

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

$$RMS(X, Y) =$$

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1, j=1}^{m, n} (x_{i,j} - y_{i,j})^2}{mn}}$$

$$SSIM =$$

$$\frac{2XY}{$$

$$(\bar{X})^2 + (\bar{Y})^2}$$

$$\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ji}$$

3(52)/2011

# ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

**Учредитель**  
ОАО «Издательство «Политехника»»

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

**Зам. главного редактора**  
Г. Ф. Мощенко

**Ответственный секретарь**  
О. В. Муравцова

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

**Редакционная коллегия:**  
В. Г. Анисимов,  
доктор технических наук, профессор  
Натан Блаунштейн,  
доктор технических наук, профессор  
Е. А. Крук,  
доктор технических наук, профессор  
В. Ф. Мелехин,  
доктор технических наук, профессор  
А. В. Смирнов,  
доктор технических наук, профессор  
В. И. Хименко,  
доктор технических наук, профессор  
А. А. Шальто,  
доктор технических наук, профессор  
А. П. Шепета,  
доктор технических наук, профессор  
З. М. Юлдашев,  
доктор технических наук, профессор

**Редактор:** А. Г. Ларионова  
**Корректор:** Т. В. Звертановская  
**Дизайн:** С. В. Барашкова, М. Л. Черненко  
**Компьютерная верстка:** С. В. Барашкова

**Адрес редакции:** 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ  
Тел.: (812) 494-70-02  
E-mail: 80x@mail.ru  
Сайт: www.i-us.ru

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

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

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

© Коллектив авторов, 2011

## ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

- Сафронов В. В.** Сравнительная оценка методов «жесткого» ранжирования, справедливого компромисса и равномерной оптимальности в задаче гипервекторного ранжирования систем 2
- Тихонов Э. П.** Вероятностные адаптивные алгоритмы дискретного представления аналоговых сигналов. Часть 2: Сравнительные анализ и численные данные 9
- Соловьев Н. В., Шифрис Г. В.** Улучшение качества сжатых изображений предварительным масштабированием 15
- Манылов И. В.** Сравнение алгоритмов дешифрации аэрофотоснимков земель сельскохозяйственного назначения 24

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Ульянов Г. Н., Лаврентьев Е. А., Павлов И. Н.** Эллипсо-гиперболический метод построения многопозиционных систем 30

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

- Андреев Е. Н., Волков Д. А., Орлов А. Р., Тимофеев С. С., Турубанов М. А., Чубраева Л. И., Шишлаков В. Ф.** Физическое моделирование потерь на трение в режиме холостого хода синхронного ВТСП-двигателя 34

## КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

- Гофман М. В.** Алгебраический пространственно-частотно-временной код 39

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

- Захарова Е. В., Петров П. Н.** Акустоэлектронные устройства обработки сигналов многоэлементных линейных антенных решеток 47

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

- Комаров В. А., Сарафанов А. В.** Оптимизация операций управления в многопользовательских распределенных измерительно-управляющих системах 52

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

- Падерно П. И., Бурков Е. А., Евграфов В. Г.** Критерий согласованности парных сравнений 57

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ

- Гришаков В. Г., Логинов И. В.** Организация распределенного автоматизированного рабочего места студента вуза 61

## УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

- Егошин М. А., Хафизов Р. Г., Гарипова Ю. Е.** Система информационной поддержки хирурга при проведении трансуретральной резекции предстательной железы 66

## УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Соложенцев Е. Д., Яценко С. В.** Логико-вероятностные модели риска неуспеха решения трудных экономических проблем 70
- Дубровский В. Ж., Кузьмин Е. А.** Формирование риск-профиля проектов государственно-частного партнерства 76

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Салангин А. А.** Оценка вероятности выполнения техническим комплексом своих функций с учетом изменения его свойств 82

## ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

- IV Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» — САИТ-2011 85
- Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании» — ИНФОТЕХ-2011 86

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- 87

## АННОТАЦИИ

- 93

ЛР № 010292 от 18.08.98.  
Сдано в набор 22.04.11. Подписано в печать 10.06.11. Формат 60×84/8.  
Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 11,2. Уч.-изд. л. 14,3. Тираж 1000 экз. Заказ 275.

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

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

УДК 519: 816

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ «ЖЕСТКОГО» РАНЖИРОВАНИЯ, СПРАВЕДЛИВОГО КОМПРОМИССА И РАВНОМЕРНОЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ В ЗАДАЧЕ ГИПЕРВЕКТОРНОГО РАНЖИРОВАНИЯ СИСТЕМ

**В. В. Сафронов,**  
доктор техн. наук, профессор  
ОАО «КБ Электроприбор»

Поставлена задача гипервекторного ранжирования систем. Показаны общие принципы ее решения, особенности применения метода «жесткого» ранжирования и методов равномерной оптимальности и справедливого компромисса. Приведен численный пример.

**Ключевые слова** — гипервекторное ранжирование, критерии, свертка критериев, методы равномерной оптимальности, методы справедливого компромисса.

## Введение

В ходе исследования систем (технических, технологических, информационных и т. п.) возникает необходимость использования векторных и многовекторных компонент [20–26]. Задачи принятия решений сводятся в этом случае к задачам многовекторного и гипервекторного ранжирования. В работах [20, 21] осуществлены постановки задач гипервекторного ранжирования, рассмотрены характерные особенности такого класса задач, дан метод решения, основанный на методе «жесткого» ранжирования.

Вместе с тем отечественными и зарубежными учеными накоплен солидный опыт решения задач многокритериальной оптимизации и ранжирования. Разработаны методы, которые широко применяются в прикладных задачах: «жесткого» ранжирования [21], многокритериальной теории полезности [10], анализа иерархий Т. Саати [18], турнирной таблицы [27], Борда [27], равномерной оптимальности, справедливого компромисса, идеальной точки в пространстве критериев [7], минимаксный [4, 5] и многие другие [2–17, 27]. Очевидна целесообразность применения известных методов многокритериального ранжирования с целью решить более сложную задачу гипервекторного ранжирования.

Настоящая статья посвящена постановке задачи гипервекторного ранжирования, рассмотре-

нию общих принципов ее решения, особенностям применения методов «жесткого» ранжирования, равномерной оптимальности, справедливого компромисса и их сравнительной оценке.

Для однозначного понимания введем следующие определения.

**Определение 1.** Многокритериальными называют задачи, в которых векторный критерий представляет собой упорядоченное множество скалярных компонент.

**Определение 2.** Многовекторными называют задачи, в которых векторный критерий представляет собой упорядоченное множество векторных компонент, а каждая векторная компонента — упорядоченное множество скалярных компонент.

**Определение 3.** Гипервекторными называют задачи, в которых векторный критерий представляет собой упорядоченное множество многовекторных компонент, каждая многовекторная компонента — упорядоченное множество векторных компонент, а каждая векторная компонента — упорядоченное множество скалярных компонент.

Особенностями многовекторных и гипервекторных задач являются следующие:

— численные значения и векторных, и многовекторных компонент не известны — соотношения между векторными компонентами подсистем и многовекторными компонентами систем определяются в ходе решения задачи;

— коэффициенты важности назначаются отдельно для многовекторных компонент, векторных компонент и для каждого множества скалярных критериев каждой векторной компоненты.

Заметим, что для рассматриваемого класса задач проводить ранжирование вариантов только по скалярным критериям не вполне корректно в силу различного характера свойств системы (подсистемы), отражаемых векторными компонентами, в которые входят скалярные критерии. Кроме того, при большом числе анализируемых скалярных критериев значения коэффициентов важности [1] становятся малыми, как и их влияние на выбор эффективных систем.

### Постановка задачи гипервекторного ранжирования

Введем необходимые в дальнейшем обозначения:

$S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$  — множество систем;

$S_D \subseteq S$  — множество допустимых систем, для которых в зависимости от специфики системы должны выполняться некоторые дисциплинирующие условия: неравенства, равенства, логические условия и т. п.;

$K_{\varepsilon j}(S_\alpha)$  —  $i$ -й скалярный критерий  $j$ -й векторной компоненты, которая входит в многовекторную компоненту с номером  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = \overline{1, E}, j = \overline{1, r_\varepsilon}, i = \overline{1, r_{\varepsilon j}}$ ). Здесь  $E$  — число многовекторных компонент;  $r_\varepsilon$  — число векторных компонент в многовекторной компоненте с номером  $\varepsilon$ ;  $r_{\varepsilon j}$  — число скалярных критериев в  $j$ -й векторной компоненте, которая, в свою очередь, входит в многовекторную компоненту с номером  $\varepsilon$ ;

$K_{\varepsilon j}(S_\alpha) = \{K_{\varepsilon ji}(S_\alpha), i = \overline{1, r_{\varepsilon j}}\}$ ,  $K_\varepsilon(S_\alpha) = \{K_{\varepsilon j}(S_\alpha), j = \overline{1, r_\varepsilon}\}$ ,  $K(S_\alpha) = \{K_\varepsilon(S_\alpha), \varepsilon = \overline{1, E}\}$  — соответственно множество скалярных, векторных и многовекторных компонент, характеризующих систему  $S_\alpha \in S_D$ ;

$A_{\varepsilon j} = \{a_{\varepsilon ji}, i = \overline{1, r_{\varepsilon j}}\}$ ,  $A_\varepsilon = \{a_{\varepsilon j}, j = \overline{1, r_\varepsilon}\}$ ,  $A = \{a_\varepsilon, \varepsilon = \overline{1, E}\}$  — соответственно множество коэффициентов важности скалярных, векторных и многовекторных компонент, причем  $\sum_{\varepsilon=1}^E a_\varepsilon = 1$ ,  $\sum_{j=1}^{r_\varepsilon} a_{\varepsilon j} = 1$ ,  $\sum_{i=1}^{r_{\varepsilon j}} a_{\varepsilon ji} = 1$ ,  $j = \overline{1, r_\varepsilon}, \varepsilon = \overline{1, E}$ ;

$P = \{S_{k_1}^0, S_{k_2}^0, \dots, S_{k_n}^0\}$  — упорядоченное множество эффективных систем (кортеж Парето),  $P \subseteq S_D$ ; элементы кортежа ранжированы в соответствии с решающими правилами так, что выполняется условие  $S_{k_1}^0 \succ S_{k_2}^0 \succ \dots \succ S_{k_i}^0 \succ \dots \succ S_{k_n}^0$ , где « $\succ$ » — знак отношения доминирования,  $k_i \in \{1, 2, \dots, n\}$ . Длина кортежа —  $n^\pi$ .

