

СЕКЦИЯ

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНА ТЕХНИКА**

Руководитель – д.т.н., профессор **ДРОЗДОВ Б.В.**

**ПРОБЛЕМЫ ВНЕШНЕЙ ИНТЕГРАЦИИ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

Дроздов Б.В.

Научно-исследовательский институт информационных технологий (НИИ ИТ)

Широкое внедрение современных средств вычислительной техники (СВТ) во все сферы человеческой деятельности приводит к радикальным изменениям организации и технологии. Одновременно возникают целый ряд проблем, касающихся как вопросов интеграции этой техники (СВТ) в социально-техническую среду, так и адаптации самих СВТ к специфическим требованиям этой среды.

Первые периоды массового внедрения СВТ, относящиеся к 60-80-м годам прошлого века, характеризовались появлением целой серии крупномасштабных проектов, имеющих региональные, общепромышленные и общегосударственные масштабы. В эти периоды реализовывался проект государственной сети вычислительных центров коллективного пользования (ГСВЦ). На технической основе этого проекта предполагалось создание широкого спектра общегосударственных интегрированных информационно-вычислительных систем – АСГС, АСПР, АСФР, АСУ МТС и др. Все эти крупномасштабные системы должны были интегрироваться в единую Общегосударственную автоматизированную систему (ОГАС). Этот этап характеризовался большими надеждами на возможности СВТ, основанными на вере во всемогущество этих средств и программно-алгоритмических методов. Уже на этом начальном этапе широкого внедрения СВТ выявилась актуальность проблемы внешней интеграции СВТ. Эта проблема трактовалась как неготовность организационных систем к широкому внедрению СВТ. Предполагалось, что эта проблема будет эффективно разрешена проведением комплекса работ по подготовке объектов к внедрению СВТ.

С другой стороны было понятно, что сами СВТ должны быть в большей степени приспособлены к той среде, в которой они должны функционировать. Разрешение этой стороны проблемы привело к специализации создаваемых СВТ. В тот период функциональное многообразие видов и типов СВТ было довольно большим. Это многообразие касалось не только элементной и конструктивной базы, но и принципов создания того, что сейчас обозначается как программное обеспечение.

В последующие периоды внедрение СВТ проходило в рамках идеологии создания новых информационных технологий, имеющих, как правило, зарубежное происхождение – глобальных информационно-телекоммуникационных технологий (ИНТЕРНЕТ, электронная почта, мобильная связь, компьютерные сети и системы, программные продукты для персональных компьютеров, сети SDH, SDN, ATM).

В этот период существенным образом изменился "предмет поставок": вместе с СВТ поставлялся полный комплекс программного обеспечения вместе с разнообразными периферийными устройствами, объединенными в качественно новую информационно-технологическую реальность - информационные технологии. Сами СВТ в рамках новых "предметов поставок" приобрели здесь высокий уровень внутренней интеграции. Сама проблема внешней интеграции приобрела новый характер - она трансформировалась в проблему интеграции новых информационных технологий в окружающую социо-техническую и социо-культурную среду. Например, поставляемые новые офисные информационные технологии (распределенные системы электронного документооборота) должны интегрироваться в существующую организационно-техническую культуру социально-экономической системы.

В этот период широкое внедрение СВТ и основанных на их использовании перспективных информационных технологий (ИТ) ориентируется на создание принципиально новых по своей структуре и способам организации информационно-технологических и организационно-технических систем, которые связываются с такими понятиями, как "Электронная библиотека", "Интеллектуальное жилище", "Электронный офис", "Интеллектуальная транспортная система" (ИТС), "Электронный город", "Электронное правительство", "Электронная Россия". Всем этим понятиям соответствуют определенные целевые комплексные программы (городские или федеральные, такие, как ГЦП "Электронная Москва" или "Электронная Россия"). В рамках таких программ все более серьезное место занимают проекты создания систем пассивного и активного мо-

нитинга социально-экономических, природно-техногенных и экологических процессов, создание ситуационных и информационно-аналитических центров.

Однако, практика реализации таких программ не всегда и не везде приводит к ожидаемым результатам. Например, реализация концепции создания ИТС, в основу которой полагается широкое использование СВТ во всех сферах деятельности транспортного комплекса, на всех этапах и процессах перевозок, не приводит, в конечном счете, в нашей стране к резкому улучшению транспортной ситуации в крупных городах и повышению эффективности транспортной системы. В данной ситуации возможности СВТ по сбору и обработке информации и новые информационные технологии ИТС вступают в противоречие с неорганизованностью самого управляемого (регулируемого) производственно - технологического процесса (процесса движения транспортных единиц по улично-дорожной сети города).

Проблема внешней интеграции СВТ и ИТ сводится к решению ряда более конкретных проблем «встраивания» ИТ в существующие организационные технологии. Для ИТС эта проблема интеграция трансформируется в задачи согласования ИТ навигации, телематики, логистики, мониторинга транспортной ситуации с соответствующими организационными технологиями в сфере транспорта. Например, эффективное применение современных средств навигации и телематики в условиях крупного города предполагает прежде всего нормализацию дорожно-транспортной ситуации и создание условий по недопущению формирования заторов на улично-дорожной сети. Вышеуказанные условия создаются реализацией комплекса мер градостроительного, экономического и организационно-технического характера.

Так же, как и на начальном этапе внедрения СВТ, исключительно острой остается проблема организационно-технологического обеспечения применения СВТ и новых ИТ, комплексного совершенствования организации и технологии функционирования организационных систем в процессе применения СВТ. Социально-экономическая и даже в более широком смысле социально-культурная среда должна наиболее эффективным образом интегрировать СВТ и технологи, на них основанные, причем сам процесс этой интеграции не должен иметь стихийный характер. Интегрирование должно происходить в соответствие с определенным проектом, сводящим к минимуму побочные негативные явления. Примером таких побочных результатов является информационное засорение всемирной паутины (ИНТЕРНЕТ) бесполезной информацией.

Таким образом, организационным средством внешней интеграции СВТ должен быть комплексный организационный проект (оргпроект). В составе такого проекта прорабатываются принципиальные вопросы эффективного внедрения СВТ и ИТ. Разработка и внедрение оргпроектов направлено на такую реконструкцию социо-технической и социо-культурной среды применения СВТ, при которой СВТ отводится четко структурированное место, в котором концентрируются все формализованные действия (процессы). Для этого предполагается выполнение следующих обязательных этапов разработки и внедрения комплексных оргпроектов: концептуализация, технологизация, структуризация, формализация. Выделенные формализованные процессы во всем пространстве организационной деятельности при внедрении СВТ и ИТ получают так называемое «рутинное» подкрепление [2].

Одними из элементов внешней интеграции СВТ являются действия и работы, направленные на повышение уровня информационной и организационной культуры и дисциплины. Показатель уровня организационной культуры – степень регламентированности всех действий.

Внешняя интеграция должна иметь несколько различных аспектов: технический, программный, информационный, информационно-технологический и организационно-технологический.

Технический и программный аспект интеграции предполагает отработку интерфейсов взаимодействия собственно СВТ со всем информационно-технологическим окружением (средства телекоммуникаций, средства первичной регистрации и обработки информации, средства отображения информации). Особое значение имеет интерфейс человек – система, который должен учитывать множество психо-физиологических факторов человеко-машинного взаимодействия.

Другая сторона проблемы внешней интеграции СВТ - учет функционально-технологических требований внешней среды к средствам вычислительной техники. Многообразие этих требований потенциально должны приводить к появлению многообразия видов и типов СВТ. На первом этапе внедрения СВТ это многообразие действительно присутствовало. С учетом реалий современной ситуации применения СВТ, может быть заново поставлен вопрос о восстановлении былого многообразия СВТ, то есть создании на новой элементной базе аналоговых, гибридных, цифровых интегрирующих инкрементные и других видов СВТ нового поколения.

#### Литература

1. Дроздов Б.В., Емельянович В.А. Направления информатизации в транспортном комплексе Москвы. "Проблемы современного города", МГЦНТИ, 1991, вып.5.
2. Беляев И.П., Капустян В.М. Системный анализ: прикладной аспект. -М.: ТОО "СИМС", 1999.

Problem external integration of computer systems and information technology is discoursed. Proposed to investigated complex management projects for social-technical and social-cultural fields. Second side of problem external integration - more full satisfy demands of objects fields to computer systems.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Смирнов В.Е.<sup>1</sup>, Смирнова Е.В.<sup>2</sup>, Монахов К.В.<sup>2</sup>, Шабанов А.К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Серпуховской военной институт РВ

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет Гражданской авиации

**Введение.** Надежность – одно из самых важных свойств любой системы, особенно если она относится к классу потенциально-опасных. К настоящему времени теоретические проблемы надежности аппаратных средств проработаны достаточно основательно. Разработано большое количество моделей, в основу которых в основном положены структурные методы расчета показателей надежности. Имеется ряд (значительно меньший, чем для аппаратных) моделей оценки надежности программных средств [1]. Специфика современного этапа развития технических систем (и перспектива на будущее) таковы, что практически все сложные управляющие системы строятся на базе аппаратно- программных комплексов (АПК).

Вместе с тем, модели и методики, позволяющие системно оценивать надежность АПК в доступной научной и технической литературе отсутствуют. Имеющиеся отдельные единичные работы предлагают либо включать в модели аппаратных средств специальные поправочные коэффициенты, которые могут быть получены исключительно экспериментальным путем, а, следовательно, не являются обобщающими [2], другие, наоборот, предлагают совершенно формальный подход [3], практическое применение которого достаточно проблематично.

В данной статье предлагается модель, основанная на апробированном математическом аппарате конечных марковских цепей, представляющая по сути логическое объединение известных моделей надежности аппаратных и программных средств с учетом новых возникающих эмергентных свойств.

**Основная часть.** Предположим, что рассматривается несложный АПК обработки частных инженерных задач, насчитывающий в программном обеспечении  $10^3$  операторов, что по имеющейся в настоящее время статистике позволяет считать, что после отладки в нем останется одна ( $n=1$ ) ошибка (5% ошибок в операторах программы и от них 3% необнаруженных в процессе отладки), которые могут проявиться в процессе эксплуатации системы.

Введем следующие допущения:

- 1) любая ошибка может проявляться случайным образом и без градации последствий, которые она порождает;
  - 2) интенсивности проявления и исправления программных ошибок зависят от количества необнаруженных ошибок, но не меняются во времени от одного события до другого, подчиняются в эти промежутки времени пуассоновскому закону и составляют соответственно  $c_1$  и  $d_1$  в единицу времени;
  - 3) интенсивности проявления и восстановления аппаратных отказов также постоянны во времени, подчиняются пуассоновскому закону и составляют соответственно  $a$  и  $b$  в единицу времени;
  - 4) время перехода системы из одного состояния в другое бесконечно мало.
- Граф состояний и переходов такой системы примет вид, показанный на рис.1.

