период.

Известен ряд зарубежных разработок в этой сфере. Например, в работе [2] представлена статистическая модель предсказания прихода донора с учетом его предыдущих посещений и донорского анамнеза. В 2001 г. "Служба крови" Великобритании создала схему управления запасами крови (BSMS) в целях улучшения понимания динамики запасов компонентов крови в центрах крови и госпиталях. Информация вводится через сайт BSMS [3] и используется в режиме реального времени всеми участниками программы. Внедрение централизованной схемы управления запасами позволяет сократить списание компонентов крови с 2,1 до 0,45 %, в том числе вследствие истечения срока хранения — с 1,6 до 0,21 %.

Дальнейшее развитие подобных систем может осуществляться путем реализации принципов оптимального управления в сочетании с методами системного анализа и прогнозирования динамики потребления гемокомпонентов лечебными профилактическими учреждениями.

Таким образом, целью работы является разработка:

- математической модели процесса управления запасами крови региональной "Службой крови" в интересах трансфузионного обеспечения ЛПУ;
- алгоритмов оптимизации процесса возобновления запасов крови с использованием метода динамического программирования [4];
- программного комплекса, обеспечивающего сбор, хранение, обработку информации о потребностях лечебной сети и оптимизацию объемов заготовки цельной крови и плазмы, необходимой для своевременного обеспечения больниц на заданный период.

Теоретический анализ

Управление запасами крови предполагает обеспечение ЛПУ следующими компонентами крови: плазмой, эритро массой и тромбоконцентратом. Математическая модель процесса управления запасами крови, описываемая в этом разделе, подробно представлена для такого компонента крови, как эритро масса. Для компонента крови плазма может быть использована аналогичная модель.

Обозначим $x_k^{(1)}$ — остаток эритро массы, хранящийся на станции переливания крови в k -й день.

Пусть $x_k^{(2)}$ — приход эритро­массы в k -й день. Объем выданной в ЛПУ эритро­массы в k -й день составит $x_k^{(3)}$, а средний объем выданной эритро­массы лечеб­ным учреждениям составит величину $x_k^{(4)}$, для которой известен сезонный тренд.

Управление u_k формирует объем эритро­массы, который необходимо заготовить на следующий день, таким образом, определяет значение $x_{k+1}^{(2)}$. При поступлении цельной крови на станцию переливания и при ее поставке лечеб­ным профилак­тическим учреждениям имеются случайные воз­мущения $\xi_k^{(1)}$, $\xi_k^{(2)}$, обусловленные человеческим фактором, потерями при заготовке цельной кро­ви, ее хранении, колебаниями спроса и т. д.:

$$M[\xi_k^{(i)}] = 0, M[\xi_k^{(i)} \xi_k^{(i)\top}] = Q_k^{(i)}, i = 1, 2,$$

где M — символ математического ожидания.

Рассматриваемые статистические характери­стики определяются из конкретных наблюдений.

Динамика изменения продукта и состояния системы в целом определяются уравнениями вида

$$\begin{aligned} x_{k+1}^{(1)} &= x_k^{(1)} + x_k^{(2)} - x_k^{(3)}; x_0 \in X; \\ x_{k+1}^{(2)} &= u_k + \xi_k^{(1)}; \\ x_{k+1}^{(3)} &= a_k x_k^{(3)} + (1 - a_k) x_k^{(4)} + \xi_k^{(2)}; \\ x_{k+1}^{(4)} &= x_k^{(4)}, \end{aligned}$$

где X — множество возможных начальных значе­ний x_0 ; a_k — известный коэффициент, определяю­щий степень корреляции объемов выданного гемо­компонента лечеб­ным учреждениям в соседние дни. В дальнейшем считаем коэффициент a_k по­стоянным ($a_k = a = \text{const}$).

Оптимальное управление состоит в поддержании уровня запасов гемокомпонентов вблизи некото­рого среднего оптимального для работы станции уровня x_0 с минимизацией затрат на управление, т. е. на возобновление недостающей части гемо­компонентов. Такое качество управления описы­вается функционалом вида

$$\bar{J} = M \left[\sum_{k=0}^{N-1} ((x_k^{(1)} - x_0) \alpha_1 + u_k^2 \alpha_2) \right],$$

где $\alpha_1 > 0$, $\alpha_2 > 0$ — скалярные величины; \bar{J} — среднее значение качества; N — общее число вы­полняемых шагов по времени.

Введем обозначения

$$F_k = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_k & 1 - a_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; G_k = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; C_k = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$x_k = (x_k^{(1)}, x_k^{(2)}, x_k^{(3)}, x_k^{(4)})^\top; \xi_k = (\xi_k^{(1)}, \xi_k^{(2)})^\top;$$

$$N_1 = 0; N_2 = \begin{pmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; N_3 = \alpha_2, k = 1, \dots, N.$$

Введем величину относительного изменения продукта $x_k^{(1)*} = x_k^{(1)} - x_0$. С учетом этих обозна­чений имеем следующую совокупность уравнений:

$$x_{k+1} = F_k x_k + G_k u_k + C_k \xi_k; x_0 \in X;$$

$$\bar{J} = M[x_N^\top N_1 x_N + \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^\top N_2 x_k + u_k^\top N_3 u_k)].$$

Таким образом, рассмотренная задача представ­лена линейно-квадратичной задачей управления в дискретном времени. В работе [4] было показано, что для решения подобной задачи в общем виде применим метод динамического программирова­ния, основанный на принципе оптимальности Беллмана. При этом управление в рассматриваемой детерминированной системе определяется соот­ношениями

$$u_{N-1} = -L_{N-1} x_{N-1},$$

где

$$L_{N-1} = (G_{N-1}^\top S(N) G_{N-1} + N_3)^{-1} G_{N-1}^\top S(N) F_{N-1};$$

$$\begin{aligned} S(N-1) &= F_{N-1}^\top S(N) F_{N-1} - F_{N-1}^\top S(N) G_{N-1} \times \\ &\times (G_{N-1}^\top S(N) G_{N-1} + N_3)^{-1} G_{N-1}^\top S(N) F_{N-1} + N_2; \end{aligned}$$

$$V_{N-1} = x_{N-1}^\top S(N-1) x_{N-1},$$

где V_{N-1} — функция Беллмана; S — матрица раз­мерности 4×4 ; изначально полагают $S(N) = N_1$. Новое значение матрицы $S(N-1)$ получается из ранее определенной матрицы $S(N)$, а управление u_{N-1} — как линейная вектор-функция на основе оператора L_{N-1} . На каждом шаге получают ана­логичные по форме уравнения с той разницей, что их аргументы отличаются на единицу, т. е. для $k = N-2, N-3$ и т. д. Проводя подобным образом

обратный проход до конца, получаем значение V_0 , равное искомому минимуму функционала. Закон управления является линейным относительно состояния объекта и нестационарным.

Представленные выше соотношения описывают оптимальное управление объемами заготовки гемокомпонентов эритромаcсы и плазмы. В общем случае для анализа заготовки цельной крови используют следующую расчетную формулу:

$$V_1 = 1,94V_0,$$

где V_1 — объем заготовки цельной крови; V_0 — объем заготовки плазмы.

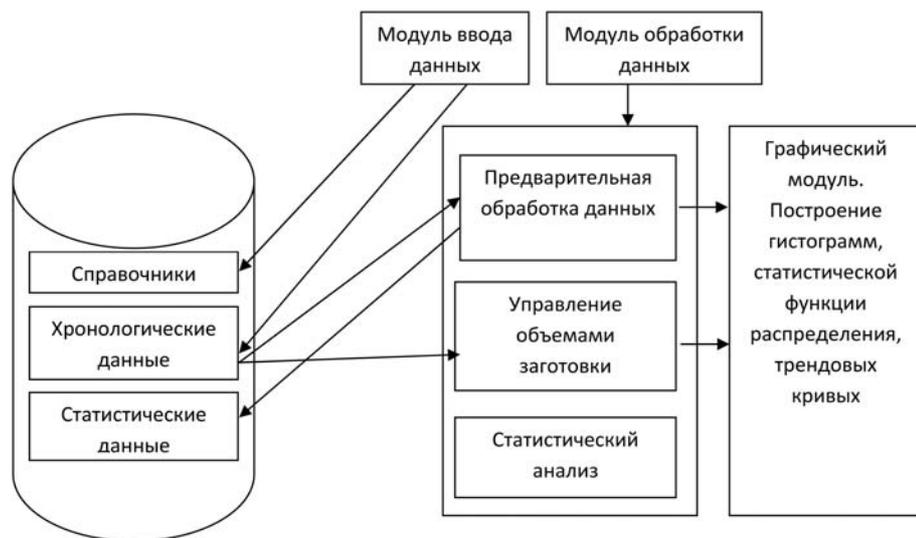


Рис. 1. Структурная схема программного комплекса

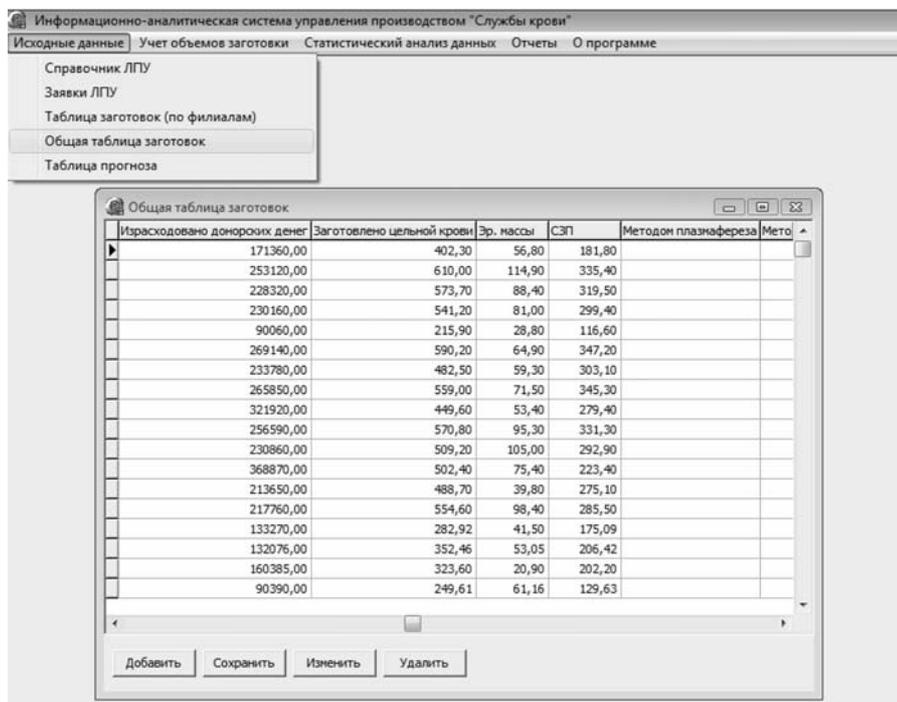


Рис. 2. Главное окно информационной системы

Экспериментальная часть

Описанная математическая модель использовалась при разработке информационной системы, практическая апробация которой осуществлялась на базе Государственного учреждения здравоохранения Воронежская областная станция переливания крови (ГУЗ ВОСПК) с перспективой дальнейшего внедрения в другие региональные "Службы крови" РФ.

Проект представляет собой приложение, построенное по технологии клиент—сервер. Сервером является сервер баз данных Firebird. Клиентская часть разработана на языке Delphi. Приложение позволяет осуществлять многопользовательский доступ к данным по сети, также возможно использование в качестве локального приложения. Данные программного комплекса условно можно разделить на две части: справочники и статистика оборота запасов крови. Таким образом, сама программа осуществляет манипуляции со справочниками, а также учет и оптимизацию объемов заготовки цельной крови и плазмы, необходимых для своевременного обеспечения больниц на заданный период.

Структурная схема программного комплекса представлена на рис. 1.

Основными пунктами меню программы являются: "Исходные данные" ("Справочник ЛПУ", "Заявки ЛПУ", "Таблица заготовок по филиалам", "Общая таблица заготовок"), "Учет объемов заготовки" ("Эритромаcсы", "Плазмы", "Цельной крови"), "Статистический анализ данных", "Отчеты". Главное окно с основными пунктами меню представлено на рис. 2.

Данные по заготовке и выдаче запасов крови вводятся в программу отдельно по каждому филиалу за каждую неделю. Далее происходит предварительная обработка этих данных, в результате которой информация упорядочивается по временной шкале и суммируется по всему

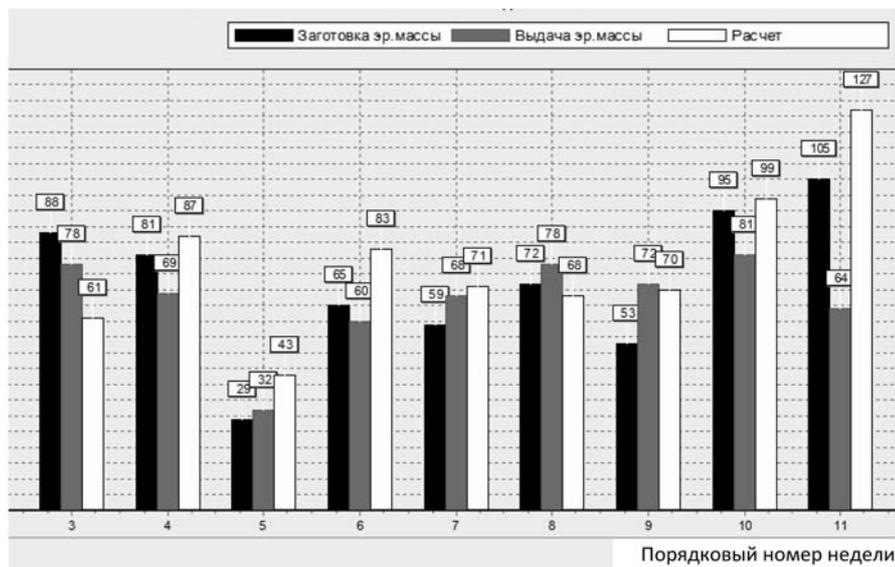


Рис. 3. Сравнительная характеристика показателей рассчитываемой и реальной заготовки эритроцитарной массы по отношению к выданной в ЛПУ

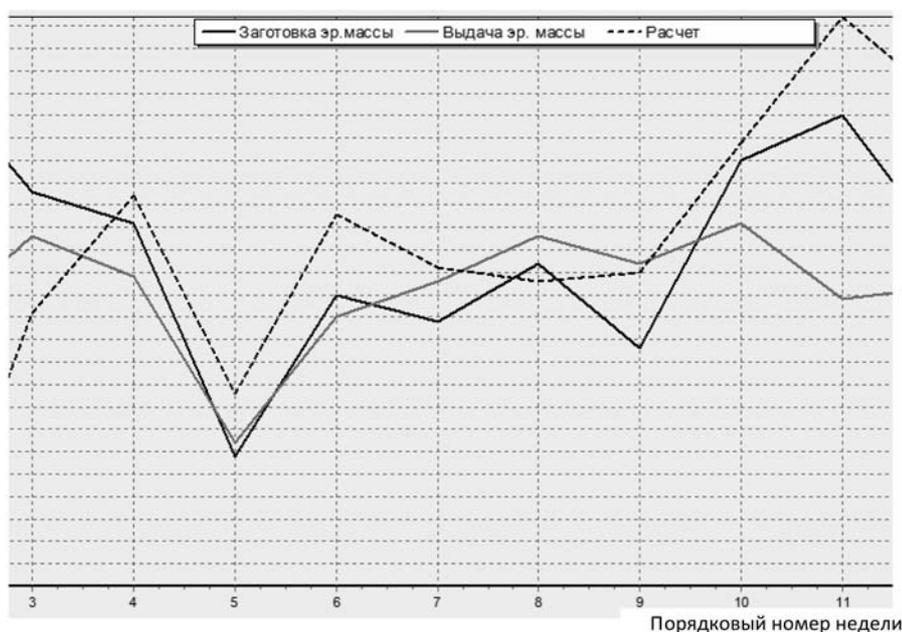


Рис. 4. Кривые рассчитываемых объемов заготовки, реальной заготовки, выдачи эритроцитарной массы

объединению. На основе обработанных данных рассчитываются объемы заготовки цельной крови или компонентов крови на заданный период. В модуле статистического анализа данных проводится сравнение рассчитываемой и реальной заготовки компонентов крови по отношению к выдаче в ЛПУ. Полученные результаты визуализиру-

ются с помощью графического модуля. На рис. 3 представлен пример визуализации — данные по выдаче и заготовке эритроцитарной массы за 14 недель и результаты расчета с начала сентября до конца 2009 г.

Кривые заготовки, выдачи гемокомпонентов, кривая рассчитываемых объемов заготовки визуализируются с помощью графического модуля. Пример визуализации представлен на рис. 4.

Заключение

Изучение всех этапов производства гемокомпонентов, создание математической модели процесса управления на каждом этапе и сведения полученных данных в единую систему алгоритмов позволяют от традиционного стихийно-ситуативного управления перейти к адекватной, математически выверенной модели управления. Практическая значимость от внедрения данной информационно-аналитической системы определяется возможностью оснащения персонала "Службы крови" эффективным средством управления производством, обеспечивающим оптимизацию всех его этапов, что в конечном счете послужит своевременному и бесперебойному лечению больного.

Список литературы

1. Государственная целевая программа по реформированию "Службы крови". URL: <http://www.yadonor.ru/ru/service/program/index.php>
2. Misje H., Bosnes V. & Heier H. E. Recruiting and retaining young people as voluntary blood donors // The International Journal of Transfusion Medicine Vox Sanguinis. 2008. V. 94. № 2. P. 119—124.
3. www.bloodstocks.co.uk
4. Остром К. Системы управления с ЭВМ. М.: Мир, 1987. 480 с.

ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

№ 9
СЕНТЯБРЬ
2011

Главный редактор:

ГАЛУШКИН А. И.

Редакционная коллегия:

АВЕДЬЯН Э. Д.
БАЗИЯН Б. Х.
БЕНЕВОЛЕНСКИЙ С. Б.
БОРИСОВ В. В.
ГОРБАЧЕНКО В. И.
ЖДАНОВ А. А.
ЗЕФИРОВ Н. С.
ЗОЗУЛЯ Ю. И.
КРИЖИЖАНОВСКИЙ Б. В.
КУДРЯВЦЕВ В. Б.
КУЛИК С. Д.
КУРАВСКИЙ Л. С.
РЕДЬКО В. Г.
РУДИНСКИЙ А. В.
СИМОРОВ С. Н.
ФЕДУЛОВ А. С.
ЧЕРВЯКОВ Н. И.

Иностранные члены редколлегии:

БОЯНОВ К.
ВЕЛИЧКОВСКИЙ Б. М.
ГРАБАРЧУК В.
РУТКОВСКИЙ Л.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЛЫСЕНКО А. В.
ЧУГУНОВА А. В.

Галушкин А. И.

Нейросетевые технологии в решении задач нейрореставрологии 55

Осипов В. Ю.

Устойчивость рекуррентных нейронных сетей с управляемыми синапсами 69

Каширина И. Л., Львович Я. Е., Тузиков А. А.