Допустим, известны множества  $A, A_\varepsilon, A_{\varepsilon j}, S, K_{\varepsilon j}(S_\alpha)$  ( $\alpha = \overline{1, n}; \varepsilon = \overline{1, E}; j = \overline{1, r_\varepsilon}$ ), решающие правила. Требуется найти кортеж Парето  $P$ , для элементов которого справедливо

$$K(S_{k_i}^0) = \min_{S_\alpha \in S_D} K(S_\alpha), S_{k_i}^0 \in P. \quad (1)$$

### Принципы решения задачи гипервекторного ранжирования

Рассмотрим принципы решения задачи гипервекторного ранжирования, которые не зависят от принимаемого решающего правила.

1. *Представление критериев в виде иерархической структуры.*

Скалярные критерии располагаем на нижнем (третьем) уровне иерархии и объединяем в векторные компоненты (второй уровень иерархии). Векторные компоненты — в многовекторные (первый уровень иерархии), а многовекторные — в гипервекторную компоненту (корневая вершина).

2. *Решение задачи многокритериального ранжирования по скалярным критериям каждой векторной компоненты.*

В результате решения указанной задачи будут построены частные кортежи Парето, которые позволяют однозначно определить расположение вариантов сложных систем  $S_\alpha$  относительно других вариантов по каждой векторной компоненте. Причем выявляются как доминирующие (доминируемые), так и эквивалентные варианты.

3. *Получение количественных оценок векторных компонент.*

Применяя различные методы, получаем оценки векторных компонент, которые зависят от специфики методов. Назовем такие числа *псевдозначениями* (рангами) векторных компонент. Во всех случаях неэффективные варианты не включаем из рассмотрения.

4. *Ранжирование систем по совокупности многовекторных компонент.*

Введение рангов либо количественных оценок векторных компонент позволяет применить один из методов многокритериального ранжирования. Число обращений к методу будет равно числу многовекторных компонент. В результате решения задачи получаем расположение вариантов по совокупности многовекторных компонент, что позволяет построить соответствующие частные кортежи Парето.

5. *Построение кортежа Парето.*

Введение рангов либо количественных оценок многовекторных компонент позволяет применить один из методов многокритериального ранжирования. В итоге и будет построен искомый кортеж Парето.

**Особенности применения некоторых методов для решения задачи гипервекторного ранжирования**

**Метод «жесткого» ранжирования**

Без потери общности изложение будем проводить для систем  $S_\alpha$ ,  $\alpha=1, n$ , свойства которых задают с помощью критериев  $K_j(S_\alpha)$ ,  $j=1, r$ .

В ходе решения задачи будем анализировать множество упорядоченных пар систем  $S_k, S_l$  ( $k=1, n; l=1, n; k \neq l$ ), а результат анализа заносить в специальную оценочную матрицу  $\|C_{kl}\|$ . Сущность метода заключается в следующем [21].

1. На основе попарного сравнения систем  $S_k, S_l$  ( $k=1, n; l=1, n; k \neq l$ ) определяем элементы  $C_{kl}$  оценочной матрицы  $\|C_{kl}\|$ . Значения элементов  $C_{kl}$  подбирают таким образом, чтобы отсеять неэффективные системы.

У эквивалентных систем  $S_k, S_l$  все соответствующие критерии равны. Полагаем  $C_{kl} = 1, C_{lk} = 1$ .

К числу неэффективных систем отнесем варианты, у которых:

а) все значения критериев  $k$ -й системы хуже, чем  $l$ -й системы, тогда полагаем  $C_{kl} = N_2 \gg 1$ ;

б) значения  $m$  ( $m < r$ ) критериев  $k$ -й системы хуже соответствующих значений критериев  $l$ -й системы при равных соответствующих значениях остальных критериев этих систем; тогда полагаем  $C_{kl} = N_3, 1 \ll N_3 < N_2$ .

Если же для систем  $k, l$  имеем лучшие, худшие и, возможно, равные критерии, то значение  $C_{kl}$  определим по методу, изложенному в работах [16, 17].

Обозначим  $N_{kl}^+, N_{kl}^-, N_{kl}^-$  — соответственно подмножества номеров лучших, худших и равных критериев для каждой пары вариантов систем  $S_k, S_l$  ( $k=1, n; l=1, n, k \neq l$ ). Будем осуществлять попарное сравнение систем  $S_k, S_l$  на основе анализа критериев  $K_j(S_k), K_j(S_l), j=1, r$ . Для возможных значений подмножеств номеров  $N_{kl}^+, N_{kl}^-, N_{kl}^-$  введем следующие значения элементов оценочной матрицы  $\|C_{kl}\|$ :

если

$$N_{kl}^+ = \emptyset, N_{kl}^- = \emptyset, N_{kl}^- = \{1, r\}, \text{ то } C_{kl} = 1, C_{lk} = 1; \quad (2)$$

если

$$N_{kl}^+ = \{1, r\}, N_{kl}^- = \emptyset, N_{kl}^- = \emptyset, \text{ то } C_{kl} = N_2, C_{lk} = 0; \quad (3)$$

если

$$N_{kl}^+ = \emptyset, N_{kl}^- = \{1, r\}, N_{kl}^- = \emptyset, \text{ то } C_{kl} = 0, C_{lk} = N_2; \quad (4)$$

если

$$N_{kl}^+ \neq \emptyset, N_{kl}^- = \emptyset, N_{kl}^- \neq \emptyset, \text{ то } C_{kl} = N_3, C_{lk} = 0; \quad (5)$$

если

$$N_{kl}^+ = \emptyset, N_{kl}^- \neq \emptyset, N_{kl}^- \neq \emptyset, \text{ то } C_{kl} = 0, C_{lk} = N_3; \quad (6)$$

если

$$N_{kl}^+ \neq \emptyset, N_{kl}^- \neq \emptyset, |N_{kl}^-| \geq 0, \quad (7)$$

то определим  $C_{kl}$  в виде [16, 17]

$$C_{kl} = \sum_{j \in N_{kl}^+} a_j \left( \sum_{j \in N_{kl}^-} a_j \right)^{-1}, C_{lk} = C_{kl}^{-1}. \quad (8)$$

2. Для формулировки решающих правил введем характерные числа:  $H_l$  — количество элементов в  $l$ -м столбце оценочной матрицы, значения которых больше единицы;  $M_l$  — количество элементов в  $l$ -м столбце той же матрицы, значения которых меньше единицы;  $C_{kl \max}$  — максимальное значение элемента в  $l$ -м столбце матрицы  $\|C_{kl}\|$ .

3. Для реализации «жесткого» ранжирования перейдем от одношагового процесса поиска приоритетного расположения систем к многошаговому процессу [3].

*Решающие правила «жесткого» ранжирования*

3.1. Ранжирование необходимо проводить среди эффективных систем по шагам. Число шагов  $t \leq (n - 1)$ .

3.2. На каждом шаге  $t$  ( $t = 1, 2, \dots, n - 1$ ) нужно: найти числа  $H_l^{(t)}, M_l^{(t)}, C_{kl \max}^{(t)}$  и определить лучшую систему  $S_j$  с минимальным значением  $H_j^{(t)}$  и  $C_{lj} \geq 1 \forall l \in \{1, n\}, l \neq j$ ;

номер  $j$  занести в множество  $P$ ;

исключить из оценочной матрицы  $j$ -ю строку и  $j$ -й столбец.

Если системы с номерами  $l_j \in L_{k(t)} = \{l_1, l_2, \dots, l_j, \dots, l_{k(t)}\}$  имеют одинаковые минимальные значения  $H_{l_j}^{(t)}$ , то лучшей является система  $S_{l_j}$  с максимальным значением  $M_{l_j}^{(t)} = \max_{l_j \in L_{k(t)}} M_{l_j}^{(t)}$ .

3.3. Если системы с номерами  $l_j \in L_{k(t)} = \{l_1, l_2, \dots, l_j, \dots, l_{k(t)}\}$  имеют соответственно одинаковые значения  $H_{l_j}^{(t)}, M_{l_j}^{(t)}$ , то лучшей является система  $S_{l_j}$  с минимальным значением  $C_{l_j}^{(t)} = \min_{l_j \in L_{k(t)}} C_{l_j \max}^{(t)}$ .

3.4. Если лучшие системы имеют соответственно равные значения  $H_l^{(t)}, M_l^{(t)}, C_{kl \max}^{(t)}$ , то такие системы считают эквивалентными.

Подробно метод изложен в работе [21].

Докажем две теоремы, имеющие важное прикладное значение.

**Теорема 1.** Если в  $l$ -м ( $l \in \{1, n\}$ ) столбце оценочной матрицы максимальный элемент равен значению  $N_3$  или значению  $N_2$ , то  $l$ -й вариант системы не принадлежит множеству эффективных решений [19].

*Доказательство:* Из условия теоремы следует, что хотя бы для одного из вариантов  $k$  ( $k \in \{1, n\}, k \neq l$ ) выполняется одно из условий (3), (5). Таким образом, вариант  $l$  доминируется вариантом  $k$ . Значит, согласно определению множе-

ства Парето,  $l$ -й вариант не может принадлежать множеству эффективных решений. *Теорема доказана.*

**Теорема 2.** Множество неэффективных систем не зависит от значений коэффициентов важности критериев.

*Доказательство:* Из теоремы 1 следует, что если  $l$ -й вариант принадлежит множеству неэффективных решений, то  $C_{kl \max} = N_3$  или  $C_{kl \max} = N_2$ . В этом случае хотя бы один из элементов  $C_{kl}$  оценочной матрицы принимает одно из значений:

$N_3$ , когда вариант системы  $k$  имеет по сравнению с вариантом системы  $l$  только лучшие и равные значения критериев [условие (5)];

$N_2$ , когда вариант системы  $k$  имеет по сравнению с вариантом системы  $l$  только лучшие значения критериев [условие (3)].