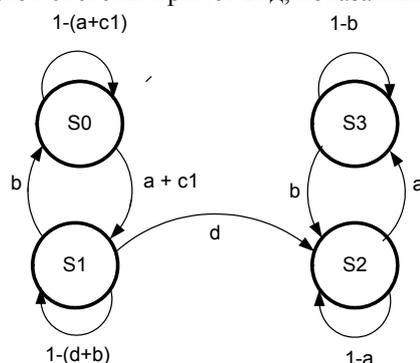


Рис.1. Граф состояний и переходов

Начальным состоянием системы будем считать состояние S0 - система аппаратно работоспособна, в программном обеспечении имеется одна необнаруженная ошибка.

В состоянии S2 система работоспособна и в ней отсутствуют необнаруженные программные ошибки.

Состояние S1 – состояние отказа аппаратных и программных средств системы; состояние S3 – состояние отказа аппаратных средств системы.

Любое состояние системы определяется вероятностями этих состояний  $\{P_i\}$ , а переходы из одного состояния в другое – переходными вероятностями  $\{P_{ij}\}$ , где  $P_{ij}$  – вероятность перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$  за бесконечно малый интервал времени  $\Delta t$ , не зависящая от вероятностей предшествующих и последующих состояний. Для графа, изображенного на рис.1, матрица переходных вероятностей примет вид

$$P_{[4,4]} = \begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} & 0 & 0 \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} & 0 \\ 0 & 0 & P_{22} & P_{23} \\ 0 & 0 & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Значения переходных вероятностей следуют из графа, приведенного на рис.1.

Вероятность работоспособного состояния системы в установившемся режиме получим из выражения  $P_p = P_0 + P_2$ .

Граф, приведенный на рис. 1, имеет конечное число состояний, но не из любого существенного состояния можно перейти за конечное число шагов в любое другое существенное состояние. Следовательно, в АПК отсутствует предельный стационарный режим и решить такую задачу классическим способом с использованием системы алгебраических уравнений Колмогорова не представляется возможным.

Для получения в системе псевдоустановившегося режима применим искусственный прием, суть которого заключается в следующем. Для состояния, имеющего только одностороннюю связь (на рисунке 1 состояние S1) введем две дополнительные фиктивные связи  $d_0$  и  $d_1$  с интенсивностями, соответственно  $d_0=0$ ,  $d_1=1$  (рис. 2).

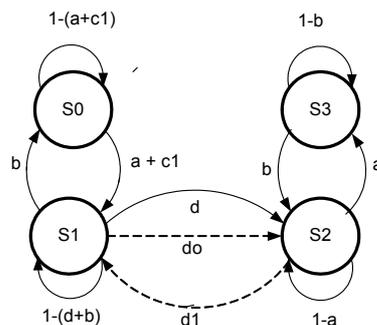


Рис.2. Граф переходов и состояний с фиктивными дугами

Система, описываемая таким графом, имеет стационарный режим, поэтому воспользуемся методами теории массового обслуживания и, перейдя от системы дифференциальных уравнений, запишем систему алгебраических уравнений в виде

$$\begin{cases} b P_1 - (a+c) P_0 = 0 \\ (a+c) P_0 + d_1 P_2 - (b+d+d_0) P_1 = 0 \\ (d+d_0) P_1 + b P_3 - (a+d_1) P_2 = 0 \\ a P_2 - b P_3 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

С учетом условия нормировки  $\sum_{j=0}^3 P_j = 1$  и, введя обозначения

$$\rho = \frac{a}{b}, \quad \rho' = \frac{a+c}{b}$$

разрешим систему уравнений (2) относительно всех предельных вероятностей  $P_j, (j=0,1,2,3)$ :

$$P_1 = \frac{a+c}{b} P_0 = \rho' P_0;$$

$$P_2 = d P_1 = \frac{d(a+c)}{b} P_0 = d \rho' P_0;$$

$$P_3 = \frac{a}{b} P_2 = dP_1 = d\rho\rho'P_0 \quad ;$$

$$P_0 = (1 + \rho' + d\rho' + d\rho\rho')^{-1} .$$

Используя метод индукции, несложно распространить рассмотренный пример на случай, когда в эксплуатацию передана система с 2-мя, 3-мя и n необнаруженными ошибками в программном обеспечении.

**Пример решения задачи.** Исходные данные:  $a=10^{-3}$  (1/час);  $b=10^{-1}$  (1/час);  $c=10^{-4}$  (1/час);  $d=10^{-2}$  (1/час).

После подстановки исходных данных получим следующие результаты решения (с точностью до восьмого знака после запятой):

а) без учета возможности отказов программного обеспечения:  $P_0=0,99900999$ ;  $P_1=0,000989001$ .

б) с учетом отказов программного обеспечения:

$P_0=0,989010999$ ;  $P_1=0,010879121$ ;  $P_2=0,000108792$ ;  $P_3=0,000001088$

Тогда вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии

$P_p = P_0 + P_2 = 0,989119791$ .

**Выводы:**

1) полученные результаты не противоречат требованиям теории вероятностей (значения вероятностей положительны, находятся в диапазоне от 0 до 1);

2) сравнительные результаты соответствуют физическому смыслу;

3) сумма значений вероятностей состояний равна 1.

Это позволяет утверждать о верности использованного искусственного приема а, следовательно, и математической корректности модели.

#### Литература

1. Соломенцев В.В., Гаранин С.А. Пути повышения надежности программного обеспечения АКИС УВД// Научный вестник МГТУ ГА №7(4). Сер. Информатика. Прикладная математика, М, 2004.-с.13-20

2. Игнатко О.А. О применении метода Половко для расчета надежности комплексов средств автоматизации УВД. // Научный вестник МГТУ ГА №7(4). Сер. Информатика. Прикладная математика, М, 2004.-с.139-143

3. Гаранин С.А. Использование метода графа состояний для оценки надежности программного обеспечения АС УВД// Научный вестник МГТУ ГА №7(4). Сер. Информатика. Прикладная математика, М, 2004.-с.204-205

4. Кабак И.С., Позднеев Б.М. Оценка надежности объектно-ориентированных программ. -М.: Станкин, 2003

5. Кабак И.С., Рапопорт Г.Н. Оценка надежности программного обеспечения по математической модели// Проблемы создания гибких автоматизированных производств. Под ред. И.М. Макарова, К.В. Фролова, П.Н. Белянина, -М.: Наука, 1987.с.236-245

7. Надежность в технике. Государственный сборник стандартов. ИПК Изд. стандартов.

### MATHEMATICAL MODEL OF ESTIMATION OF RELIABILITY OF A HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX

Smirnov V.<sup>1</sup>, Smirnova E.<sup>2</sup>, Monakhov K.<sup>2</sup>, Shabanov A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Serpukhov Military Institute of Rocket Forces

<sup>2</sup>Moscow state Technological University of Civil Aviation

The process of functioning a hardware-software complex is simulated. The decision of the task of transforming non-ergodic Markov circuit into ergodic circuit is given. The system reliability of hardware and software is calculated. The example of calculations is given.



### МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Джиган В.И.

ГУП НИЦ “ЭЛВИС”, а/я 19, Центральный проспект, Зеленоград, г. Москва К-460, Россия 124460

Тел.: +7-095-531-1961. Эл. почта: [djigan@elvees.ru](mailto:djigan@elvees.ru). Интернет: <http://www.elvees.ru>

**Аннотация:** Рассматривается способ представления RLS и линейно-ограниченных RLS алгоритмов адаптивной фильтрации со скользящим окном и регуляризацией корреляционной матрицы адаптивного фильтра, позволяющий реализовывать такие алгоритмы с помощью параллельных вычислений. Данные алгоритмы математически эквивалентны известным одноименным последовательным и параллельным алгоритмам адаптивной фильтрации.

Адаптивная фильтрация – это одно из направлений современной цифровой обработки сигналов (ЦОС) [1]. Качество работы адаптивных фильтров определяется типами используемых в них алгоритмов. С точки зрения длительности переходного процесса и остаточных ошибок в установившемся режиме наилучшими являются рекурсивные алгоритмы по критерию наименьших квадратов (Recursive Least Squares, RLS), у которых значения этих параметров наименьшие по сравнению с другими алгоритмами адаптивной фильтрации. Однако для реализации RLS алгоритмов требуются большие вычислительные ресурсы. В настоящей статье рассматривается способ представления многоканальных RLS алгоритмов с неодинаковым числом комплексных весовых коэффициентов в каналах, скользящим окном (Sliding Window, SW) и регуляризацией корреляционной матрицы адаптивного фильтра, позволяющий реализовывать такие алгоритмы с помощью параллельных вычислений. Скользящее окно позволяет обрабатывать нестационарные сигналы, а динамическая регуляризация – обеспечивает стабильную работу адаптивного фильтра.

Для получения параллельных RLS алгоритмов могут быть использованы методы, представленные в работе [2]. С помощью этих методов были получены алгоритмы [3-5], имеющие довольно сложное математическое описание. Настоящая статья представляет простой способ описания параллельных вычислительных процедур RLS алгоритмов, при котором эти процедуры для регуляризованных алгоритмов с бесконечным окном (Prewindowed, PW), и нерегуляризованных или регуляризованных алгоритмов со скользящим окном имеют один и тот же вид.

Блок-схема  $M$ -канального адаптивного фильтра, постановка и решение задачи многоканальной адаптивной фильтрации по критерию наименьших квадратов, включая задачу с линейными ограничениями (Linearly Constrained, LC), а также основные обозначения, используемые в настоящей работе, могут быть найдены в [1]. Решением LC задачи является вектор весовых коэффициентов адаптивного фильтра [6]:

$$\mathbf{h}_N(k) = \mathbf{R}_N^{-1}(k)\mathbf{r}_N(k) + \mathbf{R}_N^{-1}(k)\mathbf{C}_{NJ} \left[ \mathbf{C}_{NJ}^H \mathbf{R}_N^{-1}(k)\mathbf{C}_{NJ} \right]^{-1} \left[ \mathbf{f}_J - \mathbf{C}_{NJ}^H \mathbf{R}_N^{-1}(k)\mathbf{r}_N(k) \right]. \quad (1)$$

В случае скользящего окна и динамической регуляризации, корреляционная матрица входных сигналов многоканального адаптивного фильтра определяется как

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_N(k) = & \sum_{i=k-L+1}^k \lambda^{k-i} \left[ \mathbf{c}_N(i)\mathbf{c}_N^H(i) + \xi^2 \mathbf{c}_N(i)\mathbf{c}_N^T(i) \right] = \lambda \mathbf{R}_N(k-1) + \mathbf{c}_N(k)\mathbf{c}_N^H(k) - \\ & - \mu \mathbf{c}_N(k-L)\mathbf{c}_N^H(k-L) + \xi^2 \mathbf{c}_N(k)\mathbf{c}_N^T(k) - \mu \xi^2 \mathbf{c}_N(k-L)\mathbf{c}_N^T(k-L), \end{aligned} \quad (2)$$

а вектор взаимной корреляции между компонентами вектора  $\mathbf{c}_N(k)$  и требуемым сигналом  $d(k)$  определяется как

$$\mathbf{r}_N(k) = \sum_{i=k-L+1}^k \lambda^{k-i} \mathbf{c}_N(i)d^*(i) = \lambda \mathbf{r}_N(k-1) + \mathbf{c}_N(k)d^*(k) - \mu \mathbf{c}_N(k-L)d^*(k-L), \quad (3)$$

Здесь  $k$  – номер итерации (отсчета),  $\mathbf{c}_N(k)$  – вектор входных сигналов,  $\mathbf{c}_N(k)$  – вектор сигналов регуляризации,  $N = \sum_{m=1}^M N_m$  – общее число весовых коэффициентов,  $N_m$  – число весовых коэффициентов в

$m$ -м канале,  $L$  – длина скользящего окна,  $\mu = \lambda^L$ ,  $0 \ll \lambda \leq 1$ , а  $\mathbf{C}_{NJ}$  и  $\mathbf{f}_J$  – матрица и вектор  $J$  линейных ограничений, В уравнении (3),  $\xi$  – небольшое число (параметр динамической регуляризации), а  $\mathbf{c}_N(k)$  – вектор сигналов динамической регуляризации. Один нижний индекс используется для обозначения числа элементов в векторах и квадратных матрицах, а два – в прямоугольных (нетранспонированных) матрицах.