Нейросетевое резервирование дублированных измерений параметров при наземных огневых испытаниях жидкостных ракетных двигателей 74

А. И. Галушкин, д-р техн. наук, проф.,
 Центр информационных технологий
 и систем органов исполнительной власти
 Минобрнауки России,
 e-mail: neurocomputer@yandex.ru

Нейросетевые технологии в решении задач нейрореставрологии

Рассмотрено применение нейросетевых технологий в новом разделе современной медицины — нейрореставрологии, посвященном различным аспектам восстановления нарушенных функций нервной системы и ее разделов.

Ключевые слова: нейронные сети, нейроматематика, нейроуправление, нейрокомпьютеры, нейрочипы, диагностика, интерфейс "мозг—компьютер", зрительный и слуховой имплантаты, протезы

Введение

Автор — инженер и написал эту работу, исходя из своего понимания следующего определения: "Нейрореставрология — раздел медицинской науки, связанный с восстановлением нарушенных функций нервной системы, включая головной и спинной мозг". Наблюдая за развитием нейрореставрологии, автор отметил все более активное применение в этом разделе восстановительной медицины нейросетевых технологий. Именно поэтому первый раздел данной работы посвящен достаточно популярному представлению нейросетевых технологий в части следующих разделов:

- **общая теория нейронных сетей** как логической структуры, принципиально отличной от логической структуры алгоритмов и вычислительных систем так называемой фон-неймановской архитектуры, на базе которой построены все персональные ЭВМ и значительное число современных суперЭВМ;
- **нейрокомпьютеры** — вычислительные системы, оптимизированные к нейросетевым алгоритмам решения задач в части программного и аппаратного обеспечения;
- **нейроматематика** — новый раздел вычислительной математики, связанный с разработкой нейросетевых алгоритмов решения сложных математических, слабоформализуемых и неформализуемых задач;
- **нейроуправление** — новый раздел теории управления, связанный с управлением с помощью

нейрокомпьютеров сложными нелинейными и многомерными динамическими системами.

Необходимо отметить разработки измерительных систем, адекватных задачам нейрореставрологии, и алгоритмам, в основном нейросетевым, решения задач диагностики функций нервной системы и ее разделов. Это диагностика по электроэнцефалограмме без стимуляции и со стимуляцией органов чувств, нарушений мозговой деятельности, в частности, диагностика эпилепсии, болезней Паркинсона и Альцгеймера, активные системы лечения эпилепсии. Тесно связанной с рассматриваемой тематикой проблема реализации интерфейса "мозг—компьютер".

В данной работе представлена проблема применения нейросетевых технологий в задаче построения имплантатов-восстановителей функций нервной системы и ее разделов, в частности:

- зрительного имплантата;
- слухового имплантата;
- бионических протезов.

Отмечается широкое применение нейросетевых технологий, в частности нейросистем, на базе современных вычислительных средств как технологических средств решения задач нейрореставрологии, в том числе для описания **моделей** таких разделов нервной системы как:

- зрительный анализатор;
- слуховой анализатор;
- органы обоняния;
- органы осязания;
- гиппокамп;
- гипоталамус;
- новая кора;
- зрительная кора;
- слуховая кора;
- моторная кора;
- мозжечок.

Указанные выше направления развития нейросетевых технологий тесно связаны с построением моделей упомянутых выше разделов нервной системы, а также с исследованиями, проводимыми в рамках программы *Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA)*, финансируемых DARPA (*Defense Advances Research Program*).

Отмеченные в данной работе направления исследований должны, по мнению автора, стать основой учебных курсов для студентов и аспирантов медицинских вузов, биомедицинских кафедр университетов и технических университетов, слушателей институтов повышения квалификации по направлению восстановительной медицины нервной системы.

1. Нейросетевые технологии

В данном разделе представлены основные понятия конкретных направлений разработок и развития нейросетевых технологий:

- нейронные сети [1] (в понимании инженера);
- нейроматематика [2];
- нейроуправление [3];
- нейрокомпьютеры [4];
- нейрочипы [4].

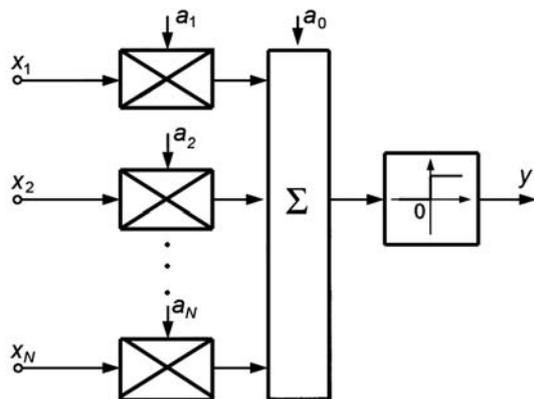


Рис. 1. Функциональная схема нейрона

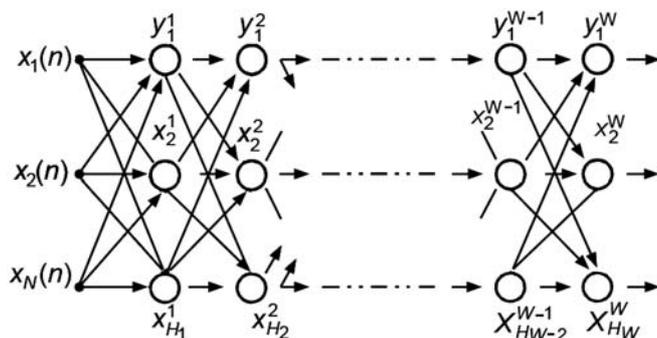


Рис. 2. Граф многослойной нейронной сети с последовательными связями

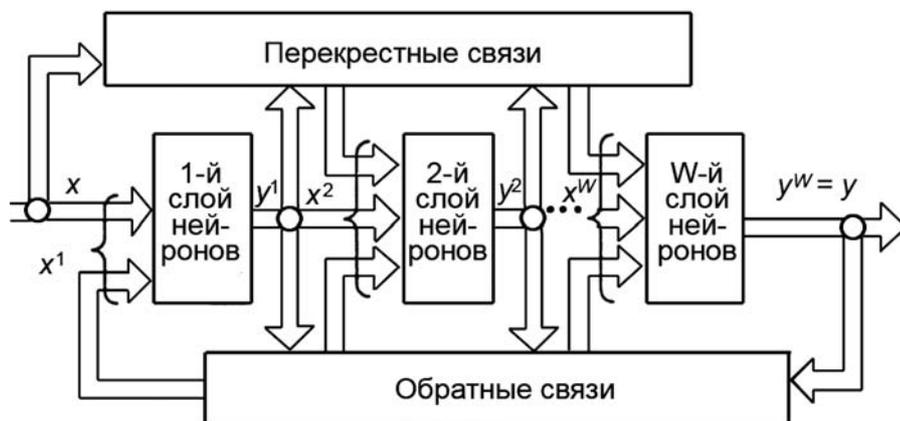


Рис. 3. Многослойная нейронная сеть

1.1. Нейронные сети. Нейроматематика. Нейроуправление

Нейронная сеть — это сеть с конечным числом слоев из одиночных элементов — аналогов нейронов с различными типами связей между слоями нейронов. При этом число нейронов в слоях выбирается необходимым для обеспечения заданного качества решения задачи, а число слоев нейронов как можно меньшим для уменьшения времени решения задачи.

Нейроны осуществляют следующее логическое преобразование входных сигналов в выходной:

$$y = \text{sign} \sum_{i=0}^N a_i x_i. \quad (1)$$

Это простейшая интерпретация передаточной функции нейрона, где y — значение выхода нейрона; a_i — весовые коэффициенты; i_0 — порог; x_i — входные значения нейрона, N — размерность входного сигнала нейрона. Нелинейное преобразование, осуществляемое в данном случае в нейроне,

$$\text{sign}(g) = \begin{cases} 0, & g < 0; \\ 1, & g \geq 0. \end{cases}$$

На рис. 1 представлена функциональная схема нейрона.

Нейронная сеть представляет собой высокопараллельную динамическую систему с топологией направленного графа, которая может получать выходную информацию посредством реакции ее состояния на входные воздействия. Узлами в нейронной сети называются процессорные элементы и направленные каналы. Граф многослойной нейронной сети с последовательными связями показан на рис. 2.

На рис. 3 представлена структура многослойной нейронной сети в виде блок-схемы.

Ниже представлены основные свойства нейронных сетей.

1. Однородные нейронные сети имеют свойство постепенно деградировать при выходе из строя отдельных элементов. Это было отмечено еще Ф. Розенблаттом при построении трехслойного персептрона со случайными связями в первом слое, когда число элементов данного слоя берется избыточным. При этом функция, реализуемая нейронной сетью, как бы распределяется по структуре.

2. Структура однородной нейронной сети предоставляет возможность массового параллельного выполнения большого числа операций, состоящих, в свою очередь, из простейших операций сложения,

умножения и нелинейного безынерционного преобразования. В структуре нейронной сети отсутствуют сложные и "длинные" иррациональные операции над операндами (деления, извлечения корня и т. д.), характерные для алгоритмов, свойственных однопроцессорным машинам.

3. Нейронные сети реализуют достаточно гибкое и сложное функциональное преобразование входного пространства состояний в выходное, причем гибкость этого преобразования при необходимости может регулироваться числом слоев нейронной сети и типом связей.

4. Структура нейронных сетей допускает аналитическое описание преобразования входного пространства в выходное.

5. Структура нейронной сети позволяет аналитически получать алгоритм настройки нейронных сетей и контролировать его функционирование в процессе решения задачи.

6. Сложность нейронной сети, используемой для решения конкретной задачи, отображает в себе сложность решаемой задачи.

Основными преимуществами нейронных сетей как логического базиса алгоритмов решения сложных задач являются следующие:

- инвариантность методов синтеза нейронной сети к размерности пространства признаков;
- соответствие современным и перспективным технологиям;
- отказоустойчивость в смысле монотонного, а не катастрофического изменения качества решения задачи в зависимости от числа вышедших из строя элементов.

Нейроматематика [2] — это раздел вычислительной математики, связанный с решением задач с помощью алгоритмов, представимых в нейросетевом логическом базисе. Целью создания нейроматематики является создание алгоритмов с высокой степенью параллельности как для сложных формализуемых, так и для слабоформализуемых и неформализуемых задач.

Нейронным (или нейросетевым) алгоритмом будем называть вычислительную процедуру, основная часть которой может быть реализована в виде нейронной сети той или иной структуры.

Нейроуправление [3] — раздел современной теории управления, связанный с применением нейронных сетей для построения так называемых нейроконтроллеров в сложных системах управления. Именно необходимость управления сложными существенно нелинейными и многомерными объектами сделало необходимым введение нейроконтроллеров в контур управления.

1.2. Нейрокомпьютеры. Нейрочипы

Нейрокомпьютер — это вычислительная система с архитектурой аппаратного и программного

обеспечения, адекватной выполнению алгоритмов, представленных в нейросетевом логическом базисе [4].

Нейронные сети по сути дела являются формальным аппаратом описания основной части алгоритма решения задачи на нейрокомпьютерах.

Принципиальным моментом появления нейрокомпьютеров является отказ от булевского логического базиса на уровне элементов вычислительных машин с переходом на базис пороговой логики, который в простейшем варианте моделирует функции нервной клетки. При этом изменяется не только элементная база, но и архитектура ЭВМ.

Разработки трех направлений — алгоритмов решения задач, теории нейронных сетей и нейрокомпьютеров находятся в тесной взаимосвязи:

- с одной стороны, структура нейронной сети для каждой задачи определяется самой задачей, с другой стороны, развитие теории нейронных сетей побуждает применять для решения задач более сложные структуры нейронных сетей;
- с одной стороны, уровень совершенства технических устройств определяет диапазон возможностей для построения нейронных сетей и нейросетевых алгоритмов; с другой стороны, развитие нейроматематики подталкивает теорию нейронных сетей, а та, в свою очередь, направляет развитие технического исполнения.

Основой построения многих систем в нейрореставрологии являются специализированные нейрокомпьютеры, построенные на базе нейрочипов — специальных сверхбольших интегральных схем (СБИС), архитектура которых эффективно реализует фрагмент формальной нейронной сети. В настоящее время разработана большая номенклатура *нейрочипов* [4]:

- цифровые;
- аналого-цифровые и аналоговые;
- оптоэлектронные и другие.

2. Нейросетевые технологии в реализации систем измерения и диагностики состояния нервной системы и ее разделов

В основной своей массе измерительные системы в настоящее время слабо используют нейросетевые технологии. В последние годы усложнение измеряемых параметров и повышение требований к точности измерений привело к появлению интеллектуальных, в том числе нейросетевых, измерительных систем.

Диагностика любых объектов, в том числе нервной системы и ее разделов, может трактоваться как задача аппроксимации функции в многомерном пространстве признаков существования объектов, принимающей дискретное или непрерывное значение, соответствующее диагностируемому состоя-

нию. Нейронные сети по общему признанию ученых в мире являются наилучшим аппроксиматором функций и, как следствие, наилучшим способом построения систем диагностики состояний нервной системы и ее разделов.

2.1. Нейросетевая диагностика мозга по электроэнцефалограмме и магнитоэнцефалограмме

Применение нейросетевых технологий при обработке электроэнцефалограммы (ЭЭГ) характерно для двух режимов работы:

- пассивного;
- активного (при наличии различных стимулирующих воздействий на органы чувств).

В общем виде концептуальная модель генерации сигналов ЭЭГ и магнитоэнцефалограммы (МЭГ) представлена [6, 7] на рис. 4.

Основная концепция решения прямой и обратной задач обработки ЭЭГ или МЭГ представлена

на рис. 5, где основные блоки W и W^{-1} решения прямой и обратной задачи, а также адаптивные фильтры эффективно реализуются с применением нейросетевых технологий.

Решение прямой задачи включает в себя задачу "слепого выделения источников" (*Blind Source Separation*), фактически адекватную нейронной сети, работающей в режиме кластеризации (самообучения).

Подобный режим работы нейронных сетей длительное время с начала 90-х годов прошлого века [8] до последних лет [9] применялся для решения задачи выделения артефактов в ЭЭГ.

Нейросетевые технологии широко применяют для анализа и классификации данных ЭЭГ в медицинской диагностике. Зачастую [10] для повышения степени достоверности результатов используют многослойные нейронные сети, в которых индивидуальные свойства нейронов определяются знаниями экспертов-нейробиологов.

Иногда для реализации систем классификации ЭЭГ используют гибридные системы, объединяющие нейронные сети и методы, основанные на использовании знаний [11].

Имеются определенные особенности применения нейросетевых технологий для диагностики по ЭЭГ или МЭГ при наличии стимулирующих воздействий на органы чувств. Данные особенности определяются необходимостью определения в ЭЭГ или МЭГ характеристик, связанных с потенциалами возбуждения, вызванными стимулирующими воздействиями на органы чувств. Применение нейросетевых технологий имеет место для различных стимулирующих воздействий [18, 19]: зрительных, слуховых, двигательных, обонятельных.

Решение задачи диагностики заболеваний, например опухолевых заболеваний мозга, по данным ЭЭГ или МЭГ требует формирования базы данных в виде записей сигналов и данных верификации заболеваний. При этом подтверждено многими исследованиями и с нашей точки зрения очевидно преимущество нейросетевых алгоритмов классификации (распознавания) над статистическими алгоритмами, используемыми для описа-

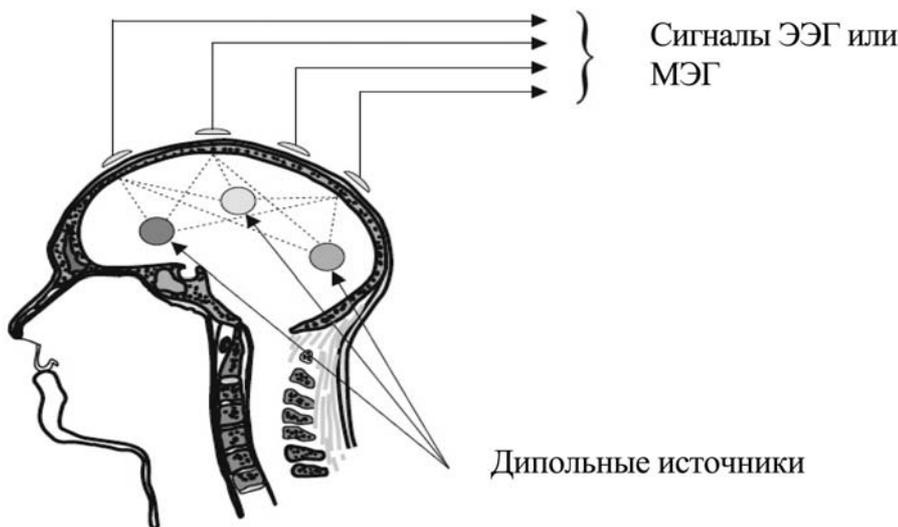


Рис. 4. Концептуальная модель генерации ЭЭГ/МЭГ сигналов

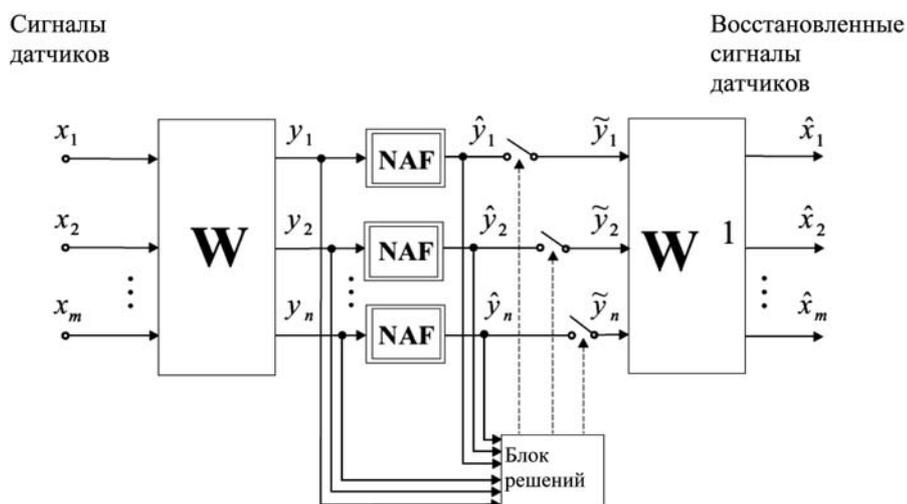


Рис. 5. Общая структура системы диагностики по ЭЭГ и МЭГ

ния признаков и принятия решений классические статистические методы.

Применение нейросетевых технологий в диагностике заболеваний по ЭЭГ имеет многолетнюю историю. В работе [20] описан 10-летний опыт использования многослойных нейронных сетей для выделения признаков и классификации ЭЭГ. Подобными методами с применением нейросетевых технологий решают многие другие задачи, например предсказание взросления мозга [21].

Одними из наиболее важных направлений применения нейросетевых технологий в диагностике заболеваний нервной системы по ЭЭГ являются эпилепсия, болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера.