Значения  $N_3, N_2$  введены автономно и не зависят от коэффициентов важности критериев. *Теорема доказана.*

### Метод равномерной оптимальности (линейная свертка)

Линейная свертка широко применяется на практике. Более того, когда выполняются условия теоремы С. Карлина, можно получить эффективные решения. Заметим, что для рассматриваемого метода не выполняется аксиома независимости. Основным недостатком является возможность компенсировать худшие значения некоторых критериев другими, лучшими критериями [7].

В соответствии с методом равномерной оптимальности вместо  $r$  частных критериев  $K_j(S_\alpha)$ ,  $j = \overline{1, r}$ ,  $S_\alpha \in S_D$  предлагается рассматривать один критерий вида

$$F(S_\alpha) = \sum_{j=1}^r a_j K_j(S_\alpha), \quad S_\alpha \in S_D,$$

где  $a_j$  — коэффициенты важности критериев, при-

чем  $\sum_{j=1}^r a_j = 1$ .

В качестве оптимальной системы выбирают такую систему  $S_\alpha^* \in S_D$ , для которой выполняется условие  $F(S_\alpha^*) = \min_{S_\alpha \in S_D} F(S_\alpha)$ .

### Метод справедливого компромисса

Метод справедливого компромисса является одним из старейших [2, 7], нашел широкое применение при решении прикладных задач. Однако он, как и многие другие методы, может быть обоснованно применен только к конкретному типу задач.

В соответствии с этим методом формируется обобщенный критерий (свертка) следующего вида:

$$L(S_\alpha) = \prod_{j=1}^r (K_j(S_\alpha))^{a_j}, \quad S_\alpha \in S_D.$$

В качестве оптимальной выбирают такую систему  $S_\alpha^* \in S_D$ , для которой выполняется условие  $L(S_\alpha^*) = \min_{S_\alpha \in S_D} L(S_\alpha)$ .

Рассмотрим особенности применения методов равномерной оптимальности, справедливого компромисса при решении задач гипервекторного ранжирования.

### Методика решения задачи гипервекторного ранжирования с использованием метода равномерной оптимальности (справедливого компромисса)

1. Провести анализ исходной информации, формирование критериев оценок систем. Определить коэффициенты важности критериев или группы коэффициентов важности.

2. Вычислить оценки векторных компонент. Ранжировать системы с использованием метода равномерной оптимальности (справедливого компромисса) по множеству скалярных критериев каждой векторной компоненты.

3. Построить частные кортежи Парето по векторным компонентам.

4. Ранжировать системы с использованием метода равномерной оптимальности (справедливого компромисса) по множеству векторных компонент.

5. Определить значения оценок многовекторных компонент и построить частные кортежи Парето по многовекторным компонентам.

6. Ранжировать системы с использованием метода равномерной оптимальности (справедливого компромисса) по множеству многовекторных компонент. Построить кортеж Парето.

7. Провести анализ результатов решения.

8. В случае необходимости уточнить исходные данные, изменить коэффициенты важности критериев. Перейти к шагу 2. В противоположном случае перейти к шагу 9.

9. Конец решения.

### Критерий и методика построения истинных кортежей Парето

К сожалению, применение методов равномерной оптимальности и справедливого компромисса может привести к получению неэффективных решений. В соответствии с теоремой С. Карлина применение линейной свертки справедливо, когда множество векторных оценок строго выпукло, ограничено и замкнуто [7–9], т. е. для очень узкого класса задач. На этот факт еще раз обратил внимание исследователей, применяющих для решения многокритериальных задач такую свертку, В. Д. Ногин [13]. В целях устранения этих проблем предлагается применять специальный

критерий и методику. Для их формулировки введем необходимые определения.

**Определение 4.** Опорный кортеж Парето  $P$  — упорядоченное множество только эффективных вариантов, построенное в ходе решения задач многокритериального, многовекторного или гипервекторного ранжирования с использованием метода «жесткого» ранжирования.

**Определение 5.** Псевдокортеж Парето  $P_{pq}$  — упорядоченное множество эффективных и неэффективных вариантов, построенное в ходе решения задач многокритериального, многовекторного или гипервекторного ранжирования с использованием метода, отличного от метода «жесткого» ранжирования,  $q = \overline{1, Q}$ .

В частном случае в псевдокортеж Парето входят только эффективные варианты.

**Определение 6.** Истинный кортеж Парето  $P_{иq}$  — упорядоченное множество эффективных вариантов, построенное на основе псевдокортежа Парето, у которого исключены неэффективные варианты,  $q = \overline{1, Q}$ .

Допустим, что с использованием метода «жесткого» ранжирования, а также других интересующих нас методов из заданного множества построены соответственно опорный кортеж Парето  $P$  и  $q$  псевдокортежей  $P_{иq}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ . Справедлив следующий критерий построения истинных кортежей Парето  $P_{иq}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ .

**Критерий.** Для построения истинных кортежей Парето необходимо и достаточно из соответствующих псевдокортежей Парето выбрать, не нарушая порядок следования, лишь варианты, номера которых указаны в опорном кортеже Парето. Иначе:

$$P_{иq} = (P_{иq} \cap P, q = \overline{1, Q}). \quad (9)$$

**Доказательство:** Необходимость. В соответствии с теоремой 1 в опорный кортеж Парето входят только эффективные варианты. Следовательно, выбор указанного кортежа является оправданным и необходимым условием решения задачи.

Достаточность. После выполнения операции (9) в истинные кортежи Парето войдут лишь эффективные варианты, которые включены в опорный кортеж Парето, и никакие другие. Отличие, в общем случае, будет заключаться лишь в порядке следования эффективных вариантов, который зависит от конкретного решающего правила.

Для корректного решения задачи предлагается следующая методика построения истинных кортежей Парето.

1. Решить задачу гипервекторного ранжирования с использованием метода «жесткого» ранжирования и иных методов, в частности, методов равномерной оптимальности и справедливого компромисса. В результате:

а) по методу «жесткого» ранжирования будет построен опорный кортеж Парето и определено подмножество неэффективных систем;

б) по иным методам будут построены псевдокортежи Парето.

2. С учетом информации об эффективных системах, которые имеются в кортеже  $P$ , исключить из псевдокортежа Парето  $P_{п1}$  неэффективные системы. В итоге получим истинные кортежи, в которых расположены только эффективные системы в порядке, определяемом методами равномерной оптимальности и справедливого компромисса.

### Численный пример

Допустим, необходимо построить упорядоченное множество эффективных моделей разработки программного обеспечения (кортеж Парето) для проекта, предполагающего автоматизировать процесс некоторой гипотетической системы управления коммуникациями в организации [24]. Значения критериев для десяти возможных моделей разработки программного обеспечения приведены в таблице.

■ Значения критериев, характерные для моделей разработки программного обеспечения

Критерий	Модели разработки ПО									
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$
<b>Характеристики требований к проекту (<math>K_1</math>)</b>										
$K_{11}$	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2
$K_{12}$	1	1	2	1	3	1	2	1	1	2
$K_{13}$	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2
$K_{14}$	1	1	2	1	2	2	1	1	1	2
<b>Характеристики команды разработчиков (<math>K_2</math>)</b>										
$K_{21}$	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2
$K_{22}$	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1
$K_{23}$	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2
$K_{24}$	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2
<b>Характеристики пользователей и заказчика (<math>K_3</math>)</b>										
$K_{31}$	1-2	1-2	1-2	2-3	3-4	3-4	2-3	1-2	2-3	2-4
$K_{32}$	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3
<b>Характеристики типов проектов и рисков (<math>K_4</math>)</b>										
$K_{41}$	2	2	1	2	1	2	1	1	2	2
$K_{42}$	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1
$K_{43}$	3	3	3	3	1	2	3	3	3	2
$K_{44}$	1-2	1-2	1-3	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	2-3
$K_{45}$	1-3	2-3	2-3	2-3	2-3	1-2	2-3	2-3	1-2	1-2
$K_{46}$	1-3	3-4	3-4	2-3	1-2	1-2	3-4	2-3	3-4	1-4
<b>Характеристики процесса разработки (<math>K_5</math>)</b>										
$K_{51}$	1	1	1	3	2	1	1	1	3	2
$K_{52}$	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1
$K_{53}$	2	2	2	3	3	3	2	2	3	1
$K_{54}$	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2

Задачу гипервекторного ранжирования будем решать с использованием трех методов: «жесткого» ранжирования, справедливого компромисса, равномерной оптимальности. В ходе решения придерживаемся общих принципов решения задачи гипервекторного ранжирования с учетом особенностей применяемых методов.

По результатам решения можно сделать следующие выводы.

1. При использовании метода «жесткого» ранжирования опорный кортеж Парето  $P = \langle S_7, S_5, S_3, S_{10}, S_2 \rangle$ . Модели  $S_1, S_4, S_6, S_8, S_9$  оказались неэффективными.

2. При применении метода равномерной оптимальности псевдокортеж Парето  $P_{п1} = \langle S_{10}, S_5, S_9, S_3, S_4, S_7, S_2, S_1, S_8, S_6 \rangle$ .

3. При применении метода справедливого компромисса псевдокортеж Парето  $P_{п2} = \langle S_7, S_5, S_2, S_1, S_9, S_{10}, S_4, S_3, S_6, S_8 \rangle$ .

Нетрудно видеть, что если для решения задачи применять методы равномерной оптимальности и справедливого компромисса, то в псевдокортеж Парето могут попасть и заведомо неэффективные системы. Более того, эффективные системы могут располагаться после неэффективных (например, неэффективные системы  $S_9, S_4$  — соответственно на третьем и пятом местах перед эффективными системами  $S_3, S_7$  в псевдокортеже  $P_{п1}$ ; неэффективные системы  $S_1, S_9$  — соответственно на четвертом и пятом местах перед эффективной системой  $S_{10}$  в псевдокортеже  $P_{п2}$ ).

4. Применяя предлагаемые критерий и методику, получим истинные кортежи Парето  $P_{п1} = \langle S_{10}, S_5, S_3, S_7, S_2 \rangle$ ,  $P_{п2} = \langle S_7, S_5, S_2, S_{10}, S_3 \rangle$ , в которые входят только эффективные системы.

Предлагаемый подход позволяет строить кортежи Парето при использовании любых решающих правил без опасения получить «неверные» решения. Здесь под «неверными» понимаем решения, в которых содержатся как эффективные, так и неэффективные варианты.