Первое слагаемое в уравнении (1) – это решение рассматриваемой задачи при отсутствии линейных ограничений. Второе слагаемое обусловлено линейными ограничениями. В соответствие с этим, RLS алгоритмы, с помощью которых осуществляется рекурсивное вычисление вектора весовых коэффициентов адаптивного фильтра (1), также состоят из двух вычислительных процедур. Последовательное применение леммы об обращении матриц для обращения матрицы (2) при наличии того или иного числа слагаемых, позволяет получить соответствующие последовательные RLS алгоритмы [1], а использования приемов [2] – параллельные RLS алгоритмы [2-5].

В [7] представлен общий вид леммы об обращении матриц

$$\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{B}^{-1} - \mathbf{B}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{D}\mathbf{B}^{-1}. \quad (4)$$

нии  $\mathbf{A} = \mathbf{D}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{C} + \mathbf{S}$ ,  $\mathbf{C} = [\mathbf{y}, \mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{v}] = \mathbf{X}_{NF}(k) = [\mu^{0.5}\mathbf{c}_N(k-L), \mathbf{c}_N(k), \mu^{0.5}\boldsymbol{\xi}\mathbf{c}_N(k-L), \boldsymbol{\xi}\mathbf{c}_N(k)]$ ,  $\mathbf{D} = \mathbf{C}^H$  и  $\mathbf{S} = \text{diag}(-1, 1, -1, 1)$ . Число столбцов матрицы  $\mathbf{X}_{NF}$  и их вид определяют ранее отмеченные разновидности RLS алгоритмов.

Уравнение (4) позволяет получить параллельный RLS алгоритм адаптивной фильтрации в виде, представленном ниже.

Вычисления	Ссылки
<b>Init.:</b> $\mathbf{c}_N(0) = \mathbf{0}_N, \dots, \mathbf{c}_N(0-L+1) = \mathbf{0}_N, \mathbf{c}_N(0) = \mathbf{0}_N, \dots, \mathbf{c}_N(0-L+1) = \mathbf{0}_N, d(0) = 0, \dots,$ $d(0-L+1) = 0, \mathbf{X}_{NF}(0) = \mathbf{O}_{NF}, \mathbf{R}_N^{-1}(0) = \delta^{-2}\mathbf{I}_N, \mathbf{h}_N(0) = \mathbf{0}_N,$ $\mathbf{I}_N = \text{diag}(1, \lambda, \dots, \lambda^{N_1-1}, \dots, 1, \lambda, \dots, \lambda^{N_M-1})$	(1.0)
<b>For</b> $k = 1, 2, \dots, K$	
$\mathbf{G}_{NF}(k) = \frac{\mathbf{R}_N^{-1}(k-1)\mathbf{X}_{NF}(k)}{\lambda\mathbf{S}_F + \mathbf{X}_{NF}^H(k)\mathbf{R}_N^{-1}(k-1)\mathbf{X}_{NF}(k)}$	(1.1)
$\mathbf{R}_N^{-1}(k) = \lambda^{-1}[\mathbf{R}_N^{-1}(k-1) - \mathbf{G}_{NF}(k)\mathbf{X}_{NF}^H(k)\mathbf{R}_N^{-1}(k-1)]$	(1.2)
$\mathbf{b}_F(k) = \mathbf{d}_F(k) - \mathbf{h}_N^H(k-1)\mathbf{X}_{NF}(k)$	(1.3)
$\mathbf{h}_N(k) = \mathbf{h}_N(k-1) + \mathbf{G}_{NF}(k)\mathbf{b}_F^H(k)$	(1.4)
<b>End for</b> $k$	

В этом алгоритме  $\mathbf{d}_F(k) = [\mu^{0.5}d(k-L), d(k), 0, 0]$ , а сигнал ошибки на выходе адаптивного фильтра определяется как  $\alpha_{N,\mathbf{c}}(k) = d(k) - \mathbf{h}_N^H(k-1)\mathbf{c}_N(k) = \alpha_F^{(2)}(k)$ , где  $\alpha_F^{(2)}(k)$  – второй элемент вектора  $\mathbf{b}_F(k)$ . Векторы, за исключением специально оговариваемых, являются вектор-столбцами. Векторы  $\mathbf{d}_F(k)$  и  $\mathbf{b}_F(k)$  – это вектор-строки. Матрица  $\mathbf{G}_{NF}(k)$  представляет собой матрицу коэффициентов Калмана  $\mathbf{G}_{NF}(k) = \mathbf{R}_N^{-1}(k)\mathbf{X}_{NF}(k)$ . Вычислительная сложность параллельного RLS алгоритма пропорциональна  $O(N^2F)$  арифметических операций, необходимых для выполнения одной итерации.

Аналогичный способ может быть использован и в быстрых (вычислительно эффективных, т.е. с малым числом арифметических операций) многоканальных RLS алгоритмах адаптивной фильтрации. Например, параллельный FTF (Fast Transversal Filter) алгоритм имеет вид, представленный ниже.

Вычисления	Ссылки
<b>Init.:</b> $\mathbf{c}_N(0) = \mathbf{0}_N, \dots, \mathbf{c}_N(0-L+1) = \mathbf{0}_N, \mathbf{c}_N(0) = \mathbf{0}_N, \dots, \mathbf{c}_N(0-L+1) = \mathbf{0}_N, d(0) = 0, \dots,$ $d(0-L+1) = 0, \mathbf{X}_{NF}(0) = \mathbf{O}_{NF}, \mathbf{h}_{N,\mathbf{x}}(0) = \mathbf{0}_N, E_N^{f(m)}(0) = \delta^2, E_N^{b(m)}(0) = \delta^2\lambda^{-N_m},$ $\mathbf{h}_N^{f(m)}(0) = \mathbf{0}_N, \mathbf{h}_N^{b(m)}(0) = \mathbf{0}_N, m = 1:M, \tilde{\mathbf{T}}_{NF}^{(M)}(1) = \mathbf{0}_{NF}, \mathbf{\Pi}_F^{(M)}(1) = \mathbf{S}_F$	(2.0)
<b>For</b> $k = 1, 2, \dots, K$	
<b>For</b> $m = M : -1 : 1$	
$\mathbf{b}_F^{f(m)}(k) = \mathbf{x}_F^{(m)}(k) - \mathbf{h}_N^{f(m)H}(k-1)\mathbf{X}_{NF}^{(m)}(k)$	(2.1)
$\mathbf{e}_F^{f(m)}(k) = \mathbf{b}_F^{f(m)}(k)\mathbf{\Pi}_F^{(m)}(k)$	(2.2)
$\mathbf{z}_F^{(m)}(k) = \mathbf{b}_F^{f(m)}(k)/E_N^{f(m)}(k-1)$	(2.3)

$$\tilde{\mathbf{T}}_{(N+1)F}^{(m)}(k) = \begin{bmatrix} 1 \\ -\mathbf{h}_N^{f(m)}(k-1) \end{bmatrix} \mathbf{z}_F^{(m)}(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_F^T \\ \tilde{\mathbf{T}}_{NF}^{(m)}(k) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{S}_{N+1}^{(m)} \mathbf{T}_{N+1}^{(m)T} \left\{ \tilde{\mathbf{T}}_{(N+1)F}^{(m)}(k) \right\} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Q}}_{NF}^{(m)}(k) \\ \tilde{\mathbf{q}}_F^{(m)}(k) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{h}_N^{f(m)}(k) = \mathbf{h}_N^{f(m)}(k-1) + \lambda^{-1} \tilde{\mathbf{T}}_{NF}^{(m)}(k) \mathbf{e}_F^{f(m)H}(k) \quad (2.6)$$

$$\mathbf{b}_F^{b(m)}(k) = \tilde{\mathbf{q}}_F^{(m)}(k) E_N^{b(m)}(k-1) \quad (2.7)$$

$$\tilde{\mathbf{T}}_{NF}^{(m-1)}(k) = \tilde{\mathbf{Q}}_{NF}^{(m)}(k) + \mathbf{h}_N^{b(m)}(k-1) \tilde{\mathbf{q}}_F^{(m)}(k) \quad (2.8)$$

$$E_N^{f(m)}(k) = \lambda E_N^{f(m)}(k-1) + \mathbf{e}_F^{f(m)}(k) \mathbf{b}_F^{f(m)H}(k) \quad (2.9)$$

$$\tilde{\mathbf{\Pi}}_F^{(m)}(k) = \mathbf{\Pi}_F^{(m)}(k) \left[ \mathbf{I}_F - \mathbf{b}_F^{f(m)H}(k) \mathbf{e}_F^{f(m)}(k) / E_N^{f(m)}(k) \right] \quad (2.10)$$

$$\mathbf{\Pi}_F^{(m-1)}(k) = \left[ \mathbf{I}_F - \lambda^{-1} \tilde{\mathbf{\Pi}}_F^{(m)}(k) \tilde{\mathbf{q}}_F^{(m)H}(k) \mathbf{b}_F^{b(m)}(k) \right]^{-1} \tilde{\mathbf{\Pi}}_F^{(m)}(k) \quad (2.11)$$

$$\mathbf{e}_F^{b(m)}(k) = \mathbf{b}_F^{b(m)}(k) \mathbf{\Pi}_F^{(m-1)}(k) \quad (2.12)$$

$$E_N^{b(m)}(k) = \lambda E_N^{b(m)}(k-1) + \mathbf{e}_F^{b(m)}(k) \mathbf{b}_F^{b(m)H}(k) \quad (2.13)$$

$$\mathbf{h}_N^{b(m)}(k) = \mathbf{h}_N^{b(m)}(k-1) + \lambda^{-1} \tilde{\mathbf{T}}_{NF}^{(m-1)}(k) \mathbf{e}_F^{b(m)H}(k) \quad (2.14)$$