Для анализа электрической активности мозга при эпилепсии иногда применяют не стандартные многослойные нейронные сети [22—28], а специфические архитектуры нейронных сетей, например клеточные нейронные сети [29—31] или вейвлетные нейронные сети [32, 33].

Отдельно рассматриваются вопросы применения нейросетевых технологий в диагностике болезней Паркинсона (*Parkinson's disease*) и Хантингтона (*Huntington's disease*) [34, 35], а также болезни Альцгеймера (*Alzheimer's disease*) [36].

2.2. Нейросетевые технологии, нейрореставрология и проблема интерфейса "мозг—компьютер"

Теоретическая разработка и создание интерактивных когнитивных интерфейсов являются в настоящее время насущными задачами как в междисциплинарной области фундаментальных наук — инженерной психологии, психофизиологии, нейрофизиологии, неврологии, так и в сугубо практических областях, таких как оптимизация работы человека-оператора, создание мобильных роботов, реабилитация инвалидов, формирование комфортной среды обитания человека.

Простейшая реализация интерфейса "мозг—компьютер" с применением нейросетевых технологий заключалась в построении обучаемой нейронной

сети, входным сигналом которой являются параметры ЭЭГ, а указанием учителя — мысленная реакция типа "да" или "нет". Обученная нейронная сеть выделяла мысленную реакцию пользователя при реагировании на слова, появляющиеся на экране компьютера [37]. При этом исследовалась возможность построения компьютерного интерфейса, условно называемого "мозговой мышью". Исследовалась возможность использования этой системы для построения эффективного средства реабилитации больных с полной мышечной атрофией, когда указанием учителя является мысленное движение руки влево или вправо [38, 39]. В работе [40] указанием учителя "комитета" нейронных сетей было движение правого или левого указательного пальца. Причем "комитет" нейронных сетей обеспечивал автоматический поиск области на черепе, ответственной за моторное действие в случае снятия сигнала с 56 электродов.

Частным вариантом являются нейрокомпьютерные интерфейсы "мозг—компьютер" на основе ЭЭГ и интерфейсы "глаз—компьютер", которые активно разрабатываются в настоящее время во многих лабораториях мира.

На рис. 6 представлена схема подобного интерактивного когнитивного интерфейса "человек—компьютер". Блок нейросетевой обработки должен представлять собой кроссплатформенный программный продукт библиотеки и API-функции.

Эти разработки будут иметь широкие перспективы использования в здравоохранении для социализации пациентов, лишенных моторных функций, а в здоровой популяции — для расширения возможностей психической адаптации и нейроэргономической оптимизации деятельности посредством прямого интерактивного взаимодействия в технологии интерфейсов "мозг—компьютер", когда управляющий сигнал поступает к исполнительным устройствам напрямую от мозга, минуя нервы и мышцы [41—46].

Применение нейросетевых технологий в разработках интерфейса "мозг—компьютер" наиболее характерно для работ последних лет [47—52].

3. Зрительные имплантаты

Первые публикации, посвященные проблеме применения нейрокомпьютеров в таких системах, как имплантируемый глаз для слепых людей, появились в середине 90-х годов XX века [53—57]. Была организована Ассоциация имплантируемой ретины (*Retina Implantant Association*), объединяющая несколько десят-

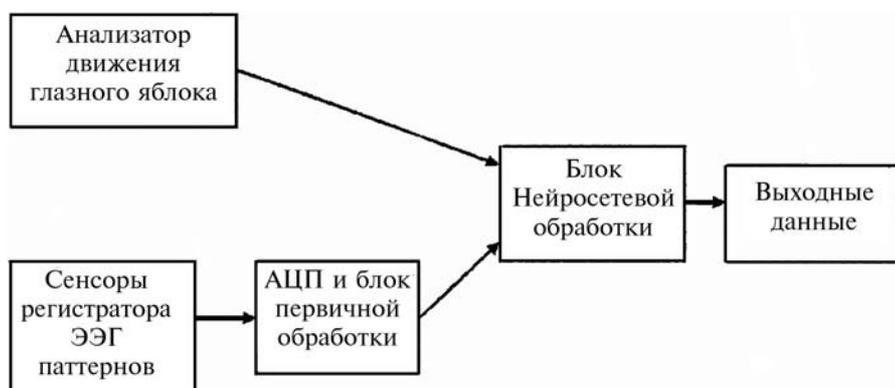


Рис. 6. Схема интерактивного когнитивного интерфейса

ков групп, работающих в этом направлении (<http://www.neuro.uni-bonn.de/ri/ri.assoc.html>). Известно несколько научных школ, активно занимающихся проблемой искусственного глаза для имплантации слепым людям.

3.1. Научная школа профессора Экмиллера

Руководителем и инициатором программы "Искусственный глаз" в Германии являлся профессор Р. Экмиллер, известный ученый, работавший еще в 70-е годы прошлого века над проблемами искусственных нейронных сетей.

Проект "Искусственный глаз" можно представить в виде следующих частей.

1. Проектирование фоторецепторной матрицы.
2. Создание обучаемых фильтров и генераторов импульсов.
3. Создание передатчиков сигналов в протезе глаза (по радиоканалу или оптическому каналу).
4. Создание микроконтактного устройства.
5. Разработка методики имплантации и фиксации зрительного протеза.
6. Изучение биологической совместимости.
7. Тестирование протеза и зрительной коры головного мозга.
8. Организация диалогового режима для обучения элементов зрительного протеза.

Школа проф. Р. Экмиллера развернула работы по зрительному имплантату в середине 90-х годов прошлого столетия с широким применением нейросетевых технологий [58–68].

Общая схема имплантируемой ретины, включая декодер ретины, имплантируемый внутрь глаза, и

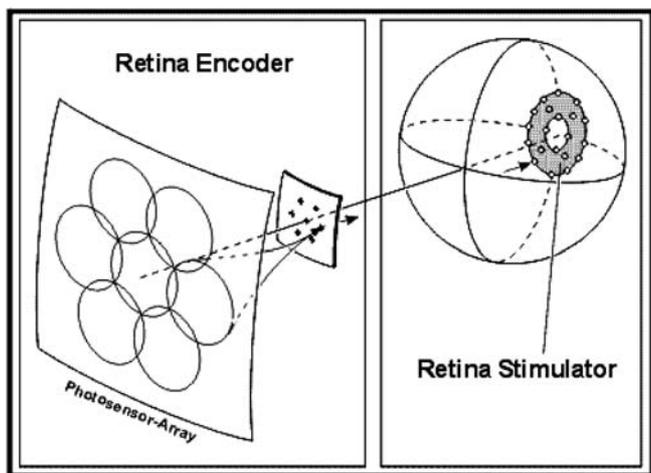


Рис. 7. Структура имплантируемого зрительного протеза

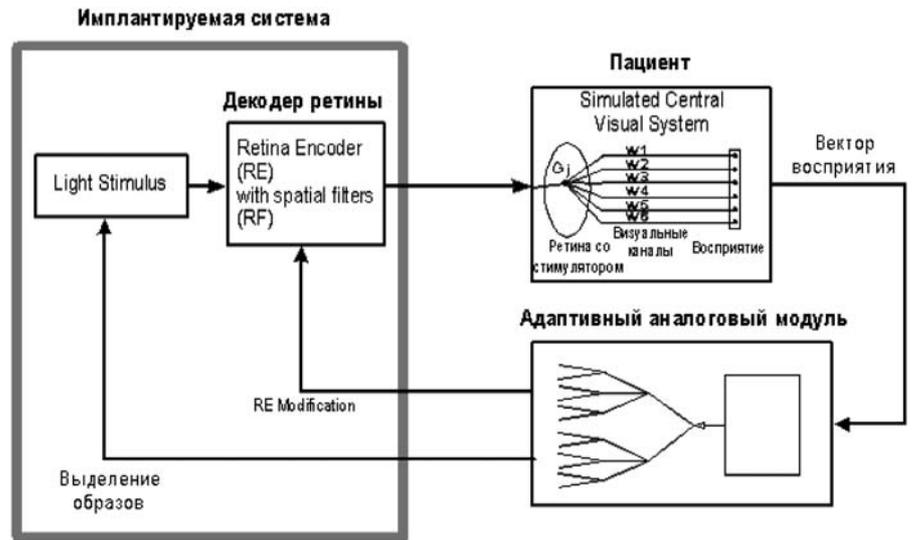


Рис. 8. Концепция двунаправленной связи между декодером ретины и пациентом

стимулятор ретины, имплантируемый в слой ганглиозных клеток, представлена на рис. 7. Декодер ретины реализует адаптивный фильтр, свойства которого подобны свойствам первичной ретины.

На рис. 8 представлена общая структурная схема настройки элементов имплантата в диалоге с пациентом, которому имплантирована система. Адап-

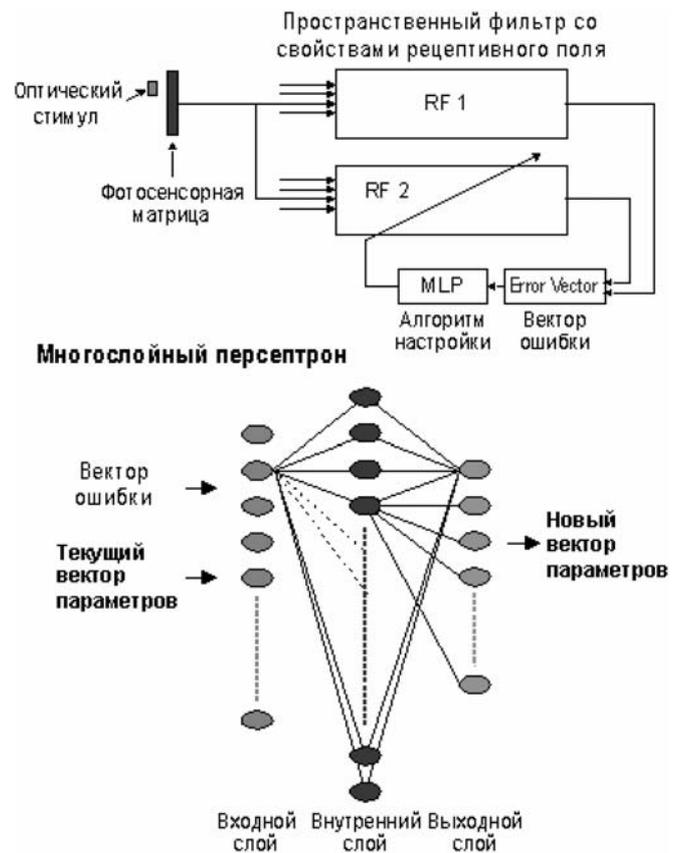


Рис. 9. Настройка ретинальных ганглиозных клеток как клеток рецептивного поля

тивная настройка осуществлялась с применением алгоритмов обучения и самообучения нейронных сетей. Представлен адаптивный диалоговый модуль, реализующий обратную связь от пациента на имплантируемую систему для выработки параметров фильтров с помощью нейросетевых алгоритмов и для выделения стимулирующих образов.

На рис. 9 представлена применяемая проф. Р. Эмиллером пространственно-временная схема настройки ретинальных ганглиозных клеток как клеток рецептивного поля.

3.2. Фраунгоферовский институт микроэлектронных систем (Fraunhofer's Institute of Microelectronic Circuits and Systems)

Коллектив ученых Фраунгоферовского института микроэлектронных схем и систем в г. Дуйсбурге (Германия) в течение многих лет проводил исследо-

вания в области создания компонентов имплантантов сетчатки для генерации первичных сигналов от объектов в фиксированные образы для пациентов с вырождающимися функциями сетчатки. Это специальная микросхема для генерации импульсов стимуляции неповрежденных ганглиозных клеток сетчатки, система беспроводной связи этого генератора с внешним кодером сетчатки. На рис. 10 представлена архитектура имплантируемого протеза. Модель сетчатки имела гексагональную структуру. Сигнал с данного блока формировался в виде специального пакета, содержащего информацию о фрагменте изображения, номерах электродов и специальные команды управления выбора номеров пар электродов, команды замены пар электродов и другие (рис. 11).

Частота передачи импульсной информации внутри глаза — 400 МГц.

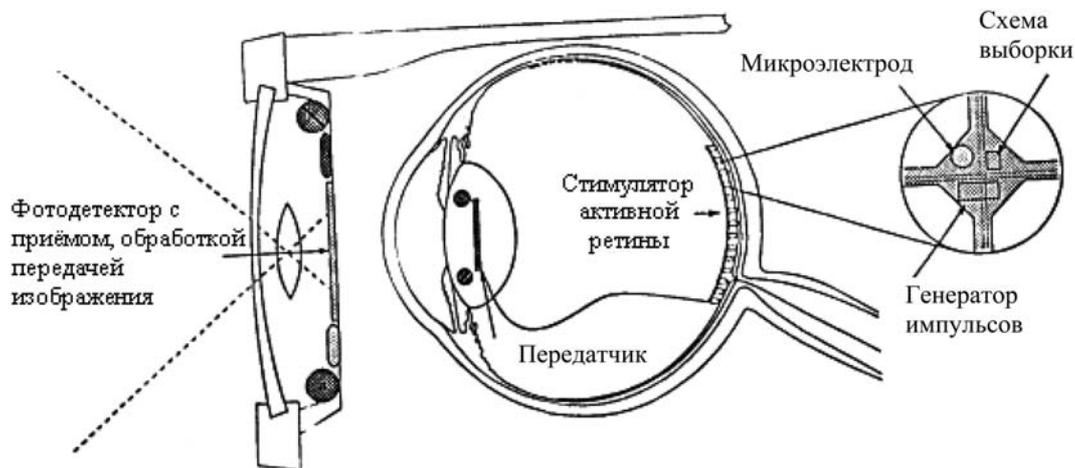


Рис. 10. Архитектура имплантируемого протеза

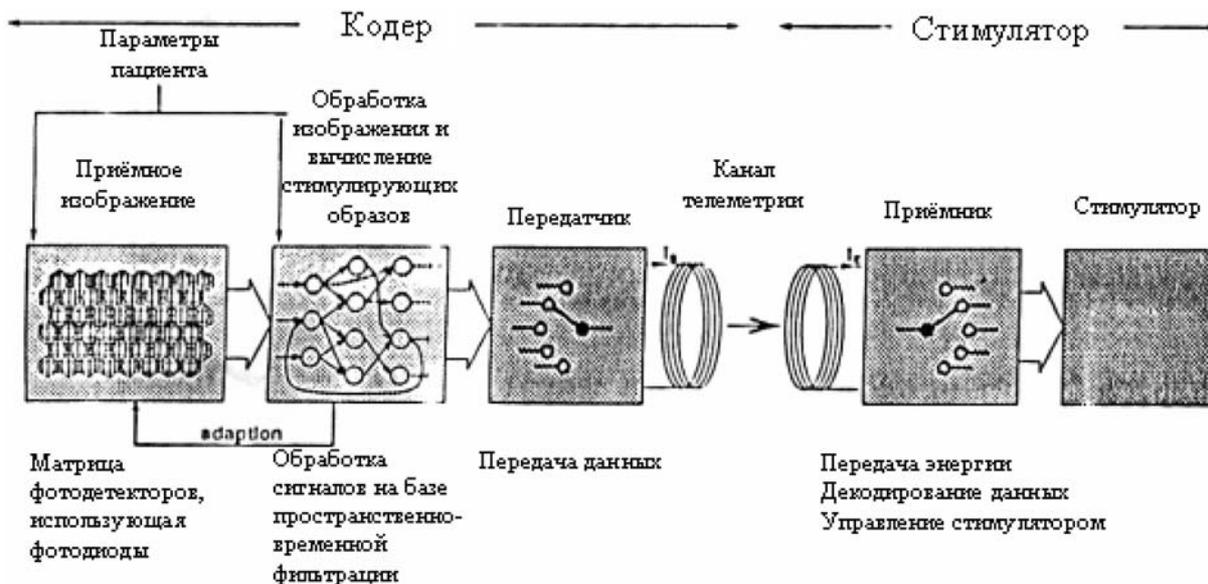


Рис. 11. Общая структура системы

Внутриглазная часть имплантата сетчатки состояла из приемника информации и стимулятора сетчатки, фиксируемых на поверхности сетчатки с помощью биологически совместимого клея. Оба блока изготавливали в виде КМОП-микросхем. Приемник и стимулятор внутри глаза соединены сверхгибким ленточным кабелем. Генерация электрических сигналов для стимуляции клеток осуществлялась выбором двух электродов из 25 возможных с возможностью менять выбранные электроды.

3.3. Работы японских ученых

В Японии работы по зрительным имплантатам начались около 15 лет назад [77—80].

В этих работах рассматриваются патологии, связанные с дегенерацией части сетчатки. Зрительный имплантируемый протез, по мнению японских ученых, должен состоять из внешней системы приема и обработки изображений и внутренней (имплантируемой) системы стимулирующих электродов. Японские ученые провели первую группу экспериментов с реальной сетчаткой по изучению реакции ганглиозных клеток на внешнее возбуждение. Они оптимистично смотрят на решение проблемы зрительного протезирования общими усилиями специалистов по нейронным сетям, микроэлектронике, биоматериалам, электрофизиологии и другим смежным отраслям.

Серьезной поддержкой этих работ являются проводимые под научным руководством проф. Амари исследования по программе *Visiome* (платформа нейроинформатики для науки о зрении) — руководитель работ проф. Shiro Usui (RIKEN BSI, Japan) [81—84].

Замечание. Кроме приведенных выше научных школ зрительными имплантатами занимались многие другие коллективы:

- коллектив немецких ученых [85];
- ученые университета Джона Хопкинса (*the John Hopkins University, Baltimore, USA*) [86—90] и других организаций;
- фирма *Intelligent Medical Implants* (Швейцария — www.imidevices.com);
- Калифорнийский университет (Беркли), исследующий клеточные нейронные сети как искусственную сетчатку для зрительных имплантатов [92, 93];
- Массачусетский технологический институт [94].

4. Слуховой имплантат

В последние 10—15 лет активно развиваются исследования возможности создания перспективных слуховых имплантатов с применением нейросетевых технологий для слабослышащих и неслышащих

людей. Основная цель работы здесь заключается в переходе от известных линейных методов и алгоритмов обработки сигналов к нелинейным методам, среди которых нейросетевые считаются наиболее эффективными.

4.1. Основные функции слуховых имплантатов, реализуемые с применением нейросетевых технологий

В одном из входных блоков слухового имплантата — банке фильтров реализация в перспективе должна производиться не в виде линейки линейных фильтров, описываемых Z-передаточными функциями, а в виде набора нейросетевых фильтров, аппроксимирующих свойства реальных элементов слухового анализатора, в том числе улитки. Переход от структуры линейного адаптивного фильтра к нелинейному нейросетевому должен в принципе повысить качество предварительной фильтрации и последующих этапов обработки информации в слуховом имплантате.

Банк нейросетевых фильтров с настройкой на максимальное качество стимуляции должен иметь обратную связь от электродов с качественным контролем качества стимуляции (обратная телеметрия).