## Заключение

Рассмотрены общие принципы решения задач гипервекторного ранжирования. Раскрыты особенности решения задач при использовании:

- метода «жесткого» ранжирования;
- методов равномерной оптимальности и справедливого компромисса.

Решения, получаемые с использованием методов равномерной оптимальности и справедливого компромисса, как и многих других методов, могут быть и не оптимальными по Парето. Численный пример еще раз подтвердил справедливость указанных выводов.

На наш взгляд, для класса задач, которые могут быть решены с помощью методов равномерной оптимальности и справедливого компромисса, целесообразно применять метод «жесткого» ранжирования в целях сравнительной оценки, сопоставления результатов и отсеивания неэффективных решений. С помощью метода «жесткого» ранжирования можно обоснованно строить множество неэффективных и множество эффективных решений.

Сформулированный критерий построения эффективных вариантов и соответствующая методика позволяют получать корректные решения задач многокритериального, многовекторного и гипервекторного ранжирования.

## Литература

1. Анохин А. М. и др. Методы определения коэффициентов важности критериев // Автоматика и телемеханика. 1997. № 8. С. 3–35.
2. Батищев Д. И. Методы оптимального проектирования: учеб. пособие для вузов. — М.: Радио и связь, 1984. — 248 с.
3. Белкин А. Р., Левин М. Ш. Принятие решений: комбинаторные модели аппроксимации информации. — М.: Наука, 1990. — 160 с.
4. Гермейер Ю. Б. Введение в теорию исследования операций. — М.: Наука, 1971. — 383 с.
5. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств. — М.: Сов. радио, 1975. — 368 с.
6. Денисов А. А., Колесников Д. Н. Теория больших систем управления: учеб. пособие для вузов. — Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. — 288 с.
7. Дубов Ю. А., Травкин С. И., Якимец В. Н. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. — М.: Наука, 1986. — 296 с.
8. Захаров И. Г. Обоснование выбора. Теория практики. — СПб.: Судостроение, 2006. — 528 с.
9. Карлин С. Математические методы в теории игр, программировании и экономике. — М.: Сов. радио, 1964. — 838 с.
10. Ларичев О. И. Наука и искусство принятия решений. — М.: Наука, 1979. — 200 с.
11. Михалевич В. С., Волкович В. Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. — М.: Наука, 1982. — 286 с.
12. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. — 488 с.



13. **Ногин В. Д.** Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2004. Т. 44. № 7. С. 1259–1268.
14. **Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П.** Введение в системный анализ: учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 1989. — 367 с.
15. **Подиновский В. В., Гаврилов В. М.** Оптимизация по последовательно применяемым критериям. — М.: Сов. радио, 1975. — 192 с.
16. **Руа Б.** К вопросу принятия многокритериального решения // Перевод № А-10849. — М.: Всесоюзный центр переводов научно-технической литературы и документации, 1977. — 10 с.
17. **Руа Б.** Проблемы и методы решений в задачах с многими целевыми функциями // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. — М.: Мир, 1976. — С. 20–58.
18. **Саати Т. Л.** Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1993. — 320 с.
19. **Сафронов В. В.** Проблемы проектирования сложных технических систем и некоторые пути их решения // Докл. Академии военных наук. 1999. № 1. С. 84–95.
20. **Сафронов В. В.** Гипервекторное ранжирование сложных систем // Информационные технологии. 2003. № 5. С. 23–26.
21. **Сафронов В. В.** Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования: монография. — Саратов: Научная книга, 2009. — 329 с.
22. **Сафронов В. В.** и др. Решение задач совершенствования системы образования с использованием методов ранжирования // Информационные технологии. 2008. № 11. С. 52–57.
23. **Сафронов В. В., Жебраков А. С.** Использование математического аппарата гипервекторного ранжирования для выбора энергосиловых установок летательных аппаратов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева. 2009. № 3(19). Ч. 1. С. 74–82.
24. **Сафронов В. В., Федорец О. Н.** Метод построения эффективных моделей разработки программного обеспечения // Информационные технологии. 2010. № 1. С. 34–39.
25. **Сафронов В. В.** Применение метода идеальной точки в пространстве критериев для решения задачи гипервекторного ранжирования // Надежность и качество: Тр. Междунар. симп.; в 2 т. / Под ред. Н. К. Юркова. Пенза: Изд-во Пенз. ГУ, 2010. Т. 1. С. 12.
26. **Семенов С. С., Харчев В. Н., Иоффин А. И.** Оценка технического уровня образцов вооружения и военной техники. — М.: Радио и связь, 2004. — 552 с.
27. **Трахтенгерц Э. А.** Компьютерная поддержка принятия согласованных решений // Приложение к журналу «Информационные технологии». 2002. № 3. — 24 с.

УДК 681.518.+519.724

## ВЕРОЯТНОСТНЫЕ АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ДИСКРЕТНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ Часть 2: Сравнительные анализ и численные данные

**Э. П. Тихонов,**

ДОКТОР ТЕХН. НАУК, ДОЦЕНТ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Приведены результаты определения оптимального интервала дискретизации для вероятностных адаптивных алгоритмов при различных восстанавливающих функциях. Выполнен сравнительный анализ предложенных адаптивных алгоритмов и известного метода дискретизации по Котельникову. Основные соотношения между интервалами дискретизации, полученные для различных методов дискретизации на моделях реальных сигналов, доведены до количественных результатов.

**Ключевые слова** — оптимальный интервал, функция восстановления, адаптивный алгоритм, сравнительный анализ.

### Оценка оптимального интервала дискретизации

Прежде всего, отметим, что в подавляющем числе статей, связанных с временной дискретизацией, результаты анализа носят весьма общий характер и не доведены до численных оценок. В то время как численные оценки позволяют получить необходимые для инженерных расчетов количественные представления от применения того или иного метода дискретизации с учетом реальных условий и выбрать необходимый алгоритм дискретизации на основе комплекса требований, предъявляемых к проектируемой информационно-управляющей системе.

Для оценки оптимального интервала дискретизации при вероятностном методе адаптивной дискретизации в зависимости от степени  $m$  интерполирующего полинома выразим полином  $\Psi_m(t)$  при оценке погрешности восстановления сигнала в форме Ньютона [1, 2]

$$|\Psi_m(\alpha)| = (\tau_{0m})^{m+1} [(\alpha)(\alpha-1)(\alpha-2) \dots (\alpha-m)] = (\tau_{0m})^{m+1} \Psi_m^*(\alpha),$$

где  $\alpha = t/\tau_{0m}$ ;  $\tau_{0m}$  — интервал дискретизации при восстановлении сигнала в форме Ньютона полиномом степени  $m$ ;  $m = 0, 1, \dots$

С учетом этого представления получим для оценки погрешности восстановления полиномом  $m$ -й степени выражение

$$\delta(y(t), \varphi_m(t, \tau_{0m})) = |y(t) - P_m(t)| = \frac{|y^{(m+1)}(\eta)|}{(m+1)!} (\tau_{0m})^{m+1} |\Psi_m^*(\alpha)|.$$

Максимум данной погрешности при фиксированном интервале  $\tau_{0m}$  находим из условия

$$\delta_{\max}(y(t), \varphi_m(t, \tau_{0m})) = \max_{\alpha} \left\{ \frac{|y^{(m+1)}(\eta)|}{(m+1)!} \tau_{0m}^{m+1} |\Psi_m^*(\alpha)| \right\}$$

или

$$\delta_{\max}(y(t), \varphi_m(t, \tau_{0m})) = \frac{\max |y^{(m+1)}(\eta)|}{(m+1)!} \max_{\alpha} |\Psi_m^*(\alpha)| \tau_{0m}^{m+1}.$$

Оценим средний квадрат погрешности интерполяции, который является характеристикой погрешности восстановления исходного сигнала, в соответствии с равенством

$$M\{\delta_{\max}^2(y(t), \varphi_m(t, \tau_{0m}))\} = M \left\{ \max_{\alpha} \left[ \frac{|y^{(m+1)}(\eta)|}{(m+1)!} (\tau_{0m})^{m+1} |\Psi_m^*(\alpha)| \right]^2 \right\}$$

или



$$\tau_{02} \approx \sqrt[6]{\frac{243\varepsilon_0^2}{|r^{(6)}(0)|}}; \quad \tau_{03} \approx \sqrt[8]{\frac{576\varepsilon_0^2}{|r^{(8)}(0)|}}, \quad (2)$$

где  $|r^{[2(m+1)]}(0)|$  — абсолютное значение производной порядка  $2(m+1)$  для НАКФ сигнала в нуле.

Приближение в формулах (2) тем точнее, чем меньше относительная погрешность  $\varepsilon_0$ , оно не превышает единиц процентов в пределах допустимой динамики входного сигнала для величины погрешности  $\varepsilon_0$ , принимающей значение в пределах одного процента.

### Сравнительный анализ

Таким образом, установившийся оптимальный интервал дискретизации для степени полинома  $m$  зависит при соответствующих значениях параметра  $k_{0m}$  и  $\varepsilon_0$  от производных НАКФ сигнала в нуле. Поэтому представляет интерес коэффициент прироста интервала с ростом степени полинома в виде

$$K(m) = \frac{\tau_{0m+1}}{\tau_{0m}} = \frac{m+2\sqrt{(m+2)}}{(m+2)^{(m+1)}\sqrt{\varepsilon_0}} \frac{m+1\sqrt{k_{0m}}}{m+2\sqrt{k_{0m+1}}} \chi(m),$$

где

$$\chi(m) = \frac{2^{(m+1)}\sqrt{|r^{[2(m+1)]}(0)|}}{2^{(m+2)}\sqrt{|r^{[2(m+2)]}(0)|}},$$

а  $|k_{0m}| = \{1; 0,25; 0,385; 1; 3,63; 16,9\}$  для  $m = 0; 1; 2; 3; 4; 5$ .

Пусть входной сигнал является гармоническим и имеет НАКФ, соответствующую косинусной функции, тогда  $\chi(m) = \chi_r(m) = 1$  для всех  $m$ .