End for  $m$

$$\mathbf{b}_F(k) = \mathbf{d}_F(k) - \mathbf{h}_N^H(k-1) \mathbf{X}_{NF}(k) \quad (2.15)$$

$$\mathbf{e}_F(k) = \mathbf{b}_F(k) \mathbf{\Pi}_F^{(0)}(k) \quad (2.16)$$

$$\mathbf{h}_N(k) = \mathbf{h}_N(k-1) + \lambda^{-1} \tilde{\mathbf{T}}_{NF}^{(0)}(k) \mathbf{e}_F^H(k) \quad (2.17)$$

$$\tilde{\mathbf{T}}_{NF}^{(M)}(k+1) = \tilde{\mathbf{T}}_{NF}^{(0)}(k), \mathbf{\Pi}_F^{(M)}(k+1) = \mathbf{\Pi}_F^{(0)}(k) \quad (2.18)$$

End for  $k$

В данном алгоритме векторы  $\mathbf{x}_F^{(m)}(k) = [\mu^{0.5} x_m(k-L), x_m(k), \mu^{0.5} \xi \rho_m(k-L), \xi \rho_m(k)]$ ,  $\mathbf{b}_F^{f(m)}(k)$ ,  $\mathbf{e}_F^{f(m)}(k)$ ,  $\mathbf{q}_F^{(m)}(k)$  и  $\mathbf{e}_F(k)$  – вектор-строки. Элементы матриц  $\mathbf{X}_{NF}^{(m)}(k) = [\mu^{0.5} \mathbf{c}_N^{(m)}(k-L), \mathbf{c}_N^{(m)}(k), \mu^{0.5} \xi \mathbf{c}_N^{(m)}(k-L), \xi \mathbf{c}_N^{(m)}(k)]$  формируются, как это показано в [1].

Рассмотренные алгоритмы могут быть использованы для адаптивной фильтрации без ограничений или в качестве процедур вычисления матриц коэффициентов Калмана  $\mathbf{G}_{NF}(k) = \lambda^{-1} \tilde{\mathbf{T}}_{NF}^{(0)}(k) \mathbf{\Pi}_F^{(0)}(k)$  в линейно-ограниченных RLS алгоритмах. В параллельных LC RLS алгоритмах лемма (4) и приемы [6] используются для рекурсивного вычисления матриц, обусловленных ограничениями, см. уравнение (1). Один из таких алгоритмов приведен ниже.

Вычисления	Ссылки
<b>Init.</b> : $\mathbf{c}_N(0) = \mathbf{0}_N, \dots, \mathbf{c}_N(0-L+1) = \mathbf{0}_N, \mathbf{c}_N(0) = \mathbf{0}_N, \dots, \mathbf{c}_N(0-L+1) = \mathbf{0}_N, d(0) = 0, \dots,$ $d(0-L+1) = 0, \mathbf{X}_{NF}(0) = \mathbf{O}_{NF}, \mathbf{R}_N^{-1}(0) = \delta^{-2} \mathbf{J}_N, \mathbf{\Gamma}_{NJ}(0) = \mathbf{R}_N^{-1}(0) \mathbf{C}_{NJ},$ $\mathbf{Q}_{NJ}(0) = \mathbf{\Gamma}_{NJ}(0) [\mathbf{C}_{NJ}^H \mathbf{\Gamma}_{NJ}(0)]^{-1}, \mathbf{h}_N(0) = \mathbf{Q}_{NJ}(0) \mathbf{f}_J,$ $\mathbf{J}_N = \text{diag}(1, \lambda, \dots, 1, \lambda, \dots, \lambda^{N_M-1})$	(4.0)
<b>For</b> $k = 1, 2, \dots, K$	
Вычисление $\mathbf{G}_{NF}(k)$	(4.1)
$\mathbf{V}_{JF}(k) = \mathbf{C}_{NJ}^H \mathbf{G}_{NF}(k)$	(4.2)
$\mathbf{N}_{JF}^H(k) = \mathbf{X}_{NF}^H(k) \mathbf{Q}_{NJ}(k-1)$	(4.3)

$$\mathbf{Q}'_{NJ}(k) = [\mathbf{Q}_{NJ}(k-1) - \mathbf{G}_{NF}(k)\mathbf{N}_{JF}^H(k)] \left[ \mathbf{I}_J + \frac{\mathbf{V}_{JF}(k)\mathbf{N}_{JF}^H(k)}{\mathbf{I}_F - \mathbf{N}_{JF}^H(k)\mathbf{V}_{JF}(k)} \right] \quad (4.4)$$

$$\mathbf{Q}_{NJ}(k) = \mathbf{Q}'_{NJ}(k) + \mathbf{C}_{NJ}(\mathbf{C}_{NJ}^H\mathbf{C}_{NJ})^{-1}[\mathbf{I}_J - \mathbf{C}_{NJ}^H\mathbf{Q}'_{NJ}(k)] \quad (4.5)$$

$$\mathbf{b}_F(k) = \mathbf{d}_F(k) - \mathbf{h}_N^H(k-1)\mathbf{X}_{NF}(k) \quad (4.6)$$

$$\mathbf{h}'_N(k) = \mathbf{h}_N(k-1) + \mathbf{G}_{NF}(k)\mathbf{b}_F^H(k) \quad (4.7)$$

$$\mathbf{h}_N(k) = \mathbf{h}'_N(k) + \mathbf{Q}_{NJ}(k)[\mathbf{f}_J - \mathbf{C}_{NJ}^H\mathbf{h}'_N(k)] \quad (4.8)$$

End for  $k$

В рассмотренных алгоритмах вычисление всех матриц с числом столбцов, равным  $F$ , может быть выполнено с помощью  $F$  параллельных процессоров, так как эти вычисления не зависят друг от друга и определяются независимыми элементами матриц  $\mathbf{X}_{NF}(k)$ . Полное число арифметических операций в одноименных последовательных и параллельных алгоритмах примерно одинаково. Однако при использовании  $F$  процессоров для реализации параллельных алгоритмов вычислительная нагрузка на один процессор уменьшается в  $F$  раз. Рассмотренные алгоритмы и их частные случаи могут быть использованы во всех традиционных приложениях адаптивной обработки сигналов. Результаты моделирования, подтверждающие работоспособность рассмотренных алгоритмов, полностью совпадают с результатами, представленными в [3].

#### Литература

1. Джиган В.И. Многоканальные RLS и быстрые RLS алгоритмы адаптивной фильтрации // Успехи современной радиоэлектроники. 2004. №11. С. 48 - 77.
2. Papaodysseus C. A robust, parallelizable, O(m), a posteriori recursive least squares algorithm for efficient adaptive filtering // IEEE Trans. Signal Processing. 1999. Vol. 47. №9. P. 2552 - 2558.
3. Джиган В.И. Параллельный регуляризованный быстрый RLS алгоритм многоканальной адаптивной фильтрации со скользящим окном и линейными ограничениями // Труды 10-й Международной конференции «Радиолокация, навигация, связь (RLNC-2004)». Воронеж, 13 - 15 апреля 2004 г. Том 1. С. 132 - 142.
4. Джиган В.И. RLS алгоритм адаптивной фильтрации для параллельной реализации с помощью четырех процессоров // Цифровая обработка сигналов. 2004. №3. С. 2 - 8.
5. Djigan V.I. Parallelizable multichannel SW fast RLS algorithm for implementation by means of four processors // Proceedings of the Second International Conference on Information Systems and Technology (IST-2004). November 8 - 12, 2004, Minsk, Belarus. Vol. 2. P. 100 - 105.
6. Resende L.S., Romano J.M.T., Bellanger M.G. A fast least-squares algorithm for linearly constrained adaptive filtering // IEEE Trans. Signal Processing. 1996. Vol. 44. №5. P.1168 - 1174.
7. Giordano A.A., Hsu F.M. Least square estimation with application to digital signal processing. Canada, Toronto: John Wiley and Sons, Inc., 1985. 412 p.

#### MODIFIED ADAPTIVE FILTERING ALGORITHMS FOR PARALLEL IMPLEMENTATION

Djigan V.

ELVEES R&D Center, POB 19, Centralny Prospect, Zelenograd, Moscow K-460, Russia 124460  
Tel.: +7-095-531-1961. E-mail: [djigan@elvees.ru](mailto:djigan@elvees.ru). URL: <http://www.elvees.ru>

**Abstract:** The paper presents the simple forms of sliding window RLS and linearly-constrained RLS adaptive filtering algorithms with the regularization of adaptive filter correlation matrix, fitted to parallel implementation. The algorithms are mathematically identical to the proper known algorithms with sequential and parallel computations.

#### УТРАЧЕННОЕ ГЕНЕРАЛЬНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Капустян В.М.

ГУП г. Москвы - НИИ Информационных Технологий

Монопольное положение неймановских компьютеров

Компьютеры с неймановской архитектурой изначально захлестнули всю мировую практику создания и использования средств вычислительной техники (СВТ) и до сегодняшнего дня держат монополию. Сам Дж. фон Нейман предупреждал, что его принцип построения ЭВМ – не единственный и не самый лучший, однако предупреждение это услышано не было. Действительно, предложенная архитектура плохо приспособлена для параллельных вычислений с произвольной точностью, что на сегодня становится главным из требований.

#### **Попытки нарушить монополию**

##### **Работы школы Акушского И.Я.**

Акушский Израиль Яковлевич – предпринял первую подобную попытку и стал основоположником нетрадиционной компьютерной арифметики, базирующейся на системе счисления в остаточных классах (СОК, 1956г) и полиадической системе счисления (ПАС – 1971 [1]). Акушский, вначале - вычислитель Научно-исследовательского института математики и механики МГУ, затем младший научный сотрудник Математического института им. В.С. Стеклова, а с 1948 г. заведующий лабораторией Института точной механики и вычислительной техники - ИТМ и ВТ Академии наук СССР.

В 1960г. Акушский возглавил разработку новой ЭВМ в Научно-исследовательском институте дальней радиосвязи. Для ЭВМ в СОК была задана производительность - 1,25 млн. операций в секунду (в то время производительность ЭВМ определялась всего десятками тысяч операций в секунду). ЭВМ была создана и использовалась в системе ПВО страны. Её до сих пор выпускают и используют после перевода на интегральную элементную базу.

Более 90 изобретений по техническим решениям подсистем СОК-ЭВМ были запатентованы в Великобритании, США, Японии. Были начаты работы по созданию универсальной не неймановской ВМ при поддержке некоторых фирм США. Однако жёстким административным решением работы были свёрнуты и переведены в «академическую плоскость».