При этом необходимо использовать значительный опыт разработок адаптивных фильтров (эквалайзеров) в технике, настраивающих свои характеристики на переменные характеристики канала передачи (формирования) входных сигналов.

Нейросетевые технологии в виде их частного случая — вейвлетных систем уже много лет применяют для выработки признаков речевых сигналов в слуховых имплантатах [94]. Эта задача может интерпретироваться как задача сжатия речевого сигнала для проведения дальнейшей обработки с использованием нейросетевых алгоритмов, что должно привести к меньшим потерям качества при его дальнейшей обработке. Отдельным вопросом исследований должно быть применение в перспективном слуховом имплантате различных программно-аппаратных средств распознавания речевых сигналов.

Первые применения адаптивных систем распознавания речевых сигналов при построении слуховых имплантатов имели место еще в конце 80-х — начале 90-х годов прошлого века [95, 96] с постепенным переходом от классических статистических методов распознавания к нейросетевым [98, 99] с демонстрацией значительного улучшения качества распознавания речевых сигналов.

Режим кластеризации (самообучения — обучения без учителя) с применением нейросетевых технологий является широко распространенным в задачах обработки речевых сигналов. В последние 10—20 лет этот режим начинают применять и при построении эффективных слуховых имплантатов [99—101].

4.2. Нейрочипы для слуховых имплантатов

Естественно предположить вслед за разработкой указанных моделей на языках VHDL или Verilog реализацию и исследование конкретных образов фрагментов перспективного слухового имплантата. При этом освоение и использование современных систем проектирования цифрового и аналогового СБИС-составляющих перспективного слухового имплантата являются неотъемлемой частью работы.

Исследования завершаются реализацией конкретных моделей разделов перспективного слухового имплантата на языках VHDL или Verilog с ориентацией на аппаратную реализацию в следующем виде:

- программируемые логические матрицы (FPGA) [103];
- заказные цифровые чипы;
- аналоговые чипы [102, 104, 105].

Основными характерными признаками новых направлений программно-аппаратной реализации слуховых имплантатов являются следующие:

- стремление к учету всякого рода нелинейностей и нестационарностей, что является объективной причиной использования нейросетевых технологий;
- переход от цифровых к аналоговым и аналого-цифровым реализациям при создании специализированных нейрочипов для слуховых имплантатов.

4.3. О перспективах разработок слуховых имплантатов

В целом можно отметить несколько направлений перспективного применения нейросетевых технологий в разработках слуховых имплантатов:

- нейросетевые фильтры (эквалайзеры), ориентированные на реализацию в составе банка фильтров и адаптивную обработку звуковой информации в сильно шумящей и переменной внешней среде;
- эффективные нелинейные системы сжатия звуковой информации;
- современные нейросетевые адаптивные системы распознавания речевой информации;
- современные аппаратные реализации нейрочипов для слуховых имплантатов, включая нейрочипы с частотно-импульсной модуляцией сигналов, в том числе для создания эффективной программно-аппаратной модели ретины;
- нейросетевые модели отдельных элементов слуховой системы (мембраны, улитки и т. д.).

Импантируемая система должна быть в обязательном порядке многоканальной с точки зрения числа вживляемых в улитку стимулирующих электродов.

Перспективное направление разработки слуховых имплантатов — внутримозговые имплантаты

с имплантацией электродов на поверхность улиточных ядер требует прежде всего достаточно ясного понимания функционирования биологических нейронных сетей улиточных ядер. Это может быть достигнуто как нейрофизиологическими и цитологическими исследованиями, так и построением нейросетевых моделей улиточных ядер.

Необходимой частью работы должна быть методика обучения больных с вживленным перспективным имплантатом с одновременной оперативной перестройкой нейросетевых блоков имплантата подобно тому, как это делается и предполагается делать в перспективных зрительных имплантируемых протезах.

Работу необходимо проводить в тесном контакте и с непосредственным участием организаций — разработчиков слуховых имплантатов для эффективного решения двух задач:

- поиска "узких" и трудных задач для решения в имплантатах для перевода их в область нелинейной нейросетевой обработки;
- будущих контактов с медицинскими клиниками для проведения экспериментов с вариантами перспективных слуховых имплантатов.

5. Нейросетевые технологии в протезировании рук и ног

Основные применения нейросетевых технологий в протезировании рук и ног сводятся в основном к решению двух задач:

- классификация миоэлектрических сигналов;
- реализация нейроконтроллеров управления протезами.

5.1. Классификация миоэлектрических сигналов с применением нейросетевых технологий

Эта проблема развивается постоянно уже более 20 лет. Еще в работе [107] была представлена нейронная сеть, позволяющая выделить из суммарного электромиографического (ЭМГ) сигнала сигналы, управляющие конкретными мышцами или конкретными группами мышц. В работе [108] была предложена архитектура нейронных сетей, достаточно быстро и точно решающая сложную задачу декомпозиции поверхностных электромиографических сигналов в набор простых потенциалов. В этой работе были представлены: описание физиологического смысла и формальной постановки задачи; структура нейронных сетей с гауссовскими элементами; уравнения, описывающие динамику разработанной модели; оригинальный метод выбора начальных условий, а также результаты проведенных экспериментальных проверок и возможности практического внедрения модели.

В работе [109] было проведено исследование релевантности признаков для классификации

электромиографических данных в диагностической нейрофизиологии. Изучены пять моделей и приведено их краткое описание. В опытах участвовали 37 пациентов, 24 — для построения обучающей процедуры, 13 — для контроля. Точность распознавания лежала в диапазоне от 62 до 93 %.

В работе [111] проведены сравнения нового варианта метода сопряженных градиентов и метода моментов в организации обучения нейронных сетей с помощью обратного распространения в задаче диагностики ЭМГ. Оба алгоритма обеспечивают примерно одинаковую точность распознавания, однако метод сопряженных градиентов оказался предпочтительнее с точки зрения экономии времени обучения и минимальных необходимых размеров нейронной сети.

Для изучения нелинейной динамики и описания аттракторов миоэлектрических сигналов, имеющих хаотическую природу, использовались сечения Пуанкаре. Подробно исследован конкретный случай миоэлектрических сигналов [112] и разработана искусственная нейронная сеть для классификации сигналов на основе сечений Пуанкаре. Приведено описание ее архитектуры и метода обучения. Результаты, полученные в ходе проведенных испытаний, продемонстрировали возможность практических применений алгоритма в клинических условиях. Была описана экспериментальная установка для измерения миоэлектрических сигналов двуглавой мышцы руки. Точность классификации четырех активных статических и динамических состояний мышцы составила 100 %. Несмотря на предварительный характер результатов метод был применен для управления протезами.

Исследования показали необходимость применения при обработке миоэлектрических сигналов нескольких режимов работы нейронных сетей — режимов классификации и кластеризации (обучения с учителем и без учителя) [113–115].

5.2. Нейроконтроллеры в управлении протезами

Исследования последних 20 лет показывают, что можно создать протезы двигательных органов че-

ловека, управляемые электромиографическими сигналами. С помощью электромиографических образов можно успешно измерять углы сгиба суставов при движении пальцев и другие параметры протезов.

В работах [116, 117] нейронная сеть выполняет нейромышечную стимуляцию мышц ног при параличе. Электромиографические сигналы, снимаемые с датчиков, установленных у пациента, направляются на многослойную нейронную сеть, которая управляет мышцами для обеспечения простейших движений, необходимых при перемещении пациента (набор команд: встать, поднять правую ногу, левую ногу, не менять состояния). Пациент может самостоятельно обучать нейронную сеть, которая имеет возможность адаптироваться к медленным изменениям состояния пациента.

Один из первых нейроконтроллеров, использующих данные принципы функционирования был описан в работе [119].

Эффективным методом реабилитации больных с повреждением спинного мозга в шейной области, при котором часть мышц плеча остается неповрежденной, является функциональная нервномышечная стимуляция пораженных мышц, координированная со здоровыми. В работе [120] исследуется возможность использования нейронных сетей с задержкой по времени для предсказания движения плеча и локтя по электромиограммам здоровых мышц и описывается серия экспериментов по предсказанию согласованного движения по четырем координатам. Эксперименты проводили как со здоровыми добровольцами, так и с больными с частичным параличом мышц плеча и локтя.

На рис. 12 представлена общая структурная схема системы нейроуправления [122] ритмическим движением ноги посредством функциональной электрической стимуляции. Нейронная сеть состоит из двух частей:

- нейронный осциллятор, служащий контроллером обратной связи, генерирующим ритмические движения ноги;
- нейронная сеть, управляющая функциональным электрическим стимулятором, генерирующим последовательность импульсов для стимулирования мускулов.

Другой пример нейроуправления протезом руки представлен в работе [123].

На рис. 13 представлена общая схема нейроуправления протезом руки. Зафиксированные различные движения руки являются исходными данными для решения кинематической и обратной динамической задачи.

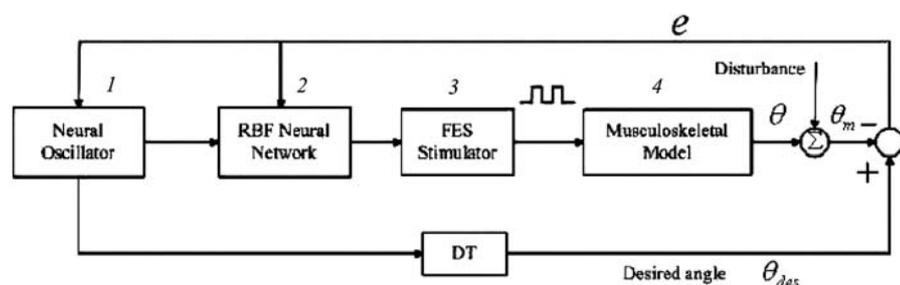


Рис. 12. Структурная схема системы нейроуправления: 1 — нейронный осциллятор; 2 — нейронная сеть; 3 — электрический стимулятор; 4 — мускульно-скелетная модель

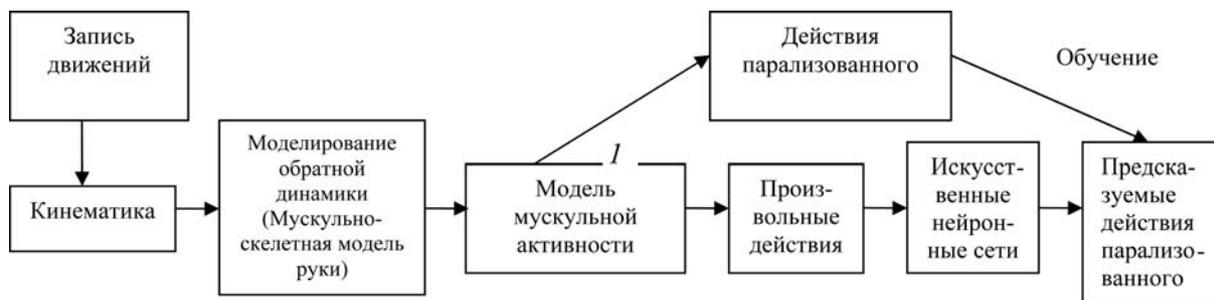


Рис. 13. Общая схема организации нейроуправления протезом руки

Образцы действий произвольной и парализованной мышц используются для обучения нейроконтроллера, вырабатывающего упрежденное действие парализованной мышцы.

6. Нейросетевые модели нервной системы и ее разделов

Модели разделов нервной системы, построенные на базе современных вычислительных средств, являются важными технологическими средствами решения задач нейрореставрологии.

Разработка моделей разделов нервной системы является важной задачей, решение которой чрезвычайно необходимо как для понимания принципов функционирования, так и для прогнозирования процессов функционирования данных объектов исследования. Применение нейросетевых технологий при построении моделей весьма целесообразно и необходимо, по крайней мере, по двум причинам.

1. Нейронные сети являются в настоящее время наиболее эффективным средством построения моделей сложных многомерных нелинейных динамических систем;

2. Всякая модель по своей логической структуре должна быть наиболее близка к структуре моделируемого объекта. В нашем случае моделируемым объектом является биологическая нейронная сеть, а формальная нейронная сеть является наиболее близкой к ней по своей структуре.

Как всякие модели, нейросетевые модели разделов нервной системы необходимы для решения двух задач:

- прямой — моделирование и изучение поведения (реакции при заданном входном воздействии);
- обратной — определения входных воздействий, обеспечивающих заданное выходное поведение модели.

Эта задача, в частности, является задачей локализации источников изучения в коре головного мозга по данным измерений МЭГ.

Анализ научного задела и состояния работ по нейросетевым моделям нервной системы является предметом большой самостоятельной работы, основанной на многих тысячах научных работ, по-

священных, по крайней мере, следующим разделам нервной системы:

- зрительный анализатор;
- слуховой анализатор;
- органы обоняния;
- органы осязания;
- гипокамп;
- гипоталамус;
- новая кора;
- зрительная кора;
- слуховая кора;
- моторная кора;
- мозжечок;
- другие разделы нервной системы.

Построение нейросетевых моделей разделов нервной системы проводилось и должно проводиться как для режима нормального функционирования, так и для случая патологических изменений, в частности болезней, указанных выше в п. 2.1.

Значительную роль в применении нейросетевых технологий в нейрореставрологии должны сыграть исследования по программе BICA (*Biologically Inspired Cognitive Architectures*).

7. Об учебной деятельности, связанной с будущим применением нейросетевых технологий в нейрореставрологии

Представляемая читателю работа может быть инициатором постановки в медицинских вузах по профильным нейрореставрологии специальностям ряда учебных курсов и семинаров, таких как:

- основы теории нейронных сетей (имея в виду формальную теорию);
- нейрокомпьютеры и нейрочипы (возможно в качестве раздела общего курса по вычислительной технике);
- измерительные и диагностические системы в нейрореставрологии с применением нейросетевых технологий;
- зрительные и слуховые имплантаты с применением нейросетевых технологий;
- кардиоимплантаты с применением нейросетевых технологий;

- имплантаты спинного мозга с применением нейросетевых технологий;
- бионические протезы;
- модели разделов нервной системы, как инструментальные средства решения задач нейрореставрологии;
- нейросетевые технологии и проблема протеома человека в нейрореставрологии;
- современные методы визуализации информации в нейрореставрологии.

Заключение

Данная работа является попыткой сформировать интегрированный взгляд на применение в нейрореставрологии современных и перспективных достижений в области инженерных направлений развития нейросетевых технологий.

Список литературы

1. Galushkin A. I. Neural Network Theory. Springer, 2007.
2. Галушкин А. И. Нейроматематика. М.: Радиотехника, 2002.
3. Галушкин А. И. Основы нейрорегуляции // Информационные технологии. 2002. № 10.
4. Galushkin A. I. Нейрокомпьютеры. М.: Радиотехника, 2000.
5. Chapin J. K., Moxon K. A. (eds). Neural prosthetics for restoration of sensory and motor control. CRC Press, 2001.
6. Jagath C. Rajapakse, Andrzej Cichocki, V. David Sanchez A. Independent component analysis and beyond in brain imaging // ICONIP'02, Singapore, 2002.
7. Li Y., Cichocki A., Amari S.-I. Blind estimation of channel parameters and source components for EEG signals: a sparse factorization approach // IEEE transactions on neural networks. March 2006. Vol. 17, No 2.
8. Sreenivas T. V., Unnikrishnan V. S., Narayana Dutt D. Pruned neural network for artifact reduction in EEG signal // Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. and Biol. Soc. Orlando, Fla, Oct. 31 — Nov. 3, 1991. Vol. 13. Pt 3/5. New York (N.Y.), 1991. — P. 1411—1412.
9. Teixeira A. R., Tome A. M., Lang E. W., Gruber P., Martins da Silva A. On the use of clustering and local singular spectrum analysis to remove ocular artifacts from electroencephalograms // Proc. of International Joint Conference on Neural Networks, Montreal, Canada, July 31 — August 4, 2005
10. Bruckner B., Franz M., Richter A. Analyse und Klassifizierung von EEG -Datenmittels Strukturierter Neuronaler Netze // Int. Wiss. Kolloq., Ilmenau, 21—24 Okt., 1991. — P. 694—699.
11. Vvedensky V., Wirth A., Schneider S., Ezhov A., Knizhnikova L. Selection of characteristic patterns in magnetic and electric encephalograms using a neural network // Artif. Neural Networks: Proc. Int. Conf. Espoo. 24—28 June, 1991, Vol. 2. — Amsterdam etc., 1991. P. 1629—1632.
12. Patel Shail, Denham Michael J. A hybrid neural net/knowledge based approach to EEG analysis // Artif. Neural Networks: Proc. Int. Conf. Espoo. 24—28 June, 1991. Vol. 2. — Amsterdam etc., 1991. — P. 1665—1667.
13. Wu F.-Y., Slater J. D., Ramsay R. E., Honig L. S. Feature extraction of event-related potential waveforms by neural networks // IEEE Int. Conf. Neural Networks, San Francisco, Calif, March 28—April 1 1993: ICNN'93. Vol. 3. — Piscataway (N. J.). 71993. — P. 1532.
14. Lewicki M. A review of methods for spike sorting: the detection and classification of neural action potentials // Network: Comput. Neur. Syst., 1998. Vol. 9, № 3. — P. 433.
15. Gope C., Kehtarnavaz N., Nair D. Neural network classification of EEG signals using time-frequency representation // Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, Montreal, Canada, July 31 — August 4, 2005.
16. Jinbo Li, Shiliang Sun. Energy Feature Extraction of EEG Signals and a Case Study // 2008 IEEE World Congress on Computational Intelligence.
17. Sun Mingui, Sclabassi Robert. J. The forward EEG solution can be computed using artificial neural networks // IEEE Trans. Biomed. Eng. 2000. 47, № 8. P. 1044—1050.
18. Schellhorn C., Henning G., Hoenecke O., Husar P. Visual evoked responses via linear frequency-modulated stimulation // Proceedings — 19th International Conference — IEEE/EMBS Oct. 30 — Nov. 2, 1997. Chicago, IL., USA.
19. Marcelo Mazza, Walfred Tedeschi, Marilene de Pinho, Ubiraci P. C. Neves. Tsallis information measure applied to the analysis of EEG signals in a model of the somatosensory system // Neurocomputing, 44—46 (2002). — P. 915—921.
20. Gevius Alan. S. Neural networks signal processing in human brain research. Part 2. Applications // Proc. 10th Annu. Inf. Conf. IEEE Eng. Med. and Biol. Soc., New Orleans, La, Nov. 4—7, 1988. Pt. 3/4 — New York (N. Y.). 1988. — P. 1499.
21. Moreno L., Pineiro J. D., Sanchez J. L., Manas S., Merino J. J., Acosta L., Hamilton A. Using neural networks to improve classification: Application to brain maturation // Neural Networks — 1995-8. № 5. — P. 815—820.
22. Mylonas S. A., Comley R. A. (Centre for Inf. Eng., City Univ., London. UK). EEG: Signal analysis using a multi-layer perceptron with linear preprocessing. Neural Networks for Signal Processing IV // Proc. of the 1994 IEEE Workshop, Ermioni. Greece. 6—8 Sept. York, NY, USA: IEEE 1994. P. 671—680.
23. Weng W., Khorasani K. (Concordia, Univ., Montreal, Qua., Canada). An adaptive structure neural networks with application to EEG automatic seizure detection // Neural Network (USA). Oct. 1996. Vol. 9, N 7. P. 1223—1240.
24. Khan Y. U., Tarassenko L. Detection of Interictal Epileptic Events in EEG using ANN // Artificial Neural Networks, 7—9 July 1997. Conference Publication. IEEE. 1997. N 440.
25. Bigan C. A system for neural networks detection and automatic identification of EEG Epileptic events // IEE Colloquium Intelligent Methods in Healthcare and Medical Applications (Digest No. 1998/51 4), York, UK. 20 Oct. 1998 (London, UK: IEE 1998). P. 13/1-4.
26. Reuter M. (Dortmund Univ., Germany). Analyzing epileptic events online by neural nets, special preprocessing methods included // Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation, Hefei, China, 28 June—2 July 2000 (Piscataway, N. J., USA: IEEE 2000). Vol. 2. P. 919—924.
27. Karameh F. N., Dahleh M. A. (Lab. for Inf. & Decision Syst., MIT, Cambridge, MA, USA). Automated classification of EEG signals in brain tumor diagnostics // Proceedings of the 2000 American Control Conference ACC, Chicago, IL, USA, 28—30. June 2000 (Danvers, MA, — USA: American Autom. Control Council 2000), p. 41, 69—73. Vol. 6.
28. Golovko V. A., Bezobrazova S. V., Bezobrazov S. V., Rubanau U. S. Application of Neural Networks to the Electroencephalogram Analysis for Epilepsy Detection Proc. of International Joint Conference on Neural Networks Orlando, Florida USA, August 12—17, 2007.
29. Laino M., Paasio A., Kananen A., Halonen K. (Electron. Circuit Design Lab., Helsinki Univ. of Technol., Espoo. Finland). A mixed-mode polynomial-type CNN for analysing brain electrical activity in epilepsy // Int. J. Circuit Theory Appl. (UK), March—June 2002. Vol. 30, N 2—3. P. 165—80.
30. Tetzlaff R., Weiss D. Cellular Neural Networks For the Anticipation of Epileptic Seizure // ISCAS'02.
31. Kunz R., Tetzlaff R. Feature extraction from Brain Electrical Activity in Epilepsy using Cellular Neural Networks // ECCTD'01 — European Conference on Circuit Theory and Design. 2001. August 23—31.
32. Giuseppina Inuso, La Foresta F., Mammone N., Morabito F. C. Wavelet-ICA methodology for efficient artifact removal from Electroencephalographic recordings // Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, Orlando, Florida, USA. 2007. August.
33. Szezuka M., Wojdylo P. Neuro-wavelet classifiers for EEG signals based on rough set methods // Neurocomputing. 2001. N 36. P. 103—122.
34. Jervis D. W., Saatchi M. R., Lacey A., Roberts T. (Sch. of Eng. Technol., Sheffield Hallam Univ., UK), Allen E. M., Hudson N. R., Oke S., Grimsley M. Artificial neural network and spectrum analysis methods for detecting brain diseases from the CNV response in the