Рассмотрим также коэффициент прироста интервала относительно интервала, полученного для полинома нулевой степени и определяемого в соответствии с равенством

$$K_0(m) = \frac{\tau_{0m}}{\tau_{00}} = \frac{m+1\sqrt{(m+1)!}}{m+1\sqrt{\varepsilon_0^m}} \frac{\chi_0(m)}{m+1\sqrt{k_{0m}}},$$

где

$$\chi_0(m) = \frac{\sqrt{|r^{(2)}(0)|}}{2^{(m+1)}\sqrt{|r^{[2(m+1)]}(0)|}}, \quad m = 1, 2, \dots$$

Для гармонического сигнала получаем коэффициент прироста интервала с ростом  $m$  относительно интервала при восстановлении полиномом нулевой степени в виде

$$K_{0r}(m) = m+1\sqrt{\frac{(m+1)!}{\varepsilon_0^m k_{0m}}},$$

который можно вычислить априорно. Результаты вычисления коэффициента  $K_{0r}(m)$  и темпы его

приращения в зависимости от изменения степени полинома  $m$  и относительной погрешности восстановления  $\varepsilon_0$  приведены в табл. 1–3. Темп прироста интервала дискретизации в зависимости от роста степени интерполирующего полинома в табл. 3 определяется в соответствии с формулой

$$\lambda(m) = \frac{\chi_{0r}(m+1) - \chi_{0r}(m)}{\chi_{0r}(m+1)}.$$

Из табл. 1–3 следует, что темп прироста интервала дискретизации с ростом степени интерполирующего полинома для гармонического сигнала существенно замедляется, тогда как сложность восстановления сигнала при этом значительно возрастает.

В табл. 4 указаны значения коэффициента  $K_0(m)$  прироста интервала дискретизации с ростом степени интерполирующего полинома при восстановлении сигналов с различными НАКФ [3, 4] относительно интервала, полученного для полинома нулевой степени. Сигналы с указанными в таблице НАКФ формируются фильтрами низкой частоты (ФНЧ) до 4-го порядка включительно из белого шума.

■ Таблица 1

Переменная $m$	Функция $K_{0r}(m)$	Переменная $m$	Функция $K_{0r}(m)$
0	1	3	$\frac{2,213}{\sqrt[4]{\varepsilon_0^3}}$
1	$\frac{2,83}{\sqrt{\varepsilon_0}}$	4	$\frac{2,01}{\sqrt[5]{\varepsilon_0^4}}$
2	$\frac{2,498}{\sqrt[3]{\varepsilon_0^2}}$	5	$\frac{1,87}{\sqrt[6]{\varepsilon_0^5}}$

■ Таблица 2

Переменная $m$	Функция $K_{0r}(m)$ при $\varepsilon_0$		Переменная $m$	Функция $K_{0r}(m)$ при $\varepsilon_0$	
	0,01	0,05		0,01	0,05
0	1	1	3	69,98	20,93
1	28,3	12,66	4	80,02	22,01
2	53,81	18,41	5	86,78	22,7

■ Таблица 3

Интерполирующий полином $m$	Относительный прирост $\lambda(m)$ при $\varepsilon_0$		Интерполирующий полином $m$	Относительный прирост $\lambda(m)$ при $\varepsilon_0$	
	0,01	0,05		0,01	0,05
0	1	1	3	0,23	0,12
1	0,96	0,92	4	0,125	0,05
2	0,47	0,31	5	0,078	0,03

■ Таблица 4

Вид НАКФ $r(\tau)$	Значения $K_0(m) = \tau_{0m} / \tau_{00}$ для $\varepsilon_0 = 0,01$			Примечание
	$K_0(1)$	$K_0(2)$	$K_0(3)$	
1. $e^{-\alpha \tau }$	28	54	70	ФНЧ 1-го порядка
2. $[1 + \alpha \tau ]e^{-\alpha \tau }$	21	41	55	ФНЧ 2-го порядка
3. $\left[1 + \alpha \tau  + \frac{1}{3}(\alpha\tau)^2\right]e^{-\alpha \tau }$	16	24	55	ФНЧ 3-го порядка
4. $\left[1 + \alpha \tau  + \frac{2}{5}(\alpha\tau)^2 + \frac{1}{15}(\alpha\tau)^3\right]e^{-\alpha \tau }$	19	24	40	ФНЧ 4-го порядка
5. $e^{-\alpha\tau^2}$	21	34	39	ФНЧ $n$ -го порядка при $n \rightarrow \infty$ или гауссов низкочастотный фильтр
6. $\frac{\sin(\Delta\omega\tau/2)}{(\Delta\omega\tau/2)}$	24	43	53	Идеальный фильтр
7. $\cos(\omega\tau)$	28	54	70	Гармонический сигнал

Коэффициент  $K_0(m)$  можно представить в виде  $K_0(m) = K_{0r}(m)\chi_0(m)$ . Следовательно, если известно априорно отношение  $\chi_0(m)$ , то по результату измерения интервала  $\tau_{00}$  нетрудно вычислить интервал дискретизации для интерполирующего полинома любой степени в соответствии с равенством

$$\tau_{0m}(m) = \tau_{00}K_{0r}(m)\chi_0(m).$$

По результатам измерения интервалов дискретизации для любых  $m$  можно осуществить классификацию сигнала по значениям производных НАКФ в нуле. Увеличение коэффициента  $K_0(m)$  с ростом степени интерполирующего полинома особенно заметно для ФНЧ 1-го порядка, когда «высокочастотные хвосты» спектральной функции имеют наибольшую протяженность. Отметим, что с увеличением погрешности восстановления  $\varepsilon_0$  коэффициент  $K_0(m)$  по этой же причине с ростом степени интерполирующего полинома (см. табл. 2) изменяется существенно меньше.

Для оценки роста интервала дискретизации для широкополосного сигнала по сравнению с гармоническим сигналом сравним частоту гармонического сигнала и эффективную ширину спектра сигнала [3, 4], отличного от гармонического сигнала, при восстановлении сигналов полиномом нулевой степени и при условии выполнения равенства  $K_0(1) = 1$ . Напомним, что эффективная ширина спектра определяется в соответствии с формулой [4]

$$\Delta\omega_\varepsilon = G^{-1}(\omega_0) \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) d\omega,$$

где  $G^{-1}(\omega_0)$  — максимум спектра в точке  $\omega_0$ ;  $\int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) d\omega$  — выражение дисперсии через спектр сигнала.

Для симметричного спектра максимум достигается в точке  $\omega_0 = 0$  при соответствующей симметричной АКФ  $R(\tau)$ . Из обратного преобразования Фурье от АКФ имеем

$$R(\tau)|_{\tau=0} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \Big|_{\tau=0} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) d\omega.$$

Следовательно, для эффективной ширины спектра получаем при  $\omega_0 = 0$

$$\Delta\omega_\varepsilon = G^{-1}(0) 2\pi R(0).$$

Учитывая, что для нормированного спектра выполняется равенство

$$g(0) = \int_{-\infty}^{\infty} r(\tau) d\tau,$$

в результате получаем  $\Delta\omega_\varepsilon = 2\pi/g(0)$ .

Например, для НАКФ, соответствующей п. 2 табл. 4, с учетом того, что искомый спектр представляется в виде

$$g(\omega) = \frac{4\alpha^3}{(\alpha^2 + \omega^2)^2},$$

получаем

$$\Delta\omega_\varepsilon = 2\pi \Delta f_\varepsilon = \frac{\pi\alpha}{2}$$

и

$$\sqrt{r''(0)} = \frac{2\Delta\omega_\varepsilon}{\pi},$$

так как  $\sqrt{r''(0)} = \alpha$  и  $\alpha = 2\Delta\omega_\varepsilon / \pi$ .

Используя (2), для кусочно-ступенчатого восстановления сигнала с выбранной НАКФ получаем формулу для связи оптимального интервала

дискретизации с эффективной шириной спектра в виде

$$\tau_{00} = \frac{\varepsilon_0}{4\Delta f_s}$$

Полученная формула позволяет выразить оптимальный интервал дискретизации рассматриваемого адаптивного алгоритма с кусочно-ступенчатым восстановлением через интервал дискретизации  $\tau_K$ , выбираемый по теореме Котельникова в виде  $\tau_K = 1/2\Delta f_s$  (см., например, [5]). Связь производных НАКФ в нуле с эффективной шириной спектра дает также возможность сравнить оптимальные интервалы дискретизации для сигналов, имеющих различные по виду НАКФ, с аналогичным интервалом дискретизации гармонического сигнала. Результаты сравнения сигналов с видами НАКФ, приведенными в пп. 2–6 табл. 4, представлены в табл. 5.

Из анализа табл. 5 следует, что при одной и той же погрешности и функции восстановления равенство интервалов дискретизации и, следовательно, частоты дискретизации для сравниваемых сигналов достигается при существенно меньшей частоте следования гармонического сигнала по сравнению с частотой, определяющей эффективную ширину спектра сигнала. Это означает, что если интервал дискретизации выбирается по эффективной ширине спектра в соответствии с теоремой Котельникова для рассмотренных широкополосных сигналов, то этот интервал дискретизации не будет удовлетворять требованиям теоремы Котельникова для гармонического сигнала с частотой следования, равной граничной частоте, определяющей ширину спектра.

Для практического применения теоремы Котельникова рекомендуется выбирать частоту дискретизации, по крайней мере, в 4 раза превышающую частоту среза спектральной функции. Следовательно, для гармонического сигнала частота дискретизации выбирается, как минимум, в 4 раза больше частоты его следования. В этом случае при дискретизации сигналов, отличных от гармонических, но с той же граничной частотой среза спектральной функции, определяющей ее эффективную ширину, увеличение избыточности превышает 10-кратную величину.