Опытный образец СОК-УВМ был изготовлен в Днепропетровске под руководством Акушского, только после его выхода на пенсию. В 1992 г. им был намечен круг проблем применения СОК в сверхвысоких диапазонах чисел, разработаны методы проведения вычислений в супербольших диапазонах с числами в сотни тысяч разрядов. Это определило подходы к решению ряда нерешённых задач теории чисел. Но, к сожалению, это также был уход с генерального направления разработок и применения СВТ.

##### **Попытка В.Ф. Турчина**

В 70-е годы последнего века прошлого тысячелетия в СССР В. Турчин предпринял попытку нарушить неймановскую монополию, предложив REFAL-машины и принцип суперкомпиляции. Но в силу ряда отнюдь не инженерных и политических осложнений он покинул страну и только в последнее время, уже будучи подданным США, возглавил проект PRINCIPIA CYBERNENICA, которые ещё только набирает силу. Проект находит отражение во всемирной паутине - <http://pespmc1.vub.ac.be> и <http://pcp.lanl.gov>.

##### **Попытка Г.П. Мельникова**

Г.П. Мельников разработал и опубликовал сегментную символику и четырёхзначное логическое исчисление, позволяющие производить быстрые однопроходные эквивалентные преобразования логических выражений. Кроме того, эти преобразования толерантны к форме и порядку записи логических операторов, операндов-переменных и операндов-констант (данных), что устраняет сам принцип фон Неймана - текст программы не отделён от данных.

##### **Попытка Ю.А. Махотенко**

В работе [2] была предложена и рассмотрена обобщённо-полиадическая система счисления (ОПА), которая в сочетании с СОК даёт принципиальную возможность устранить из процесса работы СВТ понятий «шаблоны данных», «храняемая запись», «файловое хозяйство», «поиск в БД» и т.д. Сочетание СОК, ОПА и формального символизма Г.П. Мельникова открыло возможность построить сверхбыстродействующую «не неймановскую» ЭВМ принципиально нового класса и принципиально иных областей применения, например, к задачам морфологической техносистематики – новой дисциплины, родственной САПР [3].

Эта возможность была реализована группой минских конструкторов во главе с Махотенко Ю.А. В построенной ЭВМ на интегральных компонентах процессы поиска принципиально отсутствуют и заменены на воспроизводящие вычисления в высокоразрядной ОПА-арифметике. Макетный образец этого нового устройства был реализован и испытан. По нему получено авторское свидетельство на изобретение [4]. Впоследствии группа разработчиков по различным причинам распалась, и работы были прекращены.

##### **Итог**

На сегодняшний день неймановская монополия не поколеблена. Все упомянутые выше попытки её нарушить хотя и были принципиальными альтернативами архитектуре фон Неймана, на деле оказались по разным причинам не реализованными. Неймановский принцип давно себя исчерпал и прогресс СВТ идёт здесь по болезненным обходным путям. Но это только кажется, что они обходные. Это – тупик.

В то же время генеральное, направление создания СВТ не обозначено, позабыто и «законсервировано». Объяснение может быть только в одном: пока ведущие компьютерные корпорации в своих попытках «выжать

всё» из морально устаревших решений не испытают состояние жесточайшего кризиса, альтернативные архитектуры будут находиться в состоянии анабиоза.

**Литература**

1. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. О комбинаторном подходе к идее сжатия информации. В кн.: Цифровая вычислительная техника и программирование. М.: Сов. радио, 1971, вып.6, с.5-17.
2. Капустян В.М., Беляев И.П. Медведев Б.Г. Комбинаторная память Известия АН СССР, Техническая кибернетика. 2, 1980.
3. Капустян В.М., Махотенко Ю.А. Конструктору о конструировании атомной техники. Системно-морфологический подход в конструировании. М.: «Атомиздат», 1981. - 191с.
4. Капустян В.М., Махотенко Ю.А., Ордин Ю.Л., Пинаев В.Ю. Авторское свидетельство СССР. № 454561, Кл. G 06 F 15/40. Устройство.



**УМЕНЬШЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ В ЛИНЕЙНО-ОГРАНИЧЕННОМ АЛГОРИТМЕ АФФИННЫХ ПРОЕКЦИЙ**

Джиган В.И.

ГУП НПЦ “ЭЛВИС”, а/я 19, Центральный проспект, Зеленоград, Москва К-460, Россия 124460  
 Тел.: +7-095-531-1961. Эл. почта: [djigan@elvees.ru](mailto:djigan@elvees.ru). Интернет: <http://www.elvees.ru>

**Аннотация:** В статье рассматривается многоканальный линейно-ограниченный алгоритм аффинных проекций для адаптивных фильтров с неодинаковым числом комплексных весовых коэффициентов в каналах. Показаны основные шаги получения такого алгоритма и выигрыш в числе арифметических операций по сравнению с обычным линейно-ограниченным алгоритмом аффинных проекций.

При решении ряда задач адаптивной обработки сигналов требуется применять адаптивные фильтры с большим числом весовых коэффициентов. Использование в таких фильтрах эффективных рекурсивных алгоритмов по критерию наименьших квадратов (Recursive Least Squares, RLS) [1] часто не представляется возможным в силу требуемых больших вычислительных затрат, а простейшие нормализованные алгоритмы по критерию наименьшего среднеквадратичного отклонения (Normalized Least Mean Squares, NLMS) не обеспечивают необходимых показателей качества. Поэтому в таких приложениях обычно применяется алгоритм аффинных проекций (Affine Projection, AP) с вычислительной сложностью (числом арифметических операций, необходимых для выполнения одной итерации)  $O(NL)$  [2], или используются быстрые версии этого алгоритма (Fast AP, FAP) [3-6] с вычислительной сложностью  $O(N + L)$ , где  $N$  – число весовых коэффициентов адаптивного фильтра, а  $L$  – размер проекции (длина скользящего окна, на котором определяется градиент).

RLS, NLMS и AP алгоритмы базируются на методах безусловной минимизации функционалов (ошибки на выходе адаптивного фильтра: среднеквадратичной, мгновенной или на блоке данных). В ряде приложений требуется условная оптимизация таких функционалов при наличии линейных ограничений (Linear Constraints, LC) [7, 8]. В отношении алгоритмов аффинных проекций известна только версия одноканального LC алгоритма с действительными весовыми коэффициентами [9].

В настоящей работе представлен многоканальный LC AP алгоритм с неодинаковым числом комплексных весовых коэффициентов в каналах адаптивного фильтра. Структура такого фильтра может быть найдена, например, в [1]. С учетом [5, 9], многоканальный LC AP алгоритм может быть представлен набором следующих уравнений:

$$\mathbf{h}_N(k) = \mathbf{P}_N [\mathbf{h}_N(k-1) + \mu(k) \mathbf{X}_{NL}(k) \mathbf{e}_L(k)] + \mathbf{a}_N, \tag{1}$$

$$\mathbf{e}_L(k) = [\mathbf{X}_{NL}^H(k) \mathbf{P}_N \mathbf{X}_{NL}(k) + \delta \mathbf{I}_L]^{-1} \mathbf{b}_L^*(k), \tag{2}$$

$$\mathbf{b}_L(k) = \mathbf{d}_L(k) - [\mathbf{h}_N^H(k-1) \mathbf{X}_{NL}(k)]^T, \tag{3}$$

$$\mathbf{P}_N = \mathbf{I}_N - \mathbf{C}_{NJ} [\mathbf{C}_{NJ}^H \mathbf{C}_{NJ}]^{-1} \mathbf{C}_{NJ}^H, \tag{4}$$

$$\mathbf{a}_N = \mathbf{C}_{NJ} [\mathbf{C}_{NJ}^H \mathbf{C}_{NJ}]^{-1} \mathbf{f}_J \tag{5}$$

где  $\mathbf{e}_L(k) = [\varepsilon(k), \varepsilon(k-1), \dots, \varepsilon(k-L+1)]^T$ ,  $\mathbf{b}_L(k) = [\alpha(k), \alpha(k-1), \dots, \alpha(k-L+1)]^T$ ,  
 $\mathbf{d}_L(k) = [d(k), d(k-1), \dots, d(k-L+1)]^T$ ,  $\mathbf{X}_{NL}(k) = [\mathbf{c}_N(k), \mathbf{c}_N(k-1), \dots, \mathbf{c}_N(k-L+1)]$ ,

$\mathbf{c}_N(k) = [\mathbf{x}_{N_1}^T(k), \dots, \mathbf{x}_{N_m}^T(k), \dots, \mathbf{x}_{N_M}^T(k)]^T$ ,  $\mathbf{x}_{N_m}(k) = [x_m(k), x_m(k-1), \dots, x_m(k-N_m+1)]^T$ ,  
 $\mathbf{h}_N(k) = [\mathbf{h}_{N_1}^T(k), \dots, \mathbf{h}_{N_m}^T(k), \dots, \mathbf{h}_{N_M}^T(k)]^T$  и  $\mathbf{h}_{N_m}(k) = [h_m(k), h_m(k-1), \dots, h_m(k-N_m+1)]^T$ . Здесь  $k$  – индекс дискретного времени (номер итерации алгоритма),  $M$  – число каналов адаптивного фильтра,  $N = \sum_{m=1}^M N_m$  – общее число весовых коэффициентов адаптивного фильтра,  $N_m$  – число весовых коэффициентов в  $m$ -м канале адаптивного фильтра,  $L$  – размер проекции ( $L \ll N$ ),  $\mathbf{b}_L(k)$  и  $\mathbf{e}_L(k)$  – векторы ошибок и нормализованных ошибок адаптивного фильтра,  $\mathbf{d}_L(k)$  – вектор отсчетов сигналов на основном входе адаптивного фильтра,  $d(k)$  – текущее значение выборки сигнала на основном входе адаптивного фильтра,  $\mathbf{h}_N(k)$  – вектор весовых коэффициентов  $M$ -канального адаптивного фильтра,  $\mathbf{h}_{N_m}(k)$  – вектор весовых коэффициентов в  $m$ -м канале адаптивного фильтра,  $\mathbf{c}_N(k)$  – вектор сигналов  $M$ -канального адаптивного фильтра,  $\mathbf{x}_{N_m}(k)$  – вектор сигналов в  $m$ -м канале адаптивного фильтра,  $x_m(k)$  – текущее значение выборки сигнала на входе  $m$ -го канала адаптивного фильтра,  $\delta$  – параметр регуляризации,  $\mathbf{I}$  – единичная матрица,  $\mu(k)$  – переменный шаг сходимости,  $\mathbf{f}_J = \mathbf{C}_{NJ}^H \mathbf{h}_N(k)$  – вектор  $J$  значений линейных ограничений, задаваемых матрицей ограничений  $\mathbf{C}_{NJ}$  [7-9]. В данной работе векторы обозначены жирными строчными буквами, а матрицы – жирными заглавными буквами. Нижние индексы указывают на размер (число элементов) векторов и матриц. Два индекса используются в обозначениях прямоугольных матриц, а один индекс – в обозначениях векторов и квадратных матриц. Символы  $H$  и  $T$  означают операции эрмитово сопряжения и транспонирования вектора или матрицы. Символ  $*$  означает операцию комплексного сопряжения переменной.