- electroencephalogram // IEEE Proc., Sci. Meas. Technol. (UK). Nov. 1994. Vol. 141, N 6. P. 432–440.
35. **Micheli-Tzanakou E., Wojnicki P., Hamilton J.** (Dept. of Biomed. Eng., Rutgers Univ., Piscataway, NJ, USA). Neuronal signal processing in Parkinson's disease // Proc. of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN'02, Honolulu, HI, USA. 12–17 May 2002. Vol. 1. P. 77–81.
36. **Vialatte F., Cielrocki A., Dreytus G., Musha T., Shishkin L., Gervais R.** Early Detection of Alzheimer's Disease by Blind Source Separation, Time Frequency Representation, and Bump Modeling of EEG Signals // ICANN'05, Warsaw, 2005.
37. **Konger C., Principe J. C., Taner M.** Neural network classification of event related: potentials for the design of a new computer Interface. // IJCNN Int. Jt Conf. Neural Networks. San Diego, Calif. 1990. Vol. 1. — New York (N. Y.). 1990. C. 367–372.
38. **Haselsteiner E., Pfurtscheller G.** Using time-dependent neural networks for EEG classification // IEEE Trans. Rehabil. Eng. 2000. 8, N 4. P. 447–463.
39. **Guger C., Ramoser H., Pfurtscheller G.** Real-time EEG analysis with subject-specific spatial patterns for a brain — computer interface (BCI) // IEEE Trans. Rehabil. Eng. 2000. 8, N 4. P. 447–456.
40. **Peters B. O., Pfurtscheller G., Flyvbjerg H.** Automatic differentiation of multichannel EEG signals // IEEE Trans. Biomed. Eng. 2001. 48, N 1. P. 111–116.
41. **Yiwen Wang, Sung-Phil Kim, Principe J. C.** Comparison of TDNN Training Algorithms in Brain Machine Interfaces // Proc. of International Joint Conference on Neural Networks, Montreal, Canada, July 31 — August 4, 2005.
42. **Schalk G., McFarland D. J., Hinterberger T., Birbaumer N., Wolpaw Z. R.** BCI2000: A General-Purpose Brain-Computer Interface (BCI) System // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2004. Vol. 51, N 6. P. 1034–1043.
43. **Fazel-Rezai R.** Human error in P300 speller paradigm for brain-computer interface // IEEE Eng Med Biol Soc. 2007. V. 25: 16–9.
44. **Krusienski D. J., Sellers E. W., McFarland D. J., Vaughan T. M., Wolpaw Jr.** Toward enhanced P300 speller performance // J. Neurosci Methods. 2008. 15, 167 (1). P. 15–21.
45. **Каплан А. Я.** Нестационарность ЭЭГ: методологический и экспериментальный анализ // Успехи физиологических наук. 1998. 29 (3): 35–55.
46. **Каплан А. Я.** Проблема сегментного описания электроэнцефалограммы человека // Физиология человека. 1999: 25 (1). С. 125–133.
47. **Kaplan A.** et al. Nonstationary nature of the brain activity as revealed by EEG/MEG: methodological, practical and conceptual challenges // Signal processing. 2005. N 85. P. 2190–2212.
48. **Coyle D., McGinnity T. M., Prasad I.** // A Multi-Class Brain-Computer Interface with SOFNN-based Prediction // Pre-processing 2008 IEEE World Congress on Computational Intelligence. June 1–6, 2008. Hong Kong.
49. **Wang Y., Paiva A. R. C., Prenc J. C., Sanchez J. C.** A Monte Carlo Sequential Estimation of Point Process Optimum Filtering for Brain Machine Interfaces // Proc. of International Joint Conference on Neural Networks, Orlando, Florida, USA. August 2–17, 2007.
50. **Brodu N.** Multifractal Feature Vectors for Brain-Computer Interfaces // 2008 IEEE World Congress on Computational Intelligence. June 1–6, 2008. Hong Kong.
51. **Coyle D., Satti A., McGinnity T. M.** Predictive-Spectral-Spatial Preprocessing for a Multiclass Brain-Computer Interface // WCCI 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence July. 18–23. 2010. CCIB, Barcelona, Spain.
52. **Kai Keng Ang, Cuntai Guan, Kerry Lee, Jie Qi Lee, Shoko Nioka, Britton Chance.** Application of rough set-based neuro-fuzzy system in NIRS-based BCI for assessing numerical cognition in classroom // WCCI 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence. July, 18–23, 2010. CCIB, Barcelona, Spain.
53. **Buttger U.** Ocular implant: new applications of the image processing systems // 3D-Medssysteme für den industriellen Einsatz. Ind.-Anz. — 1996. — 118. № 16. — С. 138.
54. **Wyatt J., Rizzo J.** Ocular implants for the blind // IEEE Spectrum. — 1996. V. 33, № 5. — P. 47–53.
55. **Cortical** implantants for the blind // IEEE Spectrum. — 1996. V. 33, № 5. P. 59.
56. **Mostafawy Sina, Kermani Omid, Lubatschowski Holger.** Virtual eye: Retinal image visualisation of the human eye // IEEE Comput. Graph. and Appl. 1997. V. 17, N 1. — P. 8–12.
57. **Csapodi Marlon, Roska Tamas.** Dynamic analogic CNN algorithms for a complex recognition task — a first step towards a bionic eyeglass // Ant J. Circuit Theory and Appl. 1996. 24, № 1. P. 127–144.
58. **Eckmiller R.** Electronic Simulation of the Vertebrate Retina // IEEE Trans. Biomedical Engineering, BME-22. 1975. P. 305–311.
59. **Eckmiller R.** Towards Retina Implants for Improvement of Vision in Humans with Retinitis Pigmentosa — Challenges and first Results // Proc. WCNN '95 Washington, D. C., INNS Press. 1995. Vol. 1. P. 228–233.
60. **Eckmiller R.** Concerning the development of retina implants with neural nets // In: Proc. Int. Conf. Neural Inf. Proc. ICONIP '96, Hong Kong. 1996. Vol. 1. P. 21–28.
61. **Napp-Zinn H., Jansen M., Eckmiller R.** Recognition and tracking of impulse patterns with delay adaptation in biology-inspired pulse processing neural net (BPN) hardware // Biol Cybern. 1996. 74. P. 449–453.
62. **Eckmiller R., Becker M., Honermann R.** Dialog Concepts for Learning Retina Encoders // Proc. ICNN 97. Houston, Texas. June 1997.
63. **Eckmiller R.** Learning Retina Implants with epiretinal contacts // Ophthalmic Research. 1997. 29. P. 281–289.
64. **Eckmiller R.** Towards learning Retina implants for partial compensation of retinal degenerations // Proc. Int. Conf. Bio-computing and Emergent Computation (BCEC97), Skyvde, D. Lundh, B. Olsson, A. Narayanan, eds. World Scientific Publishers, Singapore. 1997. P. 271–281.
65. **Becker M., Eckmiller R.** Spatio-temporal filter adjustment from evaluative feedback for a Retina implant // Proc. ICANN 97 / G. Goos, ed. Springer. 1997. P. 1181–1186.
66. **Becker M., Braun M., Eckmiller R.** Retina Implant Adjustment with Reinforcement Learning // Proc. ICASSP'98, Seattle, Mai 1998.
67. **Becker M., Braun M., Eckmiller R.** Retina Encoder Inversion for Retina Implant Simulation // Proc. ICANN'98, Skuvde, (Niklasson, Boden, Ziemke, ed.) Springer, 1998. P. 791–796.
68. **Honermann R., Eckmiller R.** Implementation of Tunable Receptive Field (RF) Filters for Learning Retina Implants. // Proc. ICANN'98. Springer, 1998. P. 1015–1020.
69. **Eckmiller R., Neumann D., Baruth O.** Concerning the Mapping of ambiguous Retinal Output Vectors onto unambiguous Visual Percepts // IJCNN 2004. Budapest, Hungary. 23–29 July, 2004.
70. **Eckmiller R., Baruth O., Neumann D.** Neural Information Processing Efforts to Restore Vision in the Blind // ICONIP'04. Calcutta, 2004.
71. **Eckmiller R., Schatten R., Baruth O.** Portable Biomimetic Retina for Learning Perception-based Image Acquisition // Proc. of International Joint Conference on Neural Networks, Orlando, Florida, USA, August 12–17. 2007.
72. **Schwarz M.** et al. Hardware architecture of a neural net based retina for patients suffering from retinitis pigmentosa. // ICNN'96. 1996 IEEE Int. Conf. on Neural Network, Washington. 3–6 June. 1996. P. 653–658.
73. **Mokwa W., Trieu H. K., Ewe L.** Implantable Retina Simulator for a Retina Implant. // EUFIT98, Sept. 7–10. 1998. P. 1788–1791.
74. **Schwarz M.** et al. A single chip CMOS Image Sensors for a retina implant system // ISCAS'98. Proc. of the 1998 IEEE Int. Symp. On Circuits and Systems. 1998. V. 6. P. 645–648.
75. **Schwarz M., Hauschild R., Hosticka B. J., Huppertz J., Kneip T., Kolnsberg S., Ewe L., Trieu H. K.** Single-Chip CMOS Image Sensors for a Retina Implant System // IEEE Transactions on circuits and systems — analog and digital signal Processing. 1999. Vol. 45, N 7.
76. **Schwarz M., Bußmann A., Heimann T., Hosticka B. J., Huppertz J., Schrey O.** High Dynamic Range CMOS Image Sensors Featuring Multiple Integration and Auto-Calibration // ECCTD'01 — European Conference on Circuit Theory and Design, August 28–31, 2001, Espoo, Finland.
77. **Tohru Yagi, Nobuyasu Ito, Masami Watanabe, Yoshiaki Uchikawa.** A Computational Study on an Electrode Array in a Hybrid Retinal Implant // WCCI'98 IEEE World Congress on Computational Intelligence. 1998.

78. **Yuichiro Ito, Tohru Yagi, Hiroyuki Kanda, Saijiro Tanaka, Masami Watanabi, Yoshiki Uchikawa.** A Study on Culturing of Neurons on Micro-Electrode Array in Hybrid Retinal Implant // *ICONIP'99*.
79. **Liming Li, Tetsuya Yagi.** For the development of a retinal implant // *ICONIP'01* 2001.
80. **Tohru Yagi, Masami Watanabe, Yasushi Ohnishi, Shigeru Okuma, Toshiharu Mukai.** Biohybrid Retinal Implant: Research and Development Update in 2005 // *Proc. of the 2nd International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering* Arlington, Virginia. March 16–19, 2005.
81. **Shiro Usui.** Neuroinformatics in vision: VISIOME Platform/IJCNN 2002 // *The 2002 IEEE, World Congress on computational intelligence*.
82. **Shiro Usui.** Neuroinformatics in vision science: NRV project and VISIOME environment // *Proc. of the 9th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP'02)*.
83. **Shiro Usui.** Neuroinformatics in Vision Science: VISIOME Environment // *ICANN/ICONIP 2003*.
84. **Shiro Usui.** A Neuroinformatics Platform for Vision Science VISIOME // *Proc. of International Joint Conference on Neural Networks, Orlando, Florida, USA, August 12–17, 2007*.
85. **Zrenner E., Gabel V. P., Gekeler F., Graf H. G., Gruber H., Hammerle H., Kohler K., Nisch W., Sachs H., Sailer H., Shinoda K., Stett A., Wilhelm B.** From passive to active subretinal implants, serving as adapting electronic substitution of degenerated photoreceptors // *IJCNN'04*. Budapest. 2004.
86. **Greenberg R. J., Velte T. J., Humayun M. S., Scarlatis G. N., Eugene de Juan, Jr.** A Computational Model of Electrical Stimulation Retinal Ganglion Cell // *IEEE Transactions on biomedical Engineering*. Vol. 46, N 5. May 1999.
87. **Clements M., Vichichorn K., Liu W., Hughes C., McGucken E., DeMarco C., Humayun J. M.-M., De Juan E., Weiland J.** An implantable Power and Data Receiver and neuro-stimulus chip for a retinal prosthesis system // *JSCASS'99*, 1999.
88. **Liu W., Vichienchom K., Clements M., DeMarco S. C., Hughes C., McGucken E., Humayun M. S., de Juan E., Weiland J. D., Greenberg R.** A Neuro-Stimulus Chip with Telemetry Unit for Retinal Prosthetic Device // *IEEE Journal of solid-state circuits*. October 2000. Vol. 35, N 10.
89. **Humayun M., Yanai D., Greenberg R. J., Little J., Mech B. V., Mahadevappa M., Weiland J. D., Fuji G. Y., de Juan E.** Clinical Results with the Model IIRP Implant // *IJCNN'04*, Budapest, Hungary. 25–29 July, 2004.
90. **Weiland D., Humayun S.** Artificial Vision by Electrical stimulation of the Retina // *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. Montreal, Canada. July 31 – August 4, 2005.
91. **Fried S., Kubow T., Werblin F.** Complex synaptic activation of bipolar, amacrine and ganglion cells is elicited with biphasic electrical stimulation // *IJCNN'04*. Budapest, Hungary, 25–29 July, 2004.
92. **Werblin F. S., Jacobs A.** The Cellular Neural Network as a Retinal Camera for Visual Prosthesis // *IJCNN'97*, Houston. 1997.
93. **Wyatt J.** Design of a new subretinal implant for prosthetic vision // *IJCNN'04*, Budapest, Hungary. 25–29 July, 2004.
94. **Kaibao Nie, Ning Lan, Shangkai Gao.** Wavelet-based feature extraction of speech signal for cochlear implants // *Proc. of the First Joint BMES/EMBS Conference Serving Humanity, Advancing Technology*. Atlanta, GA, USA. Oct. 13–16, 1999.
95. **White M. W., Ochs M. T., Merzenich M. M., Schubert E. D.** // Speech recognition in Analog Multi-channel cochlear prosthesis: Initial experiments in Controlling Classifications // *IEEE Trans. On Biomedical Eng.* October, 1990. Vol. 37, N 10.
96. **Tong Y. C., Chang J. S., Harrison J. M., Hugien J., Clark G. M.** Two Speech Proc. Schemes For The University of Melbourne Multi-Channel Cochlear Implant Prosthesis // *JSCAS'89*.
97. **Jun Yao, Zhang Y. T.** The Application of Bionic Wavelets and Neural Network to Speech Recognition in Cochlear Implants // *5th World Multi-conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*. 2001.
98. **Jabri M. A., Wang R. J.** A novel channel Selection system in Cochlear Implants using artificial neural network // *Proc. of the 1995 Conference "Advances in neural information processing systems"*. 1995. 8.
99. **Intrator N., Tajchman G.** Supervised and Unsupervised Feature Extraction From a Cochlear Model for Speech Recognition, *Neural Networks For Signal Processing // Proc. of the 1991 IEEE Workshop*.
100. **Fontaine R., Pounnehdi S., Mouine J., Duval F., Wei M.** Cochlear Implant Stimulation Based On Vector Quantization // *1995 IEEE-EMBC and CMBEC' Theme 7: Instrumentation*.
101. **Kais Gadhomi, Jaouhar Mouine, Zied Chtourou.** A cochlear Prosthesis Stimulation Algorithm Targeting to Minimize the Rehabilitation Phase and Enhance Speech Comprehension // *Proc. of the 22nd Annual EMBS International Conference*, July 23–28, 2000, Chicago IL.
102. **Sarpeshkar R., Lyon R. D., Mead C. A.** An analog VLSI cochlea with new transconductance amplifiers and nonlinear gain control // *1996 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, JSCA'96*, 12–15 May, 1996.
103. **Meyer-Bäse Ü., Meyer-Bäse A., Schleich H.** Auditory Neuron Models for Cochlear Implants // *SPIE*. 1997. Vol. 3077.
104. **Ižák R., Zahn T., Trott K., Paschke P.** A mixed-signal neural network for auditory attention // *Microneuro'97*, Dresden, 1997.
105. **Ižák R., Scarbata G., Paschke P.** Sound source localization with integrate and fire neural system // *7th Int. Conf. on Microelectronics for neural, fuzzy and bioinspired systems, Microneuro'99*. Granada, Spain. April 7–9, 1999.
106. **Spelman F. A.** The Past, the Present and the Future of Cochlear Prosthesis // *IEEE Engineering in medicine and biology*. 1999. May–June.
107. **Graupe P., Liu R.** A neural network approach to decomposing surface EMG signals // *Proc. 32nd Midwest Symp. Circuits and Syst.*, August 14–16, 1989. New York (N. Y.). 1990. Vol. 2. P. 740–743.
108. **Liu Ruyewen, Huang Qiu, Graupe Daniel.** A neural network for noninvasive decomposition of surface EMG signals using Gaussian nodes // *IEEE Int. Symp. Circuits and Syst.*, New Orleans, La, May 1–3, 1990. Vol. 3. New York (N. Y.). 1990. P. 2053–2056.
109. **Panayides K., Sehiras C., Pattiehis C., Theodosiou A., Middleton L.** Genetics-based-machine-learning in clinical electromyography // *Artif. Neural Networks: Proc. Int. Conf.*, Espoo, 24–28 June, 1991. Amsterdam etc., 1991. Vol. 2. P. 1625–1628.
110. **Patichis C. S., Charalambous C., Schims C. M., Midotston L. T.** Diagnosis using conjugate gradient backpropagation neural network learning algorithm // *Artif. Neural Networks: Proc. Int. Conf.*, Espoo, 24–28 June, 1991. Amsterdam etc., 1991. Vol. 2. P. 1621–1624.
111. **Costa J. D., Gander R. E.** MES classification using artificial neural networks and chaos theory // *Proc. Int. Jt. Conf. Neural Networks*, Nagoya, Oct. 25–29, 1993. *IJCNN'93*, 1993. Vol. 3. P. 2243–2246.
112. **Zalzala A. M. S., Chaiyaratana N.** Mioelectric signal classification using evolutionary hybrid RBF-MIP networks // *Congress on Evolutionary Computation*, 2000.
113. **Yuji Matsumura, Yasue Mitsukura, Minoru Fukumi, Norio Akamatsu, Yoshihiro Yamamoto, Kazuhiro Nakaura.** Recognition of EMG signal patterns by neural networks // *ICONIP'02*, Singapore, 2002.
114. **Hou Y., Zurada J. M., Karwowski W.** Prediction of EMG signals of trunk muscles in manual lifting using a neural network model // *IJCNN'2004*, Budapest, 2004.
115. **Reischl M., Gröll L., Mikut R.** Optimized classification of multi-class problems applied to EMG-control of hand prostheses // *IJCNN'04*, Budapest, 2004.
116. **Liu R., Tong L., Deng J.** An on-line learning neural network for discrimination of walk functions in paraplegics. // *IEEE Int. Symp. Circuits and Syst.*, Portland, Ore., May 8–11, 1989. Vol. 2. — New York (N. Y.), 1989. — P. 1017–1020.
117. **Hiraiwa Akira, Uchida Noriyoshi, Sonehara Noboru.** Распознавание образов электромиографии с помощью нейронной сети // *NTT R and D. — Elec. Commun. Lab. Techn. J. — 1993*. 42, N 6. — P. 765–770.
118. **Jсами Kajitani, Masahiro Murakawa, Daisuke Nishikawa, Hiroshi Yokoi, Nobuki Kajihara.** An evolvable Hardware chip for prosthetic hand controller // *7th Int. Conf. on Microelectronics for Neural, Fuzzy and bio-inspired Systems, Microneuro'99*, Granada, Spain, 1999.
119. **Arthur T. C., Kirsch Robert F.** EMG-based prediction of shoulder and elbow kinematics in able-bodied and spinal cord injured individuals // *IEEE Rehabil. Eng.* 2000. 8, N 4. P. 471–480.