Результаты сравнения оптимальных интервалов дискретизации рассматриваемого адаптивного алгоритма с кусочно-ступенчатым и линейным восстановлением и интервалом дискретизации  $\tau_K$ , выбираемым по теореме Котельникова для различных видов НАКФ, приведены в табл. 6. Из таблицы следует, что с идеальным фильтром при относительной погрешности кусочно-линейного восстановления сигнала на его выходе, равной 0,05, оптимальный интервал дискретизации для

Таблица 5

Соответствие позициям табл. 4	Соотношения между интервалом $\tau_{0r}$ и частотой $\omega_r$ гармонического сигнала и аналогичными параметрами различных однопараметрических НАКФ			Примечание
	$\sqrt{-r''(0)}$	$\tau_{0r} / \tau_{0r}$	$\omega_r / \Delta\omega_s$ при $\tau_{0r} / \tau_{0r} = 1$	
2	$\frac{2\Delta\omega_s}{\pi}$	$\frac{2\Delta\omega_s}{\pi\omega_r}$	0,637	ФНЧ 2-го порядка
3	$\frac{8\Delta\omega_s}{3\sqrt{3}\pi}$	$\frac{8\Delta\omega_s}{3\sqrt{3}\pi\omega_r}$	0,490	ФНЧ 3-го порядка
4	$\frac{16\Delta\omega_s}{25\pi}$	$\frac{16\Delta\omega_s}{5\sqrt{5}\pi\omega_r}$	0,455	ФНЧ 4-го порядка
5	$\frac{\Delta\omega_s}{\sqrt{2}\pi}$	$\frac{\Delta\omega_s}{\sqrt{2}\pi\omega_r}$	0,399	ФНЧ $n$ -го порядка при $n \rightarrow \infty$
6	$\frac{\Delta\omega_s}{2\sqrt{3}}$	$\frac{\Delta\omega_s}{2\sqrt{3}\omega_r}$	0,289	Идеальный фильтр

Таблица 6

Соответствие позициям табл. 4	Отношение $\tau_{00}$ и $\tau_{01}$ к интервалу дискретизации по Котельникову: $\tau_K = 1/(2f_{в.гр})$		$\tau_{01} / \tau_{00}$	Примечание
	для $\tau_{00}$	для $\tau_{01}$		
2	$0,5 \varepsilon_0$	$1,41\sqrt{\varepsilon_0}$	$2,82/\sqrt{\varepsilon_0}$	ФНЧ 2-го порядка
3	$0,65 \varepsilon_0$	$1,1\sqrt{\varepsilon_0}$	$1,69/\sqrt{\varepsilon_0}$	ФНЧ 3-го порядка
4	$0,7 \varepsilon_0$	$1,32\sqrt{\varepsilon_0}$	$1,9/\sqrt{\varepsilon_0}$	ФНЧ 4-го порядка
5	$0,8 \varepsilon_0$	$1,71\sqrt{\varepsilon_0}$	$2,14/\sqrt{\varepsilon_0}$	ФНЧ $n$ -го порядка при $n \rightarrow \infty$
6	$1,1 \varepsilon_0$	$2,7\sqrt{\varepsilon_0}$	$2,45/\sqrt{\varepsilon_0}$	Идеальный фильтр
7	$0,32 \varepsilon_0$	$0,9\sqrt{\varepsilon_0}$	$2,81/\sqrt{\varepsilon_0}$	Гармонический сигнал

рассматриваемого адаптивного алгоритма уступает потенциально достижимому интервалу, выбираемому в соответствии с теоремой Котельникова. Это является естественной платой за полную определенность и простоту используемой функции восстановления, за контроль погрешности восстановления и адаптивное установление интервала дискретизации с последующим слежением за его изменением в зависимости от измене-

ния динамики сигнала в условиях априорной неопределенности.

### Заключение

Анализ результатов сравнения различных методов временной дискретизации показывает, что оптимальные интервалы дискретизации, полученные в соответствии с адаптивным алгоритмом, оказываются меньше интервалов дискретизации, выбираемых в соответствии с теоремой Котельникова, и соотношение между указанными интервалами зависит от относительной погрешности восстановления и степени интерполирующего полинома. Однако следует иметь в виду, что теорема Котельникова позволяет определять

потенциально достижимый интервал дискретизации при бесконечном числе членов восстанавливающего ряда интерполирующих функций Котельникова и при идеальном финитном спектре сигнала. В то время как адаптивный алгоритм временной дискретизации гарантирует установление инвариантно к виду спектра сигнала, оптимального в установленном смысле интервала дискретизации. Причем оптимальный интервал дискретизации устанавливается адаптивно в процессе функционирования информационно-управляющей системы при заданном виде интерполирующего полинома и погрешности восстановления сигнала в естественных для технических приложений априорных ограничениях на его динамику.

### Литература

1. Тихонов Э. П. Вероятностные адаптивные алгоритмы дискретного представления аналоговых сигналов. Ч. 1: Исследование свойств // Информационно-управляющие системы. 2011. № 2. С. 8–15.
2. Гельфонд А. О. Исчисление конечных разностей: учеб. пособие. Изд. 3-е, перераб. — М.: Наука. Гл. ред. Физматлит, 1967. — 375 с.
3. Мирский Г. Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. — М.: Энергоиздат, 1982. — 320 с.
4. Тихонов В. И., Хименко В. И. Статистическая радиотехника. — М.: Наука, 1987. — 304 с.
5. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / Под ред. И. Ф. Кравченко. — М.: Физматлит, 2007. — 554 с.

УДК 004.932.4

## УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА СЖАТЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ МАСШТАБИРОВАНИЕМ

**Н. В. Соловьев,**

канд. техн. наук, доцент

**Г. В. Шифрис,**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматривается метод улучшения качества изображений, сжимаемых по алгоритму JPEG, предварительным масштабированием. Обосновывается выбор количественной оценки качества изображения. Анализируются методы масштабирования с точки зрения скорости обработки и качества восстановленного изображения.

**Ключевые слова** – сжатие изображений, алгоритм JPEG, масштабирование изображений.

### Введение

Результаты исследований перспектив развития телекоммуникаций [1] показывают, что к 2013 г. суммарный поток видеоданных составит примерно 90 % пользовательского телекоммуникационного трафика, включая видеоконференции, мобильную телефонию и видеонаблюдение. В связи с данной тенденцией все более актуальной становится проблема эффективного сжатия видеоинформации для передачи по телекоммуникационным сетям с сохранением высокого качества изображения на стороне пользователя. Максимально возможное повышение степени сжатия передаваемых видеоданных без существенного ухудшения качества может обеспечить значительное увеличение доходов магистральных операторов и интернет-провайдеров за счет увеличения объема передаваемой информации, приходящейся на единицу сетевого трафика.

### Описание алгоритма сжатия

Все известные в настоящее время методы сжатия видеопотока можно разделить на две большие группы: методы, основанные на анализе соседних кадров в целях компенсации движения, например стандарты H.264 или MPEG-4 [2], и методы, выполняющие сжатие каждого кадра в отдельности, например стандарты MPEG-2 или JPEG [3]. Если методы сжатия второй группы являются симметричными, т. е. у них время компрессии практически совпадает со временем де-

компрессии, то методы первой группы несимметричны, так как у них время компрессии существенно превышает время декомпрессии, причем с увеличением степени сжатия растет и несимметричность метода.

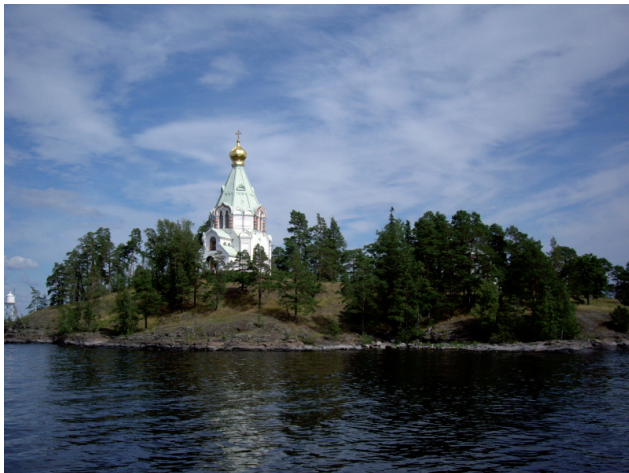
Учитывая вышесказанное, можно считать, что для передачи изображения в режиме on-line наиболее подходят методы второй группы, многие из которых основаны на поблочном дискретном косинусном преобразовании (ДКП) изображения. Однако при высокой степени сжатия такими методами на декомпрессированном изображении становятся заметны границы блоков, на которые разбивается изображение при сжатии, что значительно снижает визуальное качество.

Один из возможных способов избежать подобных искажений при сохранении степени сжатия заключается в предварительном масштабировании изображения каким-либо алгоритмом сжатия «вниз» перед компрессией, т. е. в уменьшении размера изображения. Отмасштабированное «вниз» изображение сжимают, а после передачи по каналу и декомпрессии восстанавливают до исходного размера, т. е. масштабируют «вверх» с помощью алгоритмов интерполяции изображения.

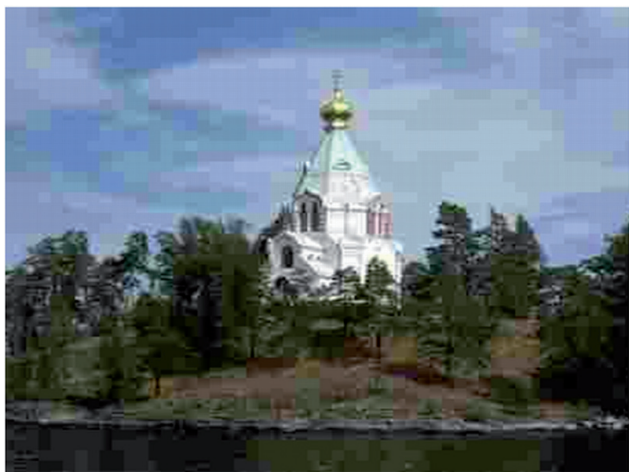
Цветное исходное изображение (рис. 1, а) размером 800 × 600 пикселей в bmp-формате имеет объем файла 350 КБ. После компрессии изображения алгоритмом JPEG с коэффициентом качества 10 объем сжатого файла составил 35 КБ. Следует отметить, что коэффициент качества у используемого при проведении экспериментов алгоритма JPEG меняется в пределах 1–100 и пред-



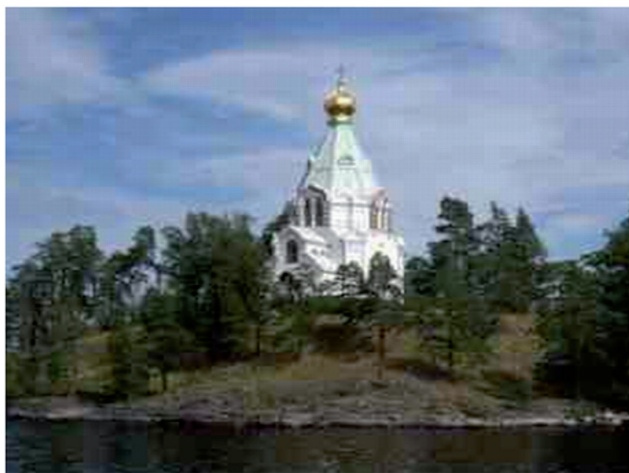
а)



б)



в)



■ **Рис. 1.** Сравнение результатов компрессии / декомпрессии различными методами: а — исходное изображение; б — результат обработки алгоритмом JPEG без масштабирования; в — результат обработки алгоритмом JPEG с масштабированием

ставляет собой некий условный коэффициент сохранения качества при сжатии, т. е. чем выше коэффициент, тем лучше качество и соответственно меньше степень сжатия. Результат декомпрессии с хорошо заметной блочной структурой показан на рис. 1, б. Изображение на рис. 1, в было предварительно масштабировано «вниз» с коэффициентом 1,5, т. е. размер изображения был уменьшен в полтора раза, затем выполнена компрессия алгоритмом JPEG с коэффициентом качества 25, что обеспечило размер сжатого файла 35 КБ для объективности сравнения результатов. После декомпрессии изображение было восстановлено до первоначального размера с использованием интерполирующего алгоритма Lanczos. Блочная структура менее заметна на рис. 1, в, что позволяет говорить о возможности применения предложенной последовательности операций для повышения качества результирующего изображения после декомпрессии.