Из-за наличия проецирующей матрицы  $\mathbf{P}_N$  с числом элементов, равным  $N \times N$ , вычислительная сложность LC AP алгоритма пропорциональна  $O(N^2)$  арифметических операций. Необходимость умножения переменных алгоритма на эту матрицу не позволяет получить LC AP алгоритм с вычислительной сложностью  $O(N)$ . Однако, используя ряд преобразований, аналогичных [3, 7], можно уменьшить вычислительную сложность LC AP алгоритма [9], которая примерно равна  $2N^2 + (N+1)L^2 + (2N+1)L + O(L^3)$  умножений со сложением и  $2N + L^2$  сложений. Здесь  $O(L^3)$  вычислительная сложность обращения матрицы в уравнении (2).

Первым шагом уменьшения вычислительной сложности LC AP алгоритма является эквивалентное преобразование уравнения вычисления вектора весовых коэффициентов (1) к виду

$$\mathbf{h}_N(k) = \mathbf{h}'_N(k) + \mathbf{Q}_{NJ} [\mathbf{f}_J - \mathbf{C}_{NJ}^H \mathbf{h}'_N(k)], \quad (6)$$

где  $\mathbf{h}'_N(k) = \mathbf{h}_N(k-1) + \mu(k) \mathbf{X}_{NL}(k) \mathbf{e}_L(k)$ , а  $\mathbf{Q}_{NJ} = \mathbf{C}_{NJ} [\mathbf{C}_{NJ}^H \mathbf{C}_{NJ}]^{-1}$ . Вычислительная сложность уравнения (6) примерно равна  $2NJ$  умножений со сложениями и  $N+J$  сложений. Таким образом, использование уравнения (6) вместо умножения на матрицу  $\mathbf{P}_N$  в уравнении (1) заменяет операцию с вычислительной сложностью  $N^2$  умножений со сложением на операцию со сложностью всего  $2NJ$  таких операций.

Используя (6), можно показать, что аналогично FAP алгоритму без линейных ограничений, вектор  $\mathbf{b}_L(k)$  можно определять как

$$\mathbf{b}_L(k) = \begin{bmatrix} \alpha(k) \\ [1 - \mu(k-1)] \mathbf{b}_{L-1}(k-1) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{b}_{L-1}(k-1)$  – первые  $L-1$  элементов вектора  $\mathbf{b}_L(k-1)$ , а  $\alpha(k) = d(k) - \mathbf{h}_N^H(k-1) \mathbf{c}_N(k)$ .

Уравнение (2) получено на основании соотношения  $\mathbf{P}_N = \mathbf{P}_N^H \mathbf{P}_N$ . Исходя из данного соотношения, и а также того факта, что матрица  $\mathbf{P}_N$  является ортонормированной можно показать, что матрица  $\mathbf{R}_L(k) = \mathbf{X}_{NL}^H(k) \mathbf{P}_N \mathbf{X}_{NL}(k)$  вычисляется как

$$\mathbf{R}_L(k) = \begin{cases} \mathbf{R}_{2:L,2:L}(k) = \mathbf{R}_{1:L-1,1:L-1}(k-1) \\ \mathbf{R}_{1,1:L}(k) = \tilde{\mathbf{q}}_N^H(k) \tilde{\mathbf{q}}_N(k-l), \quad \text{при } l=0:L-1, \\ \mathbf{R}_{2:L,1}(k) = \tilde{\mathbf{q}}_N^H(k-l) \tilde{\mathbf{q}}_N(k), \quad \text{при } l=1:L-1 \end{cases} \quad (8)$$

где  $\tilde{\mathbf{q}}_N(k) = \mathbf{P}_N \mathbf{q}_N(k)$ . Таким образом, вместо вычисления полной матрицы, требующего  $NL^2$  арифметических операций, можно вычислять лишь элементы первой строки или первого столбца, для чего требуется всего  $N(L-1)$  арифметических операций.

Так как элементы столбцов матрицы  $\tilde{\mathbf{X}}_{NL}(k)$  не удовлетворяют условию инвариантности к сдвигу, то использовать теорию линейного предсказания для получения обратной матрицы (подобно FAP алгоритмам) в уравнении (2) не представляется возможным.

Обращение этой матрицы можно осуществлять различными способами. Например, можно рекурсивно использовать лемму об обращении клеточных матриц [10]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^H & \mathbf{C} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{-1} + \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} (\mathbf{C} - \mathbf{B}^H \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^H \mathbf{A}^{-1} & -\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} (\mathbf{C} - \mathbf{B}^H \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \\ -(\mathbf{C} - \mathbf{B}^H \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^H \mathbf{A}^{-1} & (\mathbf{C} - \mathbf{B}^H \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Вычислительная сложность такого обращения с учетом структуры матрицы примерно равна  $2L^3/3$  арифметических операций.

Вычислительная процедура модифицированного LC AP алгоритма представлена ниже.

Вычисления	Ссылки
<b>Initialization</b> : $\mathbf{q}_N(0) = \mathbf{0}_N, \hat{\mathbf{f}}_N(0) = \mathbf{0}_N, \mathbf{X}_{NL}(0) = \mathbf{0}_{NL}, \bar{\mathbf{b}}_L(0) = \mathbf{0}_L, \mathbf{p}_L(0) = \mathbf{0}_L, \mu(0) = \mu, \mathbf{h}_N(0) = \mathbf{Q}_{NJ} \mathbf{f}_J$	(1.0)
<b>For</b> $k = 1, 2, \dots, K$	
$\alpha(k) = d(k) - \mathbf{h}_N^H(k-1) \mathbf{q}_N(k)$	(1.1)
$\bar{\mathbf{b}}_L(k) = \begin{bmatrix} \alpha(k) \\ [1 - \mu(k-1)] \bar{\mathbf{b}}_{L-1}(k-1) \end{bmatrix}$	(1.2)
$\mathbf{e}_L(k) = [\mathbf{R}_L(k) + \mathbf{d}_L]^{-1} \bar{\mathbf{b}}_L(k)$	(1.3)
$\mathbf{p}_L(k) = \mu(k) \mathbf{e}_L(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\mathbf{p}}_{L-1}(k-1) \end{bmatrix}$	(1.4)
$\hat{\mathbf{f}}_N(k) = \hat{\mathbf{f}}_N(k-1) + \mathbf{q}_N(k-L+1) p_{L-1}(k)$	(1.5)
$\mathbf{h}'_N(k) = \hat{\mathbf{f}}_N(k) + \bar{\mathbf{X}}_{N(L-1)}^{-1}(k) \bar{\mathbf{p}}_{L-1}(k)$	(1.6)
$\mathbf{h}_N(k) = \mathbf{h}'_N(k) + \mathbf{Q}_{NJ} [\mathbf{f}_J - \mathbf{C}_{NJ}^H \mathbf{h}'_N(k)]$	(1.7)
<b>End for</b> $k$	

Вычисление вектора весовых коэффициентов адаптивного фильтра при отсутствии ограничений  $\mathbf{h}'_N(k)$  может быть осуществлено в несколько приемов, см. (1.4), (1.5) (т.е. как в FAP алгоритмах [3-6]) и как (1.6). В уравнении (1.6),  $\bar{\mathbf{X}}_{N(L-1)}^{-1}(k)$  – матрица, состоящая из столбцов  $1, \dots, L-1$  матрицы  $\mathbf{X}_{NL}(k)$ , а  $\bar{\mathbf{p}}_{L-1}(k)$  – вектор, состоящий из элементов  $1, \dots, L-1$  вектора  $\mathbf{p}_L(k)$ . Вычислительная сложность этого уравнения равна  $N(L-1)$  арифметических операций, т.е.  $O(NL)$ . В FAP алгоритмах вектор  $\mathbf{h}'_N(k)$  непосредственно не вычисляется, что, в конечном итоге, позволяет получить такой алгоритм с вычислительной сложностью  $O(N+L)$  арифметических операций. В LC алгоритмах вектор  $\mathbf{h}'_N(k)$  присутствует в явном виде, см. (6) и (1.7), что и вызывает необходимость его вычисления.

Полная вычислительная сложность рассмотренного LC AP алгоритма примерно равна  $N^2 + 2N(L+J) + O(L^3)$  умножений со сложениями,  $(L-1)$  умножений и  $N + L^2 + J$  сложений, т.е. примерно на  $N^2 + (N+1)L^2$  операций меньше, чем у LC AP алгоритма [9], при условии, что вычисление обратной матрицы в уравнениях (2) и (1.3) осуществляется одинаковым способом.

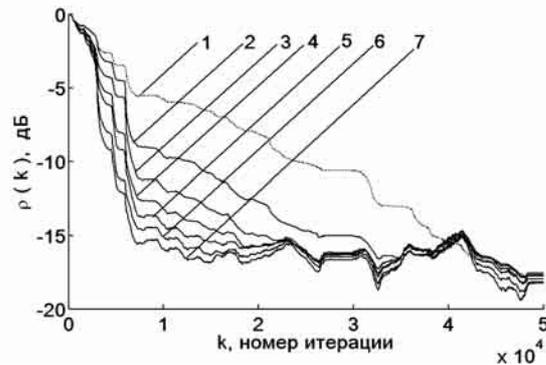


Рис. 1. Рассогласование: 1 – LC NLMS алгоритм; 2,3,...,7 – LC AP алгоритм,  $L = 2,4,8,16,32,64$

Рис. 2. Рассогласование: 1 – NLMS алгоритм; 2,3,...,7 – FAP алгоритм,  $L = 2,4,8,16,32,64$

Моделирование, рис. 1, подтверждает работоспособность рассмотренного алгоритма в задаче подавления акустического эхо. Двухканальный импульсный отклик ( $N_1 = N_2 = 1024$ ) определялся помощью LC AP и LC NLMS алгоритмов. В экспериментах,  $\delta = 0.1 \approx 30\sigma_x^2$ , где  $\sigma_x^2$  – дисперсия входных (речевых) сигналов, а отношение сигнал-шум на основном входе равнялось 30 дБ. Рассматривались алгоритмы с постоянным шагом сходимости  $\mu(k) = 1$ . Многоканальный LC AP алгоритм, подобно FAP алгоритму без ограничений [6], см. рис. 2, демонстрирует превосходство над LC NLMS алгоритмом с точки зрения длительности переходного процесса в таком показателе качества как рассогласование  $\rho(k) = 20 \log_{10} \frac{\|\mathbf{h}_N(k) - \mathbf{w}_N\|_2}{\|\mathbf{w}_N\|_2}$ . Здесь  $\mathbf{w}_N = [\mathbf{w}_{N_1}^T, \mathbf{w}_{N_2}^T]^T$  – идентифицируемые импульсные отклики, а  $d(k) = \mathbf{w}_N^T \mathbf{c}_N(k)$ .