120. Kipke D. R. Implantable probe systems for cortical neuroprostheses // IJCNN'04, Budapest, Hungary. 25–29 July, 2004.

121. Zhang Dingguo, Zhu Kuanyi. Neural Network Control for Leg Rhythmic Movements via Functional Electrical stimulation // IJCNN'04, Budapest, Hungary, 2004.

122. Berger T. W. Implantable Biomimetic microelectronics for the replacement of hippocampal memory function lost due to damage or disease // IJCNN'04, Budapest, Hungary, 25–29 July, 2004.

123. Berger T. W., Granacki J. J., Marmarelis V. Z., Tanguay A. R., Deadwyler S. A., Gerhardt G. A. Implantable Biomimetic microelectronics as neural prostheses for lost cognitive function // Proceedings of International Joint Conference on neural networks, Montreal, Canada, July 31 — August 4, 2005.

124. Hincapie J. G., Brana D., Chadwick E., Kirsch R. F. Neural network controller for an upper extremity neuroprosthesis // Proc. of the 2nd Intern. IEEE EMBS, Conf. on Neural Engineering, Arlington, Virginia, March 16–19 2005.

УДК 004.8

В. Ю. Осипов, д-р техн. наук, проф.,
Санкт-Петербургский институт
информатики и автоматизации РАН,
e-mail: osipov_vasily@mail.ru

Устойчивость рекуррентных нейронных сетей с управляемыми синапсами

Рассмотрен подход к обеспечению устойчивости рекуррентных нейронных сетей (РНС) с управляемыми синапсами. Уточнены модели управляемых синапсов и устойчивости РНС. Исследованы возможные варианты торможения нейронов в РНС. Приведены результаты математического моделирования. Даны практические рекомендации по обеспечению устойчивости РНС.

Ключевые слова: рекуррентная нейронная сеть, управляемые синапсы, торможение, устойчивость

Введение

Успешность решения многих прикладных задач с применением искусственных рекуррентных нейронных сетей (РНС) зависит от устойчивости их функционирования.

Достигнутые в настоящее время результаты [1–6] по обеспечению этой устойчивости свидетельствуют, что пока не удалось найти баланс между возбуждающими и тормозящими воздействиями в РНС для общего случая. Существенное преобладание возбуждения над торможением в РНС может приводить к быстрой перегрузке сетей. Наоборот, чрезмерное торможение обнуляет сеть, исключает свободное протекание в ней процессов, ассоциацию сигналов друг с другом.

Одна из причин этого заключается в несовершенстве используемых моделей торможения нейронов в РНС. Довольно часто все торможение сводят к заданию и сохранению отрицательных весов некоторой совокупности синапсов [1–3]. При этом ограничивают возможности самонастройки РНС. Применяют для торможения и динамические си-

напсы со своими правилами функционирования [4–6]. В ряде случаев в РНС вводят тормозные нейроны, отвечающие только за торможение.

К общим недостаткам этих моделей следует отнести ограниченные возможности по учету состояний невосприимчивости нейронов после возбуждения и текущей нагрузки сети.

В статье [7] рассмотрена РНС с управляемыми синапсами и состояниями невосприимчивости нейронов. Однако аспекты формирования тормозящих воздействий в такой РНС и ее устойчивости оставлены без должного внимания.

Раскрывается подход к обеспечению устойчивости РНС с управляемыми синапсами.

Постановка задачи

Известна двухслойная рекуррентная нейронная сеть с управляемыми синапсами [7]. Ее структура на уровне отдельных нейронов может быть представлена в виде рис. 1, где $1.1...1.N$, $2.1...2.N$ — нейроны, соответственно, первого и второго слоя; N — число нейронов в каждом слое; $E3$ — единичная задержка. Синапсы нейронов на рис. 1 отображены в виде овалов. Нейроны этой сети могут находиться в трех состояниях: ожидания, возбуждения и невосприимчивости.

Каждый нейрон сети связан только с нейронами взаимодействующего слоя. Связи между нейронами одного и того же слоя отсутствуют. Любой нейрон сети переходит в состояние возбуждения, только если в состоянии ожидания суммарный потенциал на его входе превысит порог возбуждения. За возбуждением следует состояние невосприимчивости, в котором каждый нейрон находится больше, чем время задержки единичных образов в образуемых двухслойных контурах сети.

Управление синапсами нейронов в зависимости от состояний слоев сети позволяет осуществлять сдвиги совокупностей единичных образов вдоль слоев, в результате чего слои РНС разбиваются на логические поля. Информация в сеть вводится через первое поле первого слоя, а снимается с последнего поля первого или второго слоя. За счет сдвигов

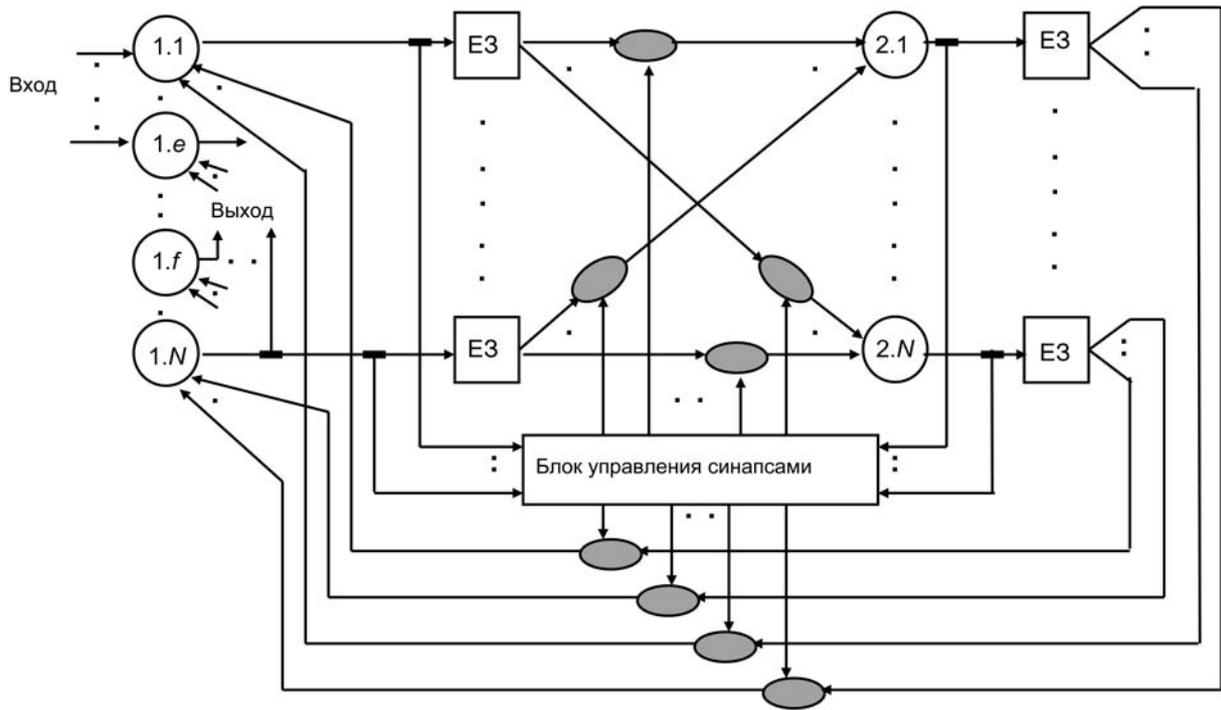


Рис. 1. Рекуррентная нейронная сеть с управляемыми синапсами

вводимые в сеть последовательные совокупности единичных образов преобразуются в параллельные совокупности и продвигаются вдоль слоев сети в заданном направлении. При этом реализуются ассоциации между всеми параллельными единичными образами. От того, каким образом связываются друг с другом единичные образы в РНС и какой след они оставляют, зависят возможности сети по интеллектуальной обработке информации. Связывание может быть как положительным, так и отрицательным относительно изменения весов синапсов нейронов. Это связывание не должно приводить к перегрузке сети и потери возможности ассоциативного вызова сигналов из ее памяти.

Необходимо разработать подход к обеспечению устойчивости этой РНС, учитывающий данные обстоятельства.

Модель управляемых синапсов

В интересах разработки такого подхода уточним модель управляемых синапсов нейронов сети. Рассмотрим отношения между любыми двумя связанными нейронами сети. Для удобства в дальнейшем их будем называть первым и вторым нейроном. Несмотря на наличие у каждого из нейронов трех состояний, все их отношения, с точки зрения изменения весов синапсов, предлагается свести к четырем случаям. В первом случае активизированный первый нейрон совместно с другими возбуждает второй нейрон. Вес синапса, связывающего первый нейрон со вторым, увеличивается. Во вто-

ром случае возбужденный первый нейрон не может активизировать второй нейрон из-за нахождения его уже в невосприимчивом состоянии. При этом вес синапса снижается. В третьем случае второй нейрон возбуждается за счет других нейронов. Первый нейрон в этом процессе не участвует, однако вес его синапса предлагается также снижать. Такое торможение в дальнейшем будем называть встречным. Четвертый случай объединяет все другие возможные сочетания состояний первого и второго нейронов, в которых вес рассматриваемого синапса не изменяется.

Если принять в качестве изменяемого параметра — веса синапса — число запомненных им единичных образов, то с учетом этих случаев его можно определить как

$$g_{t+1} = g_t + b_{t+1}(x_p, y_p, z_{t+1}), \quad (1)$$

где g_t — число запомненных синапсом единичных образов на предыдущем временном такте; $b_{t+1}(x_p, y_p, z_{t+1})$ — эффект от единичного взаимодействия нейронов на $(t + 1)$ -й момент времени; x_p, y_t — состояния соответственно первого и второго нейронов на момент t ; z_{t+1} — состояние второго нейрона на $(t + 1)$ -й момент.

При этом вес любого синапса в зависимости от параметра g_t согласно [8] может быть рассчитан по формуле

$$w_t = \frac{1}{1 + \alpha h \sqrt{r_t(X_p, Y_t)}} \left(\frac{2}{1 + \exp(-\gamma g_t)} - 1 \right). \quad (2)$$

В формуле (2) первый множитель представляет собой функцию ослабления единичных образов в зависимости от $r_i(X_p, Y_p)$ — удаленности связываемых через синапсы нейронов на текущий момент времени (через изменение $r_i(X_p, Y_p)$ осуществляются сдвиги совокупностей единичных образов вдоль слоев); X_p, Y_p — состояния соответственно первого и второго слоев РНС на момент времени t ; α — положительный коэффициент; h — степень корня. Второй множитель в формуле (2) — это весовой коэффициент синапса, в котором $\gamma = \text{const}$. При отрицательных значениях g_i вес синапса также отрицателен.

Значение веса синапса в соответствии с выражением (2) может лежать в пределах от -1 до $+1$.

Веса всех синапсов, отвечающих за короткие связи, для которых $r_i(X_p, Y_p) = 0$, в анализируемой РНС только растут и стремятся к единице. В дальнейшем они мало сказываются на поведении сети. Это можно сказать и о весах синапсов, связывающих постоянно конфликтующие нейроны, среди которых первый возбужден, а второй находится в состоянии невосприимчивости. Эти конфликты в РНС обеспечивают, прежде всего, сдвиги совокупностей единичных образов вдоль ее слоев. Веса синапсов нейронов, задействованных в постоянных конфликтах, стремятся к значению минус единица. С учетом этого основная роль в запоминании информации в анализируемой РНС и в ассоциативном вызове ее из памяти сети принадлежит синапсам, реализующим взаимные связи между различными единичными образами в сети.

Рассмотрим с учетом отмеченных особенностей взаимодействия нейронов условия обеспечения устойчивости исследуемой РНС.

Модель устойчивости РНС

Для предоставления РНС широкой свободы поведения и исключения ее перегрузки сеть должна быть равномерно устойчивой. Если текущее состояние РНС характеризовать числом одновременно возбужденных нейронов $n(t)$, то условия ее устойчивости можно записать в классическом виде [3]. Сеть равномерно устойчива, когда для любого положительного ε существует такое положительное δ , что $\|n(0) - \bar{n}\| < \delta$ и $\|n(t) - \bar{n}\| < \varepsilon$ при $t > 0$, где \bar{n} — равномерно устойчивое (равновесное) состояние сети; $n(0)$ — состояние сети на момент $t = 0$. Согласно этим условиям сеть должна находиться в окрестности состояния \bar{n} , если начальное состояние сети близко к равновесному.

Определимся со значениями \bar{n} , ε , δ . В РНС с $2N$ нейронами одновременно не может возбуждаться больше чем N нейронов. Число N возбужденных нейронов — это предельная нагрузка для сети. При такой нагрузке во всех случаях сеть теряет воз-

можности по ассоциативному вызову из ее памяти других сигналов. Сеть на очередном цикле просто обнулится, так как время задержки единичных образов в ее контурах меньше времени невосприимчивости нейронов.

Ассоциативный вызов возможен, когда есть резервы оперативной памяти сети. Иначе говоря, между загрузкой сети и резервами ее оперативной памяти на нейронах должен соблюдаться некоторый баланс. Полагая, что он должен составлять половину предельной загрузки, получаем $\bar{n} = N/2$. Значения ε , δ должны быть соизмеримы с $\bar{n} = N/2$, но быть меньше него. В этом случае мы ориентируемся только на четверть от всех $2N$ нейронов сети.

Для того чтобы обеспечить выполнение всех приведенных условий, наряду с реализацией сдвигов совокупностей единичных образов вдоль слоев РНС и осуществлением встречного торможения нейронов предлагается также регулировать ее нагрузку.

Для регулировки нагрузки достаточно правую часть выражения (2) поделить на функцию $L(t) = 1 + \eta n(t)$, где η — константа. Такая регулировка эквивалентна изменению порога возбуждения нейронов. При увеличении числа возбужденных в сети нейронов порог возбуждения также возрастает, что снижает их воздействие на другие не возбужденные нейроны.

Результаты моделирования

Для исследования устойчивости рассматриваемой РНС использовалась ее программная модель с числом нейронов в каждом слое $N = 900$. С учетом задаваемых сдвигов совокупностей единичных образов слои сети логически разбивались на поля размером 6×6 нейронов. Информация в сеть вводилась через первое поле ее первого слоя, а снималась с выхода 20-го поля также первого слоя. Длительность сигналов составляла от 8 до 36 тактов. За счет сдвигов осуществлялась строчная запись информации на слои нейронов. С каждым вторым шагом записанная информация сдвигалась на одно поле. После полного ввода в сеть сигналы прогонялись по всему пространству взаимодействующих слоев и анализировались как на промежуточных полях, так и на выходном поле. Эффект $b_{i+1}(x_p, y_p, z_{i+1})$ для первого случая единичного взаимодействия нейронов равнялся единице, для второго — минус единица; для третьего (встречного торможения) — $d = -(0,2\dots 0,5)$.