Показанный на рис. 1, в результат можно объяснить следующим образом. Потеря информации на изображении при JPEG-компрессии происходит 2 раза [3]. Первый раз — на этапе «прореживания», когда после преобразования из цветового пространства RGB в YCbCr изображение делится на блоки из 4 пикселей (2 × 2 пикселя) и вместо 12 значений (4 Y, 4 Cb, 4 Cr) используется 6 (4 Y и по одному усредненному Cb и Cr). Второй раз качество теряется на этапе ДКП. Изображение делится на блоки 8 × 8 пикселей, подвергается ДКП и квантованию. Матрица, используемая для квантования, строится таким образом, что более сильному квантованию подвергается высокочастотная составляющая, что приводит к исчезновению на декомпрессированном изображении малоразмерных и слаборазличимых фрагментов. В блоках, соответствующих таким фрагментам, при большой компрессии после квантования нулевыми становятся все значения, кроме начального, которое соответствует средней яркости изображения. В результате на декомпрессированном изображении проявляется блочная структура, причем она наиболее заметна в областях с практически постоянной яркостью, например на изображениях неба, воды и т. п. (см. рис. 1, б).

Масштабирование исходного изображения «вниз» дает возможность повысить качество изображения, уменьшив коэффициент компрессии JPEG. В результате в блоках после квантования появляется больше ненулевых значений, что делает менее заметной блочную структуру декомпрессированного изображения. Масштабирование исходного изображения «вверх» выполняется интерполяционным методом, что приводит к некоторому размыванию перепадов яркости, но позволяет избежать появления клетчатой структуры.

Для того чтобы рекомендовать данный метод к применению в системах передачи видеопотока в режиме on-line, необходимо:

- выбрать наиболее подходящую методику для количественной оценки качества результирующего изображения по сравнению с исходным;
- подобрать алгоритм интерполяции, наилучший по отношению качество/время обработки;
- найти оптимальное с точки зрения качества результирующего изображения соотношение коэффициентов масштабирования и компрессии;
- оценить симметричность метода;
- проанализировать результаты обработки изображений различного типа (цветных, монохромных, контрастных, размытых, с мелкими деталями и т. д.).

Для обеспечения возможности объективного сравнения результатов при проведении экспериментов коэффициенты масштабирования «вниз» и компрессии следует подбирать так, чтобы размер полученного изображения был равен размеру изображения после компрессии без предварительного масштабирования.

В данной статье рассмотрены вопросы выбора методики оценки качества изображения, восстановленного после сжатия, и алгоритма интерполяции, применяемого при восстановлении изображения.

### Обоснование выбора методики сравнения изображений

Для анализа тестовых изображений, полученных в результате экспериментов, необходимо выбрать методику оценки качества восстановленного изображения по сравнению с исходным. Существуют два подхода к оценке качества изображения. Первый — количественная оценка, опирающаяся на вычисление некоторых характеристик изображения, второй — субъективная оценка, основывающаяся на статистической обработке экспертных оценок. Каждый подход можно разделить на две группы — абсолютные и сравнительные меры. Абсолютные меры используют для оценки одного изображения (изображению присваивается коэффициент качества по рейтинговой шкале), сравнительные меры используются для ранжирования набора изображений по качественной шкале от «лучше всего» до «хуже всего» или взаимного сравнения двух изображений [4].

Получение субъективной оценки — долгий и сложный процесс, требующий наличия опыта у экспертной группы, благоприятных условий труда (качественных мониторов, освещения), а также специальных методов статистической обработки для компенсации человеческого фактора. При выборе количественной оценки следует от-

дать предпочтение той, которая учитывает особенности восприятия изображений человеческим глазом [5] (цветовое разрешение человеческого зрения ниже яркостного, человек маловосприимчив к мелким цветным деталям и т. п.).

С учетом сложности получения субъективной оценки и наличия эталонных изображений для сравнения результатов сжатия изображений была выбрана группа количественных сравнительных оценок качества. Рассмотрим кратко наиболее распространенные.

Среднеквадратическое отклонение значений пикселей (*root mean square — RMS*) [6]

$$RMS(X, Y) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1, j=1}^{m, n} (x_{i, j} - y_{i, j})^2}{mn}}, \quad (1)$$

где  $x(i, j)$ ,  $y(i, j)$  — яркости соответствующих пикселей сравниваемых кадров  $X$  и  $Y$  одинакового размера;  $m$  — ширина кадра;  $n$  — высота кадра. Это наиболее часто используемая на практике легко вычисляемая мера. Недостаток меры *RMS* состоит в том, что по ней изображение будет считаться сильно испорченным при понижении яркости всех пикселей всего на 5 % (человеческий взгляд не всегда улавливает), а изображения с резким изменением цвета отдельных точек («со снегом», слабыми полосами или муаром) будут признаны почти не изменившимися.

Максимальное отклонение [3]

$$d(x, y) = \max_{i, j} |x_{i, j} - y_{i, j}|. \quad (2)$$

Эта мера очень чувствительна к отклонению отдельных пикселей, т. е. практически незаметное для человеческого взгляда резкое изменение яркости только одного пикселя приводит к существенному снижению оценки качества всего изображения.

Отношение полезного сигнала к шуму (*peak-to-peak signal-to-noise ratio — PSNR*) [3]

$$PSNR(X, Y) = 10 * \log_{10} \frac{mn \text{MaxErr}^2}{\sum_{i=0, j=0}^{m, n} (x_{i, j} - y_{i, j})^2}, \quad (3)$$

где *MaxErr* — максимум модуля разности цветовой компоненты. Это наиболее часто используемая на практике сравнительная мера, ее можно вычислять по всем компонентам цветовых пространств *YUV* и *RGB* и по компоненте *L* пространства *LUV* [7]. *PSNR* легко вычислять, но она имеет очень приближенное отношение к расхождениям, которые обнаруживаются человеческим глазом. Высокое значение *PSNR* означает определенную схожесть восстановленного и исходного изображений, но оно не дает гарантию того, что зритель будет удовлетворен восстановленным кадром.

Сравнительная мера  $MSAD$  — усредненная абсолютная разность значений цветовых компонент в соответствующих пикселях сравниваемых изображений [8]:

$$MSAD(X, Y) = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{m, n} |x_{i, j} - y_{i, j}|}{mn}, \quad (4)$$

где  $x(i, j), y(i, j)$  — значения цветовых компонент соответствующих пикселей сравниваемых кадров  $X$  и  $Y$ . Этой мере присущи те же недостатки, что и среднеквадратическому отклонению.

$Delta$  — усредненная разность значений цветовых компонент в соответствующих пикселях сравниваемых изображений [8], вычисляется для каждой компоненты по формуле

$$Delta(X, Y) = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{m, n} (x_{i, j} - y_{i, j})}{mn}, \quad (5)$$

где  $x(i, j), y(i, j)$  — значения цветовых компонент соответствующих пикселей сравниваемых кадров  $X$  и  $Y$ . Недостатки меры  $Delta$  совпадают с недостатками меры  $MSAD$ .

Сравнивая формулы (1)–(5) для определения качества изображения по различным мерам, можно сделать вывод, что все они однокомпонентные, т. е. опираются на вычисление какой-то одной характеристики — разности значений яркости (2), (4), (5) или среднеквадратического отклонения яркости (1), (3). Применение перечисленных мер не всегда дает положительный результат. В литературе [8] можно найти примеры изображений, существенно отличающихся по качеству при визуальной оценке, но имеющих практически одинаковую количественную оценку качества по однокомпонентной мере.

Мера структурного подобия (*measure of structural similarity* —  $SSIM$ ), предложенная американским ученым из Нью-Йоркского университета Зоу Вангом для сравнения полутоновых изображений, основывается на вычислении трех компонент сходства (яркости, контраста и структуры) и объединении их значений в итоговый результат [9, 10]:

$$SSIM = \left( \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \right) \left( \frac{2\bar{X}\bar{Y}}{(\bar{X})^2 + (\bar{Y})^2} \right) \left( \frac{2\sigma_X \sigma_Y}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2} \right), \quad (6)$$

где  $\bar{X} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1, j=1}^{m, n} x_{ij}$ ,  $\bar{Y} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1, j=1}^{m, n} y_{ij}$  — средняя яркость пикселей сравниваемых кадров  $X$  и  $Y$ ;  $\sigma_X^2 = \frac{1}{(m-1)(n-1)} \sum_{i=1, j=1}^{m, n} (x_{ij} - \bar{X})^2$ ,  $\sigma_Y^2 = \frac{1}{(m-1)(n-1)} \sum_{i=1, j=1}^{m, n} (y_{ij} - \bar{Y})^2$  — дисперсия яр-

■ Таблица 1

Метрика	Коэффициент качества изображения			
	контрастного	черно-белого	размытого	текста
$RMS$	26	20	13	42
$PSNR$	13	15	11	45
$SSIM$	13	16	11	46

кости пикселей,  $\sigma_{XY}^2 = \frac{1}{(m-1)(n-1)} \sum_{i=1, j=1}^{m, n} (x_{ij} - \bar{X})(y_{ij} - \bar{Y})$  — ковариация кадров.