Таким образом, в настоящей статье рассмотрен многоканальный LC AP алгоритм, который может быть использован в адаптивных фильтрах с большим числом весовых коэффициентов при решении LC задач адаптивной фильтрации.

#### Литература

1. Джиган В.И. Многоканальные RLS и быстрые RLS алгоритмы адаптивной фильтрации // Успехи современной радиоэлектроники. 2004. №11. С. 48 - 77.
2. Ozeki K., Umeda K. An adaptive filtering algorithm using orthogonal projection to an affine subspace and its properties // Trans. IEECE Japan. 1984. Vol. J67A. №2. P. 126 - 132.
3. Gay S.L. A fast converging, low complexity adaptive filtering algorithm // Third International Workshop on Acoustic Echo Control. Plestin les Greves, France, 1993. P. 223 - 226.
4. Djigan V.I. Improved fast affine projection algorithm with gradient adaptive step-size // Proceedings of the 3-rd International Conference on Antennas, Radiocommunication Systems & Means (ICARSM'97). Voronezh, May, 1997. Vol. 3. P. 23 - 32.
5. Джиган В.И. Быстрый многоканальный алгоритм аффинных проекций с комплексными коэффициентами для адаптивной фильтрации // Доклады 5-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применения (DSPA-2003)». Москва, март 2003. Том 1. С. 39 - 44.
6. Джиган В.И. Многоканальный быстрый алгоритм аффинных проекций с использованием обратного QR разложения // Доклады 7-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применения (DSPA-2005)». Москва, март 2005 г.
7. Resende L.S., Romano J.M.T., Bellanger M.G. A fast least-squares algorithm for linearly constrained adaptive filtering // IEEE Trans. Signal Processing. 1996. Vol. 44. №5. P. 1168 - 1174.
8. Frost O.L. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing // Proceedings of the IEEE. - August 1972. Vol. 60. P. 926-935.
9. De Campos M.R.L., Apolinario J.A. The constrained affine projection algorithm - development and convergence issues // First Balkan Conference on Signal Processing, Communications, Circuits, and Systems. Istanbul, May 2000. 4 p.
10. Giordano A.A., Hsu F.M. Least square estimation with application to digital signal processing. Canada, Toronto: John Wiley and Sons, Inc., 1985. 412 p.

**COMPUTATIONAL COMPLEXITY REDUCING IN LINEARLY-CONSTRAINED AFFINE PROJECTION ALGORITHM**

Djigan V.

ELVEES R&D Center, POB 19, Centralny Prospect, Zelenograd, Moscow K-460, Russia 124460  
Tel.: +7-095-531-1961. E-mail: [djigan@elvees.ru](mailto:djigan@elvees.ru) . URL: <http://www.elvees.ru>

**Abstract:** The paper presents a multichannel linearly-constrained affine projection algorithm for adaptive filters with unequal number of complex-valued weights in channels. Basic steps of the algorithm development and the complexity decreasing in comparing with known linearly-constrained affine projection algorithm are demonstrated.

**ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТНОГО ПОИСКА**

Карпов В.Э.

НИИ Информационных технологий, г.Москва

В настоящей работе предлагается один из подходов к решению поисковых задач, основанных на использовании классических градиентных методов. Известно, что ахиллесовой пятой градиентного поиска является опасность застревания в локальных экстремумах. Подавляющее большинство способов улучшения градиентных процедур сводится к трем основным приемам:

1. Изменение шага поиска во времени.
2. Использование случайных вариаций направлений шагов.
3. Многократный запуск поисковой процедуры с различными начальными условиями. К этому же методу можно свести, например, "равномерный засев" поискового пространства особями начальной популяции, применяемый в генетических алгоритмах.

Естественно, что при этом в любом случае не идет речь о нахождении глобального экстремума, гарантированно достижимого лишь полным перебором. Очевидно, исходя из наблюдения Шеннона [1] об инварианте соотношении время/память, ускорить поисковую процедуру можно лишь увеличивая емкостные затраты, либо используя дополнительные структурные построения.

Итак, пусть имеется некий объект (точка, агент), обладающий возможностью поиска как минимум локального экстремума (в простейшем случае управляемый, например, градиентной процедурой). Будем считать, что задача заключается в исследовании (обходе) некоторого ограниченного пространства с целью обнаружения глобального экстремума (минимума). Предположим, что найден очередной локальный экстремум (т. А, рис. 1).

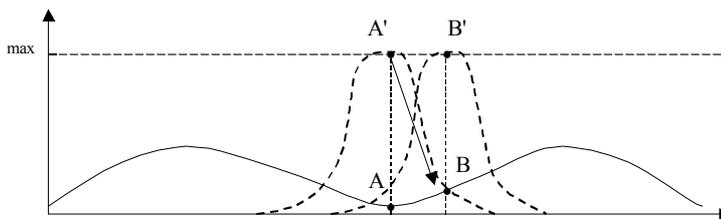


Рис. 1.

Придадим агенту способность оказывать локальное влияние на ту область пространства, в которой он находится. Например, изменяя "ландшафт", превращая некоторый локальный минимум в максимум (при условии ограниченности области значений исследуемого функционала). Содержательно это может рассматриваться как аналогия с поиском наиболее богатого пастбища. Стадо, выедавая корм, изменяет поисковое пространство. И если в этом месте был выеден весь корм, стадо туда больше не вернется, а будет продолжать искать экстремум дальше (даже если этот экстремум был глобальным).

Подобное изменение ландшафта приведет к тому, что из состояния A' объект перейдет к ближайшему экстремуму B и, достигнув его, вновь изменит ландшафт, перейдя в B'.

Эта процедура может рассматриваться как *планирование поиска* на самом нижнем уровне – уровне 0. Очевидно, что через некоторое время появятся максимальные *потенциальные барьеры* (рис. 2,а). Находясь на этом барьере (равно как и в любой другой области, где градиент равен нулю – т.н. эквипотенциали), объект остановится в состоянии безразличного равновесия. Иными словами, система (объект) достигнет границы своей *компетентности планирования*.

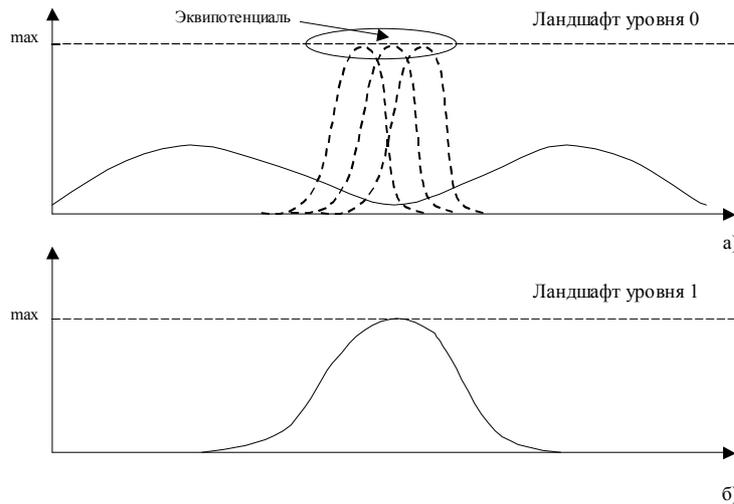


Рис. 2.

В такой ситуации предлагается переход на следующий уровень планирования направления поиска. Для чего создается поисковый ландшафт *уровня 1*, определяющий направление движения предыдущего уровня (рис. 2,б). По мере появления на уровне 0 новых эквипотенциальных областей, формируются новые поверхности уровня 1.

Если на уровне 1 обнаруживается эквипотенциаль, то строится поверхность уровня 2 и т.д. Количество уровней должно быть ограниченным, поэтому самый верхний уровень может использовать, скажем, случайный выбор направления.

Таким образом, предлагается использовать иерархическую систему планирования процедуры поиска. При этом происходит быстрый (за счет использования градиентных процедур) обход поискового пространства, причем устраняется опасность застревания на локальных экстремумах. Качество (и скорость в т.ч.) поиска определяется эффективностью используемого базового механизма, начиная с простейшей "градиентной точки" и заканчивая такими сложными, как хромосома в генетическом программировании или популяция в эволюционном моделировании.

При этом очевидно, что и форма барьеров, и условия возникновения эквипотенциали зависят от шага градиентной процедуры. Кроме того, открытыми остаются такие вопросы, как условие останова процедуры обхода (предположительно, это должно быть связано со степенью покрытия ландшафтов высокого уровня потенциальными барьерами), влияние размерности поискового пространства на количество уровней планирования и т.д.

#### Литература

1. Shannon C.E. An Universal Turing Machine With Two Internal States. In Automata Studies, Princeton U.Press, Princeton, N.J., 1956, p.157-165.

### ABOUT ONE METHOD OF GRADIENT SEARCH PLANNING

Karpov V.

Moscow Scientific Research Institute of Information Technologies,  
Russia, 113054, Moscow, Bakhrushina 18,bld 3. karpov\_ve@mail.ru

In this paper one of approaches to improving of gradient search is discussed. This approach uses a hierarchy of search planning. When an agent reaches a local extremum, it changes the surface of the searching space, transforming the local minimum to the local maximum. It names a planning level 0. When the agent reaches a zero gradient state, it comes to the planning level 1 and so on.



### СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОМПРЕССОРОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ ЭФФЕКТИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Нижегородский Государственный Университет им. Н.И. Лобачевского

В последние годы существенно увеличились плотности мощности микрочипов и микропроцессоров. Если текущие тенденции продолжатся, то в ближайшем будущем, как показывают оценки, уровни плотности мощности могут достигнуть нескольких сотен Вт/см<sup>2</sup>. В данный момент не существует эффективных вариантов охлаждения для плотностей мощности таких уровней. Сложившуюся ситуацию усложняет решение корпорации Intel перейти в ближайшее время на многопроцессорные системы рабочих станций и серверов, что также приведет к значительному увеличению уровня плотности мощности системы. Кроме того, каждый микропроцессор в пределах системы может подвергаться изменяющимся нагрузкам, которые приводят к существенным отклонениям потерь мощности, что еще сильнее усложняет задачу охлаждения системы в целом. Если решать данную задачу методами воздушного охлаждения, то итоговое устройство будет громоздким и малоэффективным. Поэтому ведутся активные поиски подходов жидкостного охлаждения, которые позволят эффективно охлаждать многочисленные независимые источники высокой температуры, рассеивающие мощности высокой плотности. При этом ищутся пути исключения из охлаждающей системы электромеханического привода и уменьшения ее габаритов. Ведущийся поиск соответствует известной закономерности развития техники: механические системы логически заменяются на немеханические.