Пример поведения такой уже обученной РНС при вводе в нее последовательно через первое поле частичной информации о буквах "С", "Е", "Б" из слова "СЕТЬ" приведен на рис. 2. Этот рисунок отражает состояния первого слоя сети через каждые два такта ее работы. На рис. 2, а показано состояние этого слоя при вводе в сеть частичной инфор-

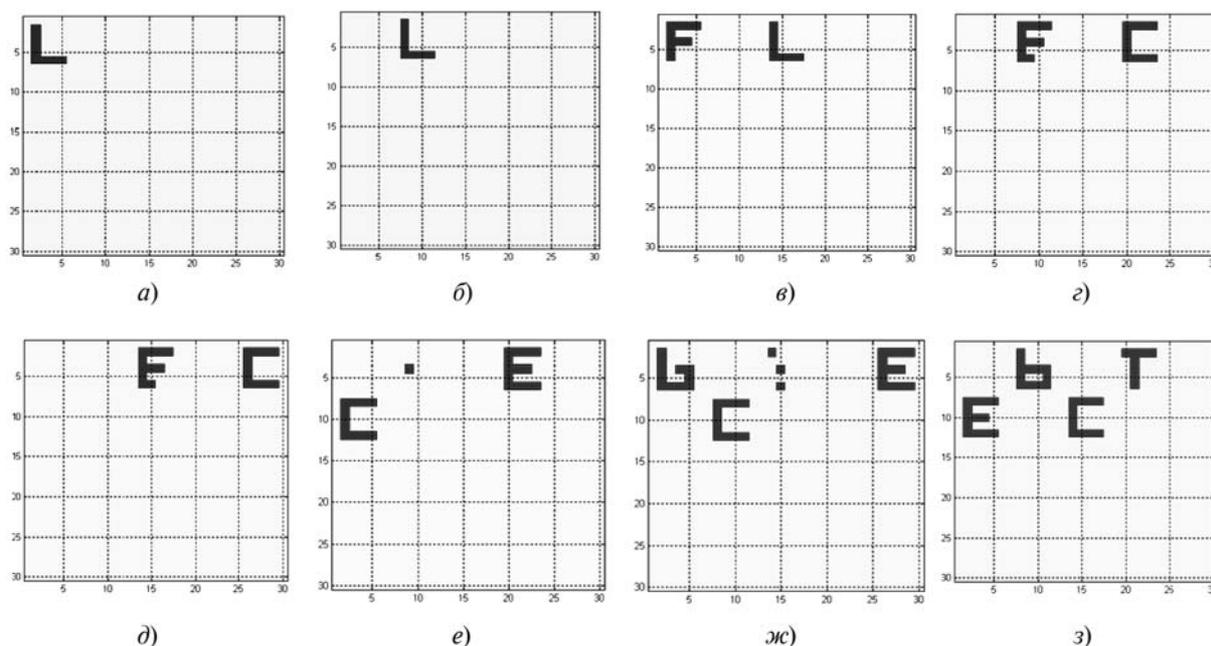


Рис. 2. Состояние первого слоя нейронной сети

мации о букве "С", а на рис. 2, б — его состояние после первого сдвига совокупностей единичных образов вправо.

Рис. 2, в соответствует состоянию первого слоя сети, когда в нее введена частичная информации о букве "Е". Следующие два состояния слоя после очередных сдвигов приведены, соответственно, на рис. 2, г, д. Заметим, что информация о букве "Т" в сеть не вводилась. Затем следует состояние слоя после сдвига совокупностей единичных образов вправо с переносом на вторую строку (рис. 2, е). Особенностью состояния на рис. 2, ж выступает наличие ввода в сеть информации о "Б" и уже частичное восстановление пропущенной буквы "Т". Буквы "С" и "Е" были восстановлены еще раньше (рис. 2, г, е). Последнее состояние (рис. 2, з) свидетельствует о полном восстановлении сетью введенного в нее слова "СЕТЬ", искаженного на 34 %.

Вместо букв могут выступать различные другие совокупности единичных образов, несущие информацию о пространственных, частотных, амплитудных и фазовых характеристиках предварительно преобразованных входных сигналов [9].

Зависимость числа $n(t_k)$ возбужденных нейронов в сети от времени для рассмотренного случая показана на рис. 3 (кривая 2).

Кривая 1 на рис. 3 соответствует вводу и обработке в сети сообщения с изначально "не нулевым" ее состоянием, а кривая 3 — одному из процессов обучения сети. Спад всех кривых на рис. 3 объясняется тем, что введенные в сеть сообщения покидают ее, однако оставляют в сети следы о своем

пребывании, через изменения весов синапсов нейронов. При этом текущее число устойчиво обрабатываемых в сети нейронов в рассматриваемом случае было больше двух. Ни в одном из исследуемых случаев сеть не перегружалась.

Установлено, что если вводимые в различные моменты времени в сеть сигналы не пересекаются друг с другом в пространстве ее входа (входного поля), то веса синапсов, реализующих взаимные связи между различными единичными образами в сети, только растут. Снижаются лишь веса си-

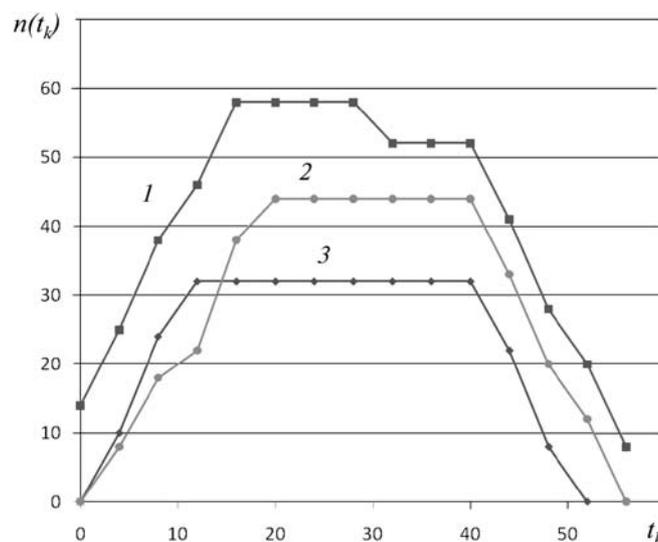


Рис. 3. Изменение нагрузки сети

напсов, не активизируемых нейронов, связанных с возбуждаемыми нейронами.

При наличии рассматриваемого пересечения веса ряда синапсов, реализующих взаимные связи, снижаются. Это торможение обеспечивает сохранение структур пересекающихся сигналов при прохождении по сети. На рис. 4 показано, как изменяется суммарный положительный $W^+(t_k)$ и суммарный отрицательный $W^-(t_k)$ вес всех синапсов, реализующих активные взаимные связи, при обработке двух различных сигналов в сети. Значения суммарных весов приведены в условных единицах. Величины $W^+(t_k)$ и $W^-(t_k)$ могут расти только до некоторых пределов. Это обусловлено тем, что возможные значения весов отдельно взятых синапсов ограничены интервалом от минус до плюс единицы.

Исследовалась также возможность прямого опережающего торможения, снижения весов синапсов, по которым возбужденные нейроны не могут активизировать другие нейроны. Оказалось, что такое торможение быстро приводит к затормаживанию всей сети, что неприемлемо.

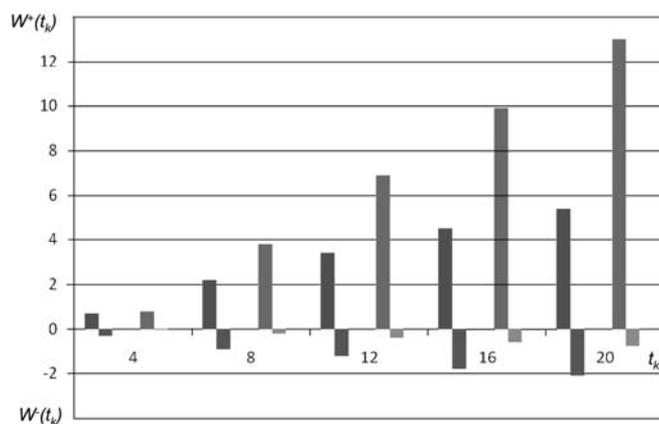


Рис. 4. Проявление встречного торможения нейронов

Выводы

Таким образом, торможение в РНС играет одну из решающих ролей в обеспечении их устойчивого функционирования. При возбуждении нейронов с их стороны предлагается осуществлять встречное торможение для других нейронов, не принимавших участие в этом возбуждении, но связанных с первыми.

Предельная нагрузка для двухслойной рекуррентной нейронной сети с управляемыми синапсами не может превышать половины ее нейронов. Для исключения перегрузки РНС рекомендуется дополнительно увеличивать ослабление синапсов или повышать порог возбуждения нейронов с ростом числа возбужденных элементов сети. Это позволяет существенно расширить возможности РНС по интеллектуальной обработке различных сигналов.

Список литературы

1. **Галушкин А. И.** Теория нейронных сетей. Кн. 1: учеб. пособие для вузов / Общая ред. А. И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2000. 416 с.
2. **Осовский С.** Нейронные сети для обработки информации: Пер. с английского И. Д. Рудницкого. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
3. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс. 2-е изд.: Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. 1103 с.
4. **Remme M. W. H., Wadman W. J.** Control of a local neural network by feedforward and feedback inhibition // *Neurocomputing*. 2004. N 58–60. P. 683–689.
5. **Mao Z.-H., Massaquoi S. G.** Dynamics of Winner-Take-All Competition in Recurrent Neural Networks With Lateral Inhibition // *IEEE Transactions on Neural Networks*. 2007. Vol. 18. N 1. January. P. 55–69.
6. **Mehrtash N., Jung D., Klar H.** Image preprocessing with dynamic synapses // *Neural Comput & Applic.* 2003. N 12. P. 33–41.
7. **Осипов В. Ю.** Рекуррентная нейронная сеть с управляемыми синапсами // *Информационные технологии*. 2010. № 7.
8. **Осипов В. Ю.** Ассоциативная интеллектуальная машина // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2010. № 2.
9. **Осипов В. Ю.** Прямое и обратное преобразование сигналов в ассоциативных интеллектуальных машинах // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2010. № 7. С. 27–32.

И. Л. Каширина, канд. техн. наук, доц.,
Я. Е. Львович, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
А. А. Тузиков, аспирант,
 Воронежский государственный
 технический университет,
 e-mail: kash.irina@mail.ru

Нейросетевое резервирование дублированных измерений параметров при наземных огневых испытаниях жидкостных ракетных двигателей

Рассматривается проблема повышения надежности при разработке стендовых информационно-управляющих систем для наземных огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей. Предлагается реализация системы регулирования по мажоритарному принципу "два из трех" для датчиков обратной связи. В качестве третьего датчика используется нейронная сеть в виде многослойного перцептрона.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, серийные огневые испытания, нейросетевая модель

Общие сведения о стендовых информационно-управляющих системах и методах резервирования

При наземных огневых испытаниях актуальной проблемой является достоверная оценка характеристик жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), которая зависит от качества широкого класса параметров, характеризующих работу двигателя и различных управляющих систем. Решение этой проблемы невозможно без создания стендовых информационно-управляющих систем (ИУС). ИУС представляет собой совокупность средств измерений и устройств автоматики, объединенных общим алгоритмом функционирования и предназначенных для получения информации от двигателя и стендовых систем, ее преобразования для непосредственного восприятия человеком, а также использования для управления режимами двигателя [1]. При этом стендовая ИУС должна обеспечивать высокую точность и повышенную надежность средств измерения.

На рис. 1 представлена типизированная структурная схема измерительного тракта стендовой ИУС.

В зависимости от назначения измерительный тракт можно использовать в ИУС как для получения информации от стендовых систем и ЖРД, так

и для формирования обратной связи в системах регулирования параметров двигателя. Как видно из рис. 1, измерительный тракт состоит как минимум из семи звеньев, отказ любого из которых приводит к потере информационного сигнала и, как следствие, невыполнению программы испытания. Как следует из работы [2], на долю отказов измерительных трактов в системах автоматизации приходится 85 % всех отказов, поэтому при разработке стендовых ИУС предъявляются жесткие требования к надежности.

Практически единственным и широко используемым методом кардинального повышения надежности систем автоматизации является резервирование. Основой метода резервирования является идея замены отказавшего элемента резервным. В промышленной автоматизации наибольшее распространение получили следующие методы резервирования: резервирование замещением ("горячее" резервирование) и метод мажоритарного голосования.

Отличительной особенностью систем резервирования замещением является необходимость аб-

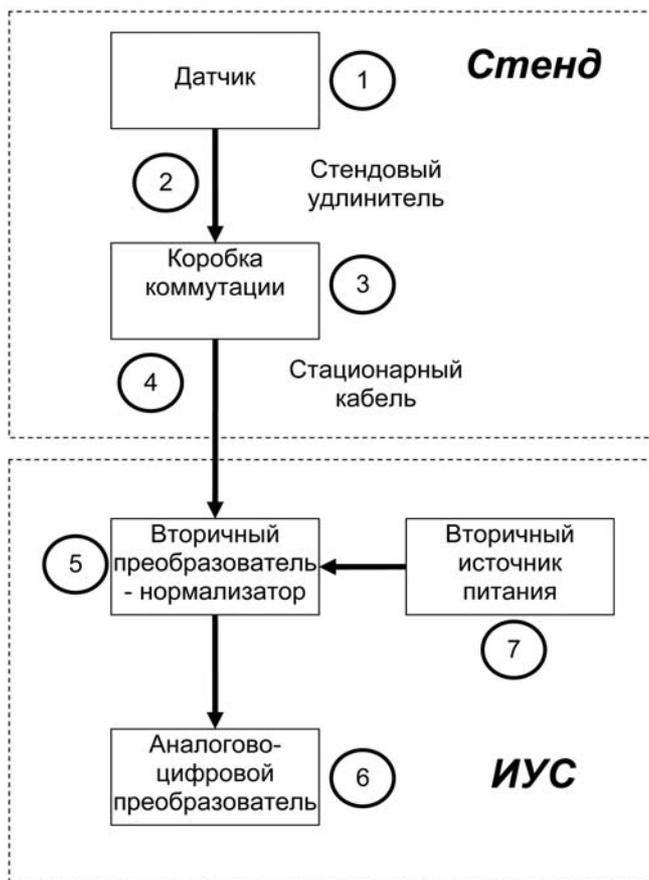


Рис. 1. Структура измерительного тракта

солютно надежной системы контроля работоспособности как основного, так и резервного элементов, абсолютно надежного блока переключения на резерв, а также шины синхронизации вычислительных ядер ИУС. При этом важным параметром является время переключения на резерв. В качестве процедур контроля работоспособности могут использоваться такие параметры, как целостность линии связи, ток короткого замыкания, выход за границы динамического диапазона [3] и др. Достоинством систем резервирования замещением является минимальная избыточность ("один из двух" — 1002 по стандарту МЭК 61508 [4]).

В отличие от систем резервирования замещением в системах мажоритарного голосования невозможно выделить основные и резервные элементы. Схема голосования выбирает один сигнал из нескольких, при этом для реализации мажоритарного принципа общее число голосов должно быть нечетным. Наиболее часто в промышленности используется метод "два из трех" (2003 по стандарту МЭК 61508 [4]). Уникальным свойством систем с голосованием является непрерывность функционирования и возможность резервирования всего тракта измерения.

В связи с высокой стоимостью испытаний ЖРД и повышенными требованиями к коэффициенту готовности систем управления резервирование с мажоритарным голосованием является наиболее оптимальным в стендовых ИУС.

Системы регулирования в стендовых ИУС

Наиболее важными системами регулирования параметров ЖРД для стендовых ИУС являются: система регулирования тяги ЖРД и система автоматического поддержания давлений в баках компонентов ракетного топлива.

Система регулирования тяги ЖРД. Жидкостный ракетный двигатель является главным исполнительным органом системы управления космическим летательным аппаратом. Кроме управления вектором тяги, ЖРД выполняет функцию устройства, обеспечивающего одновременное опорожнение баков с компонентами топлива [5]. Для этого ЖРД оснащается специальной системой опорожнения баков (СОБ).

Система СОБ, управляя дросселем, установленным в

одном из основных трактов ЖРД, изменяет соотношение компонентов в камере сгорания, тем самым меняя темп их расходования.

Другой системой, изменяющей режим работы ЖРД, является система регулирования кажущейся скорости (РКС), которая использует ЖРД как исполнительный орган, меняющий уровень тяги [5].

К сожалению, прямое измерение тяги не всегда возможно в наземных стендовых условиях, поэтому ее часто определяют косвенным методом через давление в камере сгорания p_k [1]. При этом в процессе огневого испытания проводится проверка работы ЖРД на нескольких режимах по давлению в камере сгорания p_k и соотношению компонентов k . Пример регулирования давления в камере сгорания по обратной связи от датчика давления (p_k) показан на рис. 2.

Обычно датчик давления в камере сгорания входит в состав штатной (объектовой) оснастки ЖРД и выполнен по дублированной схеме. Для реализации мажоритарного метода резервирования при регулировании параметра p_k необходима установка третьего датчика. Однако это не всегда возможно, так как требуется установка дополнительного измерительного штуцера, что может являться нарушением технических условий.

Система автоматического поддержания давлений в баках компонентов ракетного топлива. В процессе огневых испытаний ИУС должна обеспечивать автоматическое управление арматурой стенда: пневмоклапанами (ПК), электропневмоклапанами (ЭПК) и др., в целях поддержания давления на входе в ЖРД по линиям окислителя и горючего. Контроль и изменение давления компонентов ра-

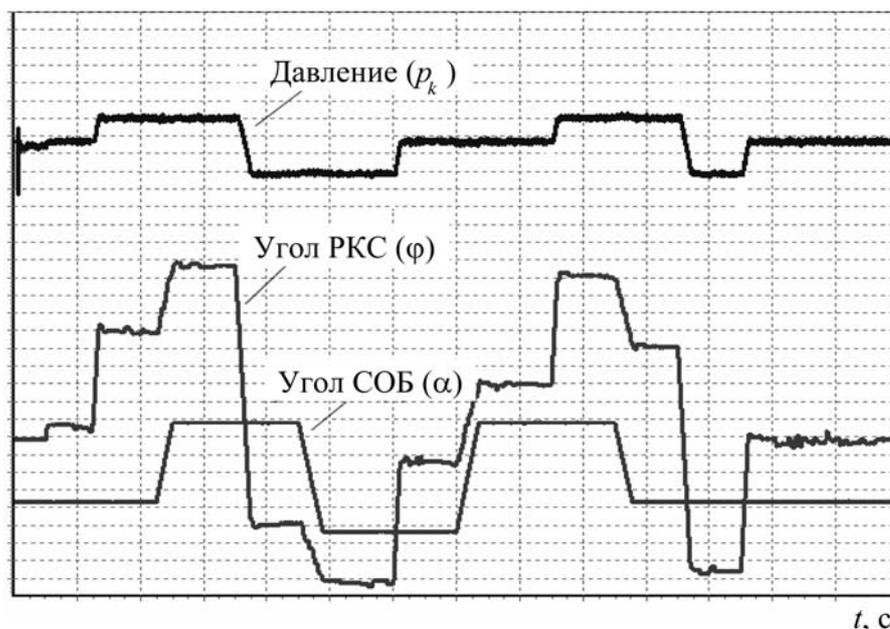


Рис. 2. Процесс регулирования давления в камере сгорания

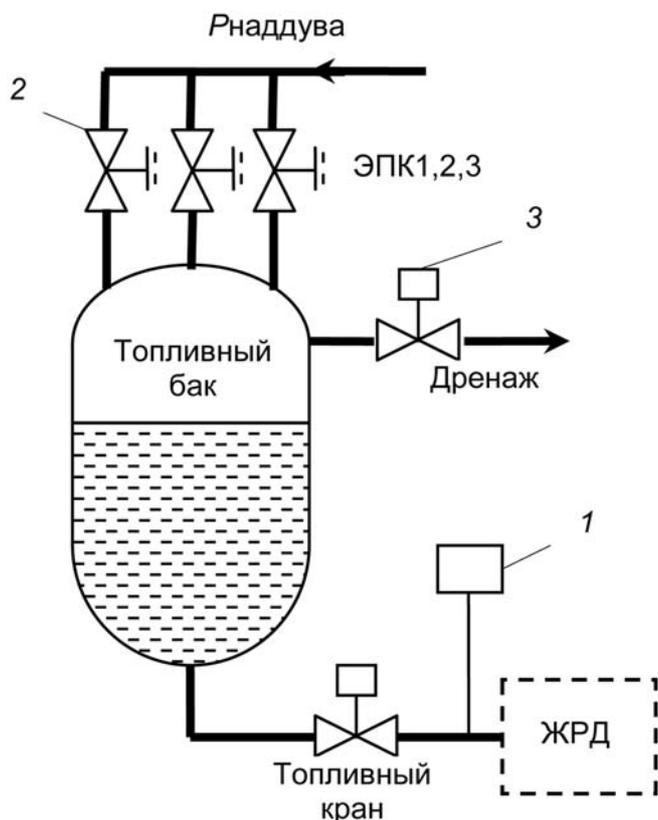


Рис. 3. Система управления давлением в топливном баке

кетного топлива осуществляются с помощью блоков управления наддувами (набор давления) и дренажами (сброс давления). Система управления давлением в топливном баке представлена на рис. 3.