Реализация этой закономерности обеспечит лучшее функционирование немеханических систем: лучшую экологию – снижение уровня шума; улучшает показатели надежности – долговечность, безотказность, ремонтпригодность; улучшает другие эксплуатационные показатели, например, отсутствие смазывающих материалов в рабочей части (охладителе) и т.п. Одним из вариантов решения данной задачи может быть использование акустических компрессоров, главной составной частью которых являются акустические резонаторы.

Акустические резонаторы представляют собой отрезок акустического волновода, в котором благодаря суперпозиции бегущих в противоположные стороны акустических волн возникают стоячие безударные акустические волны с большими перепадами давлений. Это свойство используется в акустических компрессорах для организации сжатия среды (газа, пара или жидкости) с последующим эффектом его охлаждения при расширении. Структура резонатора управляет нелинейными динамическими процессами в среде внутри резонатора и характеристиками стоячих волн формируемых в нём.

Безударные волны высокой амплитуды давления формируются в акустических резонаторах при их колебаниях вдоль продольной оси на основной резонансной акустической частоте. Этот процесс называют движением заполненного резонатора. В акустических резонаторах отсутствуют поршни и мембраны, использующиеся в обычных компрессорах для колебаний среды. Поршнями и мембранами в акустических резонаторах служат жесткие торцевые стенки резонаторов. Клапаны, используемые в этих компрессорах, подобны клапанам обычных поршневых компрессоров. Входные клапаны располагаются в областях акустической волны с минимальной концентрацией вещества охладителя и минимальным давлением. Входные клапаны располагаются в областях акустической волны с максимальной концентрацией вещества охладителя и максимальным давлением.

Учитывая влияние структуры акустического резонатора на фазы и амплитуды волны можно синтезировать желательную форму волны. Каждый тип резонаторов имеет уникальный спектр мод. Если все гармоники совпадают с модами резонатора, то резонатор является согласованным. Иначе, если гармоники находятся на частотах, не совпадающих с модами, то резонатор несогласованный. Разногласие важно при определении нелинейных характеристик резонатора. Например, цилиндрический резонатор – согласованный резонатор, а конусообразный резонатор – несогласованный резонатор. Главное достоинство несогласованных резонаторов – в них формируются безударные акустические волны, в отличие от согласованных резонаторов, в которых формируются ударные акустические волны. Развитие ударных волн приписывается пространственному изменению в звуковой скорости, вызванной большими изменениями в давлении. При распространении динамика максимального давления звуковой волны весьма отличается от динамики ее минимального давления, что приводит к различным звуковым скоростям вдоль линии распространения волны. Поэтому, пики давления волны могут настигнуть минимумы давления, и развивается ударная волна. После возникновения ударной волны вся дополнительная энергия накачиваемая в резонатор уходит на разогрев среды.

Таким образом, количество энергии накачиваемой в резонатор является функцией от структуры резонатора. Изменения в структуре резонатора также затрагивают потребление мощности резонатора из-за изменений в термо-вязких потерях граничного слоя и турбулентности.

Исследование акустических резонаторов перспективно не только для охлаждения микроэлектронных устройств, но и для реализации широкого спектра научно-технических разработок и задач: компрессоры для домашних и промышленных холодильников; насосы, реакторы для различных химических и физических процессов (в том числе в нефтехимии для ускорения и повышения эффективности реакций, в фармакологии,

для стерилизации в медицине) и т.д. Американские ученые в отношении акустических резонаторов считают, что их открытие сравнимо с открытием лазера в оптике [1].

Исследования акустических резонаторов в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского (ННГУ) проводятся с 1998 года в научном коллективе под руководством профессора радиофизического факультета Б.С. Воинова. На их перспективность любезно оказал член корреспондент РАН профессор В.А. Зверев. В пределах выполнения начальных работ в ННГУ по акустическим резонаторам защищены магистерские диссертации Д.А. Суворовым [2] и Е.Ю. Суворовым [3].

В работе Е.Ю. Суворова [3] впервые в отечественных и зарубежных исследованиях поставлена и решена задача синтеза оптимальной структуры акустического резонатора как задача нелинейного математического программирования с поиском глобального экстремума целевой функции. Постановка и решение задачи синтеза оптимальной структуры акустического резонатора оказалась возможной благодаря имеющемуся теоретическому заделу по поиску новых технических решений на основе разработанного метода синтеза и большого опыта успешного решения задач синтеза электродинамических резонаторов на основе этого метода в прикладных оборонных исследованиях [4]. Однако, результаты синтеза в этой работе нельзя считать окончательными, поскольку использованные критерии эффективности решения задач синтеза были недостаточно совершенны, а математическая модель функционирования акустических резонаторов [2] была не совсем адекватной, из-за недоучета потерь.

Позднее исследования акустических резонаторов были продолжены в магистерской диссертации Д. Коровина и дипломных работах С. Корнилова и А.Ю. Рябкина [5]. В дипломной работе А.Ю. Рябкина [5] при участии с.н.с. Нижегородского филиала Института машиноведения РАН А.А. Благонравова им. А.А. Благонравова и к.ф.-м.н. А.В. Кононова была составлена более совершенная математическая модель функционирования акустических резонаторов с учетом потерь. Данная модель не была заимствована из каких-либо предыдущих работ, а была самостоятельно разработана на основе классических уравнений Навье-Стокса, уравнения непрерывности и уравнения состояния для описания гидродинамических систем. В результате была получена сложная система нелинейных дифференциальных уравнений, которая описывает акустические поля в резонаторах с учетом диссипативных эффектов в пограничном слое. Решения данной системы уравнений для различных граничных условий находились численным методом с помощью пакета Maple. Пример полученного решения для конического акустического резонатора (рис. 1) в виде зависимости обезразмеренного давления от времени в наименьшем сечении этого резонатора представлен на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что амплитуда относительного давления  $P/P_0$  в акустическом резонаторе при математическом моделировании с учетом потерь значительно меньше чем без учета. Разница составляет значительную величину в 43%. Отмеченный эффект понижения давления кардинально меняет представление о физических процессах в реальных акустических резонаторах. Это должно существенно сказаться на результатах синтеза оптимальных структур акустических резонаторов и позволит более обоснованно выбирать их конст-

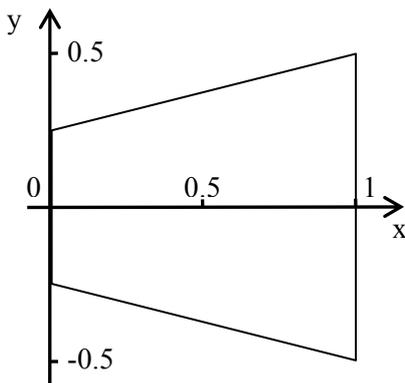


Рис. 1 Разрез конусообразного акустического резонатора вдоль его продольной оси

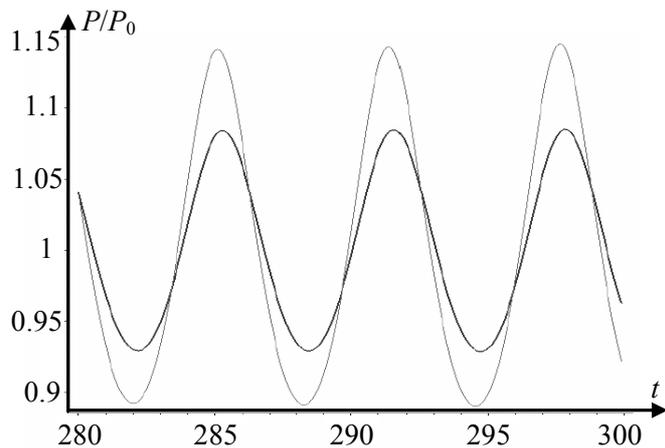


Рис. 2 Зависимость давления в конусообразном акустическом резонаторе без потерь (серая линия) и с потерями (черная линия)

рукцию.

В настоящее время в ННГУ ведутся работы по использованию разработанной математической модели процессов функционирования акустических резонаторов с учетом потерь для синтеза их структур, оптимизированных для использования в акустических компрессорах систем охлаждения.

Система охлаждения с акустическими компрессорами использует циклическое сжатие охладителя для понижения температуры элементов микропроцессорной системы. Подобные системы уже известны, но в настоящее время только развиваются [6]. Главное отличие предлагаемой системы охлаждения состоит в использовании в ней акустических, а не каких либо других, компрессоров. К их основным достоинствам можно отнести отсутствие смазывающих материалов в рабочей части, способность к самоподстройке, низкий профиль, высокую эффективность в отношении низкого давления, отсутствие турбулентного потока, терпимость к ударам. Такими достоинствами не обладает ни один из других типов современных компрессоров. В компьютерной системе с множеством отдельных высокотемпературных нагрузок, в виде множества микропроцессоров, применение акустических компрессоров должно позволить системе охлаждения поддерживать температуру в пределах заданной полосы возможных значений, независимо от изменений нагрузки микропроцессоров. Особенности работы акустических резонаторов позволят системам охлаждения с акустическими компрессорами эффективно работать даже при нагрузке микропроцессов составляющей сотенные доли максимальной.

Охлаждающие системы с акустическими компрессорами будут одними из самых эффективных охлаждающих систем, позволяющими поддерживать заданный диапазон рабочих температур мощных микрочипов и микропроцессоров, а также многопроцессорных систем будущего.

#### Литература

1. Breaking through the acoustic shock barrier, Science News, 12, 1997.
2. Суворов Д.А. Анализ акустических резонаторов. Магистерская диссертация. Научный руководитель проф. Б.С. Воинов. – Н. Новгород, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2000 г.
3. Суворов Е.Ю. Исследование алгоритма поиска глобального экстремума с числами Фибоначчи. Магистерская диссертация. Научный руководитель проф. Б.С. Воинов. – Н. Новгород, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2001 г.
4. Воинов Б.С. Информационные технологии и системы: электронная монография в 2-х частях. – ч.1: Методология синтеза новых решений. ч.2: Прикладные системные исследования. – М., Наука, 2003 г.
5. Рябинкин А.Ю. Анализ акустических резонаторов с учетом потерь. Дипломная работа. Научный руководитель Б.С. Воинов. – Н. Новгород, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2004 г.
6. Bash, C.B. Analysis of Refrigerated Loops for Electronics Cooling, IPACK, July 2001, Kauai, HI.

### THE STATE AND PERSPECTIVES OF THE STUDY ACOUSTIC COMPRESSORS FOR DEVICE OF THE EFFICIENT COOLING MICROELECTRONIC INSTRUMENTS

Voinov B., Suvorov Ye.

The Nigniy Novgorod State University named after N.I. Lobachevskiy (NNSU)

This paper is about perspectives of the using acoustic compressors in systems of cooling microelectronic instruments. The base elements of the acoustic compressors are acoustic resonators. In article also contains short theoretical given about acoustic resonator and history of their study in NNSU.