Управление давлением компонентов топлива осуществляется посредством открытия необходимого числа ЭПК гребенки наддува 2 и положением ПК дренажа 3 по обратной связи от датчика дав-

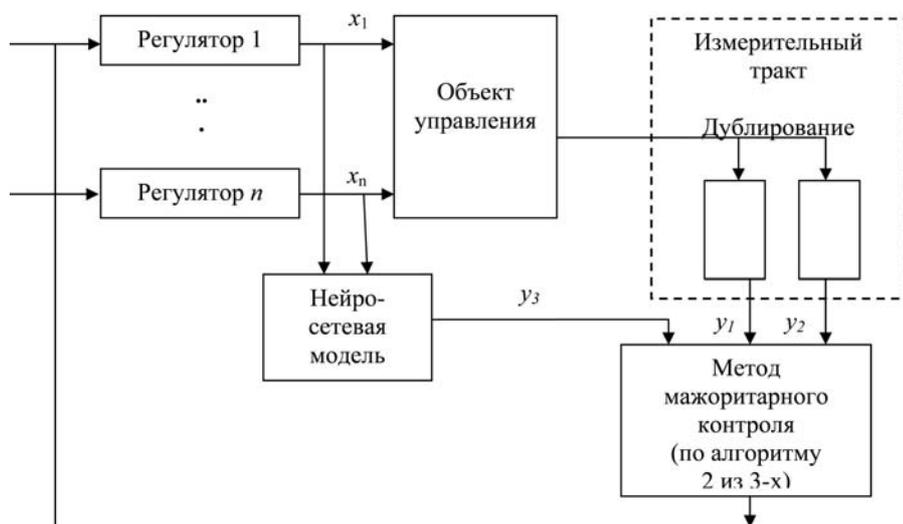


Рис. 4. Обобщенная схема организации системы регулирования с использованием нейросетевой модели

ления 1. В данном случае также целесообразно применять мажоритарный принцип резервирования датчиков обратной связи, особенно при использовании криогенных компонентов топлива (жидкий кислород, жидкий водород). Однако это связано со значительными экономическими затратами вследствие следующих причин.

1. Топливных баков может быть несколько (основной бак горючего, основной бак окислителя, пусковые баки горючего и окислителя).

2. Регулирование давления в баке по обратной связи от датчика на входе в двигатель проводится только после запуска. Во время предпусковой подготовки набор давления осуществляется по датчику, установленному до расходного крана. В этом случае резервировать нужно и его.

3. Требуется значительное число дополнительных каналов измерения, особенно при использовании потенциометрических датчиков с четырехпроводной схемой подключения (при этом на каждый измерительный канал требуется дополнительный канал контроля электропитания). Проблема нехватки измерительных каналов возникает особенно остро при частичной модернизации устаревших ИУС, для которых изначально резервирование не предусматривалось.

Использование нейросетевой модели в системах регулирования стеновых ИУС

При нецелесообразности или невозможности введения дополнительных измерительных каналов (трактов) в стеновых ИУС необходимую избыточность резервирования можно организовать с помощью нейросетевых моделей датчиков обратной связи. В этом случае для реализации резервирования 2оо3 необходимо наличие только двух реаль-

ных датчиков и нейросетевой модели в качестве третьего. При этом можно совместить достоинства систем резервирования 1оо2 и 2оо3 — минимальную избыточность и непрерывность функционирования. Кроме того, использование нейросетевой модели относительно безопасно, так как даже в случае отказа ее алгоритмов система резервирования автоматически деградирует от 2оо3 к 2оо2. Обобщенная схема организации системы регулирования с использованием нейросетевой модели представлена на рис. 4.

При создании нейросетевой модели основной задачей является поиск взаимосвязи между входами и выходом. В нейросетевой

модели для системы регулирования тяги ЖРД предлагается использовать в качестве входов следующие переменные параметры: угол положения привода РКС α , угол положения привода СОБ φ и технологическое время t . Выходом будет давление в камере сгорания p_k .

В модели для системы автоматического поддержания давления в топливных баках возможно использование следующих входных параметров: время нахождения в открытом состоянии клапанов наддува и дренажа $t_{\text{эпк}}$, массовый расход компонента топлива \dot{m}_d , температура компонента T , давление по линии наддува $P_{\text{наддува}}$, проходное сечение открытых надувных и расходных трубопроводов $d_{\text{п}}$ и диаметры дроссельных шайб клапанов d . Выходом будет давление до входа в двигатель P .

Далее рассмотрим подробнее нейросетевую модель датчика давления для системы регулирования тяги ЖРД.

Нейросетевая модель датчика давления для системы регулирования тяги ЖРД

Нейронная сеть будет осуществлять нелинейную регрессию, т. е. оценку значения выходной переменной по значениям входных переменных (рис. 5).

В качестве базовой архитектуры нейронной сети был выбран многослойный перцептрон, параметры которого (число слоев, размеры скрытых слоев, алгоритм обучения) определяли в процессе масштабного тестирования, осуществленного с помощью нейросетевого модуля пакета Statistica 8.0.

Наилучшие результаты показала трехслойная сеть вида 3-7-7-1 (три входа, по семь нейронов с логистической активационной функцией в первом и во втором слоях, один выходной нейрон с тождественной функцией активации), использующая алгоритм обратного распространения ошибки (рис. 6, см. третью сторону обложки).

Эта сеть была обучена на данных одного из контрольно-выборочных испытаний и в процессе тестирования показала высокие результаты.

Ниже приведены среднее значение и стандартное отклонение, вычисленные для обучающих

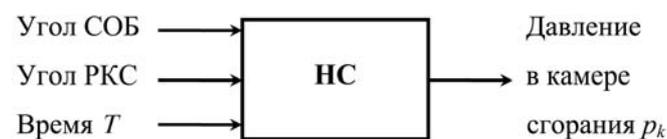


Рис. 5. Нейросетевая модель датчика давления

данных и для ошибки прогноза, а также корреляция исходных и моделируемых данных:

Среднее значение данных	-0,026689
Стандартное отклонение данных	3,824522
Среднее значение ошибки прогноза	-0,005719
Стандартное отклонение ошибки прогноза	0,461099
Среднее значение абсолютной ошибки прогноза	0,272050
Отношение стандартного отклонения ошибки к стандартному отклонению данных	0,120564
Корреляция исходных и моделируемых данных	0,992728

В общем случае среднее значение ошибки прогноза должно быть очень близко к нулю. Но наиболее важным показателем является стандартное отклонение ошибки прогноза. Если оно существенно меньше стандартного отклонения обучающих данных, это означает, что сеть работает значительно лучше, чем простая оценка по среднему. В частности, если отношение стандартного отклонения ошибки прогноза к стандартному отклонению обучающих данных, например ниже 0,15, то это говорит об очень хорошем качестве регрессии.

Результаты моделирования были проверены еще на трех наборах данных для испытаний того же типа и везде были получены схожие результаты. Однако оказалось, что эта сеть недостаточно универсальна в том смысле, что при использовании ее для моделирования датчика давления при испытаниях другого вида (контрольно-технологических) точность существенно снизилась. Включать в обучающую выборку данные по испытаниям всех видов нецелесообразно, так как они имеют слишком большой объем (до 28 000 значений для каждого испытания).

В результате повторного анализа наибольшую универсальность проявила сеть достаточно простой архитектуры. У нее два входа вместо трех (угол СОБ и угол РКС), шесть нейронов в единственном скрытом слое и один выход p_k (рис. 7, см. третью сторону обложки).

Время оказалось лишним входным фактором, так как контрольно-технологические испытания короче (и показатель давления имеет несколько иную зависимость от времени, чем в контрольно-выборочных испытаниях). Обучалась эта сеть также по методу обратного распространения ошибки (снова на данных одного из контрольно-выборочных испытаний), при этом результаты на данных других испытаний такого же типа были несколько хуже, чем у первой сети. Однако погрешность моделирования второй сетью показаний датчика давления для всех типов испытаний не превышает допустимых норм.

На рис. 8 (см. третью сторону обложки) серым цветом приведены смоделированные нейронной

сетью значения датчика давления для испытаний того же типа, что и в обучающей выборке (поверх истинных значений, показанных черным цветом). На рис. 9 (см. третью сторону обложки) серым цветом представлены смоделированные значения датчика давления для испытаний другого типа, чем в обучающей выборке.

Заключение

При нецелесообразности или невозможности введения дополнительных измерительных каналов в стендовых ИУС метод мажоритарного голосования по схеме "два из трех" можно организовать с помощью нейросетевых моделей датчиков обратной связи. При этом совмещаются достоинства систем резервирования "один из двух" и "два из трех" — минимальная избыточность и непрерывность функционирования.

В частности, предложенная нейросетевая модель позволяет решить задачу повышения надеж-

ности в обратной связи системы РКС при дублированной схеме. При этом наибольшую точность (при использовании на испытаниях одного типа) по результатам тестирования 40 нейронных сетей имеет модель многослойного персептрона архитектуры 3-7-7-1. Однако наибольшую универсальность (при использовании на испытаниях разных типов) демонстрирует модель многослойного персептрона архитектуры 2-6-1.

Список литературы

1. **Испытания** жидкостных ракетных двигателей // Под ред. В. З. Левина. — М.: Машиностроение, 1981. — 199 с.
2. **SIMATIC** Automation System S7-300. Fail-Safe Signal Modules: Manual. — Edition 04.2006. — Siemens. 236 p.
3. **ГОСТ Р 51841—2001**. Программируемые контроллеры. Общие технические требования и методы испытаний.
4. **ГОСТ Р МЭК 61508**. Функциональная безопасность электрических, электронных и программируемых электронных систем, связанных с безопасностью.
5. **Гликман Б. Ф.** Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1989. — 296 с.

CONTENTS

Gurevich I. M. *Atoms, Molecules and Fundamental Restrictions on Informational Characteristics of Systems* . . . 2

The article shows that volume of information in the atoms, amino acids and nitrogen bases, their differential information capacity, the mass of a hydrogen atom, the structure and the energy difference between its basis states impose fundamental limits on memory and speed of computing devices and information systems. Restrictions 10^{28} bit/kg, 10^{39} op · sec⁻¹ · kg⁻¹ must be added to a number of fundamental natural limits.

Keywords: atoms, molecules, information characteristics, the fundamental limits

Gulmamedov R. H. *Definition of Critical Problems of Informatization of Regions* 9

The urgency of a question in the conditions of transition to postindustrial information economy is marked. Lacks of the standard approaches to the decision of the question, based on methods of expert estimations are analyzed. Is offered the way, allowing to raise efficiency of the decision by use of methods of psychosemantics and multidimensional non metric scaling. The description of technology and an example of application of a way is given.

Keywords: region, problems of informatization, ranging, multidimensional non metric scaling

Brusencov L. E. *Architecture of an Optimal Compiler Options Search Tool* 14

More and more hopes we lay on optimizing compilers, peculiarly it's connected to the wide spread of multicore processor architectures. Compilers are very sophisticated and conservative and need to be thoroughly tuned. The goal of the work is to implement an automatic tool to search for optimal compiler options values.

Keywords: optimizing compiler, iterativesearch, statistical data, application transformation

Alymova E. V. *The Test Sets Completeness Criterion Intended for Parallelizing Program Transformations Testing* 19

The paper proposes test sets generation technique aimed on compiler parallelizing and optimizing program transformations testing. The completeness criterion for positive and negative test sets is described.

Keywords: completeness criterion for testing, parallelizing program transformations, optimizing compiler, automatic test generation

- Taganov A. I.** *Methods of Identification, the Analysis and Reduction Design Risks of Quality Program Products in the Conditions of the Illegibility* 22
 Questions of formalization of processes of identification, the analysis and reduction of design risks of quality of program products in the conditions of an illegibility of the design data are considered.
Keywords: design risk, identification, the analysis, monitoring, indistinct methods and algorithms
- Kvasov I. E., Petrov I. B., Sannikov A. V., Favorskaya A. V.** *Computer Modeling of Spatial Dynamic Processes Using Grid-Characteristic Method on Unstructured Tetrahedral Grids* 28
 The aim of this work is the development of the grid-characteristic method on unstructured tetrahedral grids by using high-order interpolation for numerical modeling to investigate complex spatial dynamic processes in heterogeneous environments. This method has great generality and is suitable for the detailed study of wave pattern.
Keywords: grid-characteristic method, tetrahedral grids, high-order interpolation, seismic exploration, seismology
- Petrov I. B., Favorskaya A. V.** *High-Order Interpolation on Unstructured Triangular and Tetrahedral Grids Library* 30
 We developed methods of high-order interpolation on unstructured triangular and tetrahedral grids: polynomial interpolation from the first to the fifth degree inclusive, interpolation with the help of a limiter based on polynomial interpolation from the second to the fifth degree inclusive, straight-line interpolation. The library that implements all these methods was written and we carried out its numerical testing.
Keywords: high-order interpolation, triangular grids, tetrahedral grids, unstructured grids
- Bunkina N. I., Lakeyev D. V.** *Scheduling Problems with Alternative Machines. Solving with Genetic Algorithms* . . . 33
 The following paper describes a genetic algorithm for job-shop scheduling problem with alternative machines. This problem is one of the most well-known hardest combinatorial optimization problem, which is NP-hard. In the paper it is introduced original ideas in representation of schedules and improving no feasible ones to legal. Experiments showed that the proposed method produces nearly-optimal solutions for standard benchmarks and has polynomial complexity.
Keywords: scheduling problem, genetic algorithms, alternative machines, job-shop
- Asadov H. H., Ismaylov K. Kh.** *Information Method for Positioning* 37
 It is shown that in order to develop the positioning system, such parameters as attenuation level and speed of signal transfer may be used, which depend on meteorological and frequency parameters.
 The information method of positioning is suggested, where the positioning is to be carried out in line with target functional when the latter should get its maximal value.
 The iteration procedure for realization of suggested method is described.
Keywords: positioning, fading, navigation, iterative procedures
- Ibrahimov B. G., Ibrahimov G. G.** *Efficiency of Transfer of the Multimedia Traffic with Multifunctional User's and Network Terminal* 40
 The part of multiservice communication networks with switching the packages, formed by user's and network terminals of multimedia type is investigated. On the basis of research of efficiency of functioning of system the mathematical model of the terminal equipment of a part of multiservice communication networks is created and analytical expressions for an estimation of their network characteristics are received.
Keywords: non-uniform traffic, user's and network terminal, multiservice network link, high-speed access, quality of service
- Kuznetsov A. A.** *The Heart Rhythm Diagrams Structural — Topological Analysis Principles* 44
 Definition to the dot storey diagram of a rhythm of heart is given and necessity of its application is proved. Tools and technology of a heart rhythm real and virtual storey diagrams analysis are given. A heart rhythm dot storey diagram macro- and microparameters are determined. Between them in conditions of discrete adaptation functional communications are determined. Principles of the offered information technology of a heart rhythm diagrams analysis are formulated.
Keywords: the heart rhythm diagram, an organism functional condition, a storey structure, informational entropy, the information quantity
- Sirota E. A.** *The Information System of Managerial Process by Blood Stocks* 50
 The results of the program that provides storage and data handling of the blood needs of the hospitals and the optimization of managerial process by blood stocks are given. The mathematical model of the managerial process by blood stocks is described. This mathematical model was used while developing.
Keywords: mathematical model, managerial process by blood stocks, software

Galushkin A. I. Neural Networks Technologies in the Solution of Tasks of Neurorestoratology 55

This article represents methods to choose the tasks, which are adequate to neural networks technologies, neuroimplants (visual, acoustic, neuroimplant of spinal cord, bionic arm), neural networks technologies in the diagnostics of nerve diseases (diagnostics by EEG, systems for epilepsy diseased), neural networks technologies in the problem "Human proteom", models of neurosystems on the base of modern computing means as the technological means of solution of neurorestoratology tasks, interface "brain-computer", as the technological means of solution of neurorestoratology tasks, modern methods of information visualization in the researches of neurorestoratology.

Keywords: neural networks, interface brain-computer, neuromathematics, neurocontrol, neurochips, medical diagnostic, neuroimplant visual, neuroimplant acoustic, prothesis

Osipov V. Yu. Stability of Recurrent Neural Networks with the Controlled Synapses 69

The approach to the sustainability of recurrent neural networks (RNN) with controlled synapses was researched. Model synapses and stability of RNN were clarified during this research. Possible options for inhibition of neurons in the RNN were investigated. The results of mathematical modeling are presented. Practical recommendations on the sustainability of RNN are given.

Keywords: recurrent neural network, synapse, stability, inhibition

Kashirina I. L., Lvovich Ja. E., Tuzikov A. A. Reservation by Neural Network of Doubled Measurements of Parameters at Terrestrial Fire Tests of LRE 74

In the article the problem of increase of reliability is considered by development of bench information-controlling systems for terrestrial fire tests of liquid rocket engines. In this article a realization of the regulation system by a majority principle "2 out of 3" for feedback gages is offered. The neural network in form of multi-layered perceptron is used as the third gage.

Keywords: the liquid rocket engine, serial fire tests, model on the basis of the neural network

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала **(499) 269-5510**

E-mail: it@novtex.ru

Дизайнер *Т.Н. Погорелова*. Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *Е.В. Комиссарова*.

Сдано в набор 07.07.2011. Подписано в печать 18.08.2011. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 11,49. Заказ 636. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика"

142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15