Первая составляющая выражения является коэффициентом корреляции между изображениями  $X$  и  $Y$ . Вторая и третья составляющие соответственно характеризуют сходство средних значений яркостей и сходство контрастов двух сравниваемых изображений. Чем выше значение  $SSIM$ , тем больше совпадают сравниваемые изображения. В последнее время данная мера широко используется при сравнительной оценке качества изображений в силу того, что она наилучшим образом учитывает особенности восприятия человеческим глазом.

При проведении экспериментов сравнение качества изображений, восстановленных после сжатия, выполнялось по метрикам  $RMS$ ,  $PSNR$  и  $SSIM$ . Результаты сравнения по метрикам  $PSNR$  и  $SSIM$  практически совпали. По ним ошибка у контрастного изображения, полученного с использованием предварительного масштабирования, становится меньше, начиная с коэффициента качества алгоритма JPEG, равного 13. По метрике  $RMS$  это значение составляет 26.

Результаты аналогичных измерений по другим тестовым изображениям представлены в табл. 1.

В дальнейшем для оценки качества восстановленного изображения использовалась мера  $SSIM$ , как наиболее адекватно отображающая разницу между изображениями за счет анализа сходства изображений по яркости, контрасту и структуре.

### Оценка отношения качество / время обработки алгоритмами интерполяции

Важной составляющей эффективного применения предварительного масштабирования является выбор алгоритма интерполяции после декомпрессии. Интерполяцией, или интерполированием, в вычислительной математике называется способ нахождения промежуточных значений величины по имеющемуся дискретному набору известных значений [11]. Алгоритм интерполяции должен обеспечивать максимальное качество картинки при минимальных временных затратах, а время работы алгоритма должно удовлетворять требованию симметричности. Наибо-

лее распространенные алгоритмы увеличения масштаба растрового изображения кратко рассмотрены далее.

*Nearest neighbor* (копирование ближайшего соседа) — самый простой с точки зрения реализации метод [12]. В нем для получения неизвестных значений пикселей не делается никаких сложных математических вычислений — неизвестная яркость пикселя принимается равной яркости ближайшего к нему пикселя. Этот метод рекомендуется использовать для изображений, в которых нет плавных цветовых переходов, но есть четкие границы.

*Bilinear* — билинейная интерполяция. В вычислительной математике билинейной интерполяцией называют расширение линейной интерполяции для функций в двух переменных. Для вычисления неизвестного значения яркости искомого пикселя используются 4 соседних с ним пикселя [12]. Сначала в соответствии с координатами искомого пикселя линейно интерполируются значения вспомогательных точек вдоль оси абсцисс, потом проводится линейная интерполяция между этими точками по оси ординат.

*Bicubic* — бикубическая интерполяция. В вычислительной математике бикубической интерполяцией называется расширение кубической интерполяции на случай функции двух переменных, значения которой заданы на двумерной регулярной сетке [13]. Поверхность, полученная в результате бикубической интерполяции, является гладкой функцией, в отличие от поверхностей, полученных в результате билинейной интерполяции или интерполяции методом ближайшего соседа. Бикубическая интерполяция дает более качественное изображение по сравнению с билинейной интерполяцией, но требует больше времени.

*Hermite* — один из наиболее распространенных алгоритмов, применяемых для интерполяции графических изображений, основанный на интерполяционном полиноме Эрмита, получившего свое название в честь великого французского математика Шарля Эрмита (Charles Hermite) [14]. Для нахождения значения функции  $P$  в точке  $x$  необходимо найти полином  $P_{2N+1}$  степени  $2N + 1$ , значения которого и его производной в узлах  $x_i, i = 0, \dots, N$  удовлетворяют заданным соотношениям. Эту задачу как раз и решает интерполяционный полином Эрмита.

*Lanczos* — еще один фильтр, который занимает одно из лидирующих мест в цифровом увеличении изображения. Этот многомерный метод назван в честь Корнелиуса Ланцоша (Cornelius Lanczos), впервые показавшего, как можно применить полиномы Чебышева и ряды Фурье для решения прикладных задач. Фильтр Ланцоша

построен на основе оконного sinc-фильтра [13]. Импульсная характеристика  $h(t)$  оконного sinc-фильтра образуется путем умножения импульсной характеристики идеального фильтра низких частот на оконную функцию. В результате получается фильтр с хорошими спектральными свойствами. Применение данного фильтра к изображению позволяет сохранить относительно высокую четкость (даже при значительном увеличении), но может быть сильно замечен эффект Гиббса.

*B-spline* — представитель группы так называемых «кусочно-кубических» алгоритмов — кубический сплайн 4-го порядка. Термин B-spline был введен И. Шёнбергом (Isaac Jacob Schoenberg) и является сокращением от словосочетания «базисный сплайн». В вычислительной математике B-spline называют сплайн-функцию, имеющую наименьший носитель для заданной степени, порядка гладкости и разбиения области определения. В системах автоматизированного проектирования и компьютерной графике термин B-spline часто описывает сплайн-кривую, которая задана сплайн-функциями, выраженными линейными комбинациями B-spline [15].

Существует несколько модификаций этого алгоритма. Первая модификация принадлежит американскому ученому Эдвину Катмулу (Edwin Catmull), известному по своим работам в области киноиндустрии, и Рафаэлю Рому (Raphael Rom) из Израильского технологического университета. Алгоритм назван в их честь и известен во всем мире как *Catmull-Rom*. Вторая принадлежит Дону Митчеллу (Don Mitchell) и Аруну Нетравали (Arun N. Netravali) и ее название *Mitchell-Netravali* (или *Mitchell*) носит их имена, причем это даже не модификация, а сочетание B-spline и Catmull-Rom [15–17].

Алгоритм масштабирования *Bell*, или как его еще называют *Gaussian*, с колоколообразной характеристикой помогает за счет применения преобразований Фурье удалить высокочастотные шумы и «aliasing» (лестничный эффект), которые могут появиться при масштабировании [18]. Изображения при использовании этого алгоритма получаются немного размытыми, даже с небольшим коэффициентом масштабирования, поэтому алгоритм имеет еще название *Gaussian blurring* [16]. Можно сказать, что размытие — это та дань, которую приходится платить за удаление шумов.

Компания BenVista, известная своей программой для масштабирования изображения с одноименным названием, выпустила и запатентовала свой алгоритм масштабирования *S-spline*. Как утверждают разработчики, этот алгоритм можно отнести к адаптивным алгоритмам, т. е. он учитывает характеристики изображения и неплохо работает на границах цветов [19].

*Cubic filter* основывается на кубическом сплайне. Кубический сплайн задается значениями функции в узлах и значениями производных на границе отрезка интерполяции (либо первых, либо вторых производных). Для любой функции и любого разбиения отрезка интерполяции существует естественный, удовлетворяющий заданным условиям, сплайн [20].

Масштабирование изображений всегда связано с потерей их качества. При этом возникают артефакты масштабирования — заметные искажения изображения. Наиболее часто встречаются следующие артефакты [21]:

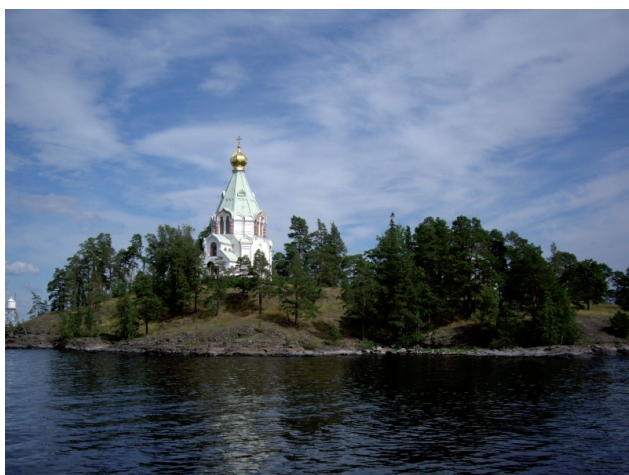
- ringing — возникновение волны около резкой границы на изображении;
- overshooting — возникновение двух или трех волн;
- aliasing — неравномерности изображения на резких, диагональных границах изображения;
- unsharpening — размывание, недостаточная четкость изображения после масштабирования

ния. Повышение четкости, как правило, приводит к увеличению остальных артефактов и наоборот — подавление артефактов подавляет также и четкость;

— sub-pixel shift — субпиксельный сдвиг изображения, связанный, как правило, с особенностями реализации алгоритма. Практически не влияет на визуальное качество, однако существенно влияет на количественную оценку.

Для получения полной картины о качестве интерполяции различными алгоритмами были выбраны разные по своей структуре тестовые изображения (рис. 2, а—г). Каждое тестовое изображение масштабировалось «вниз» с коэффициентами 1,5; 2; 2,5; ...; 7,5; 8, после чего масштабировалось до исходного размера тестируемым алгоритмом интерполяции. Далее вычислялась мера *SSIM* для эталонного и восстановленного изображений. Результаты вычисления *SSIM* для контрастного изображения с разным коэффициентом масштабирования при раз-

а)



б)



в)



г)

**Vladimir Nabokov. Lolita**

FOREWORD

"Lolita, or the Confession of a White Widowed Male," such were the two titles under which the writer of the present note received the strange pages it preambulates. "Humbert Humbert," their author, had died in legal captivity, of coronary thrombosis, on November 16, 1952, a few days before his trial was scheduled to start. His lawyer, my good friend and relation, Clarence Choate Clark, Esq., now of the District of Columbia bar, in asking me to edit the manuscript, based his request on a clause in his client's will which empowered my eminent cousin to use the discretion in all matters pertaining to the preparation of "Lolita" for print. Mr. Clark's decision may have been influenced by the fact that the editor of his choice had just been awarded the Poling Prize for a modest work ("Do the Senses make Sense?") wherein certain morbid states and perversions had been discussed.

My task proved simpler than either of us had anticipated. Save for the correction of obvious solecisms and a careful suppression of a few tenacious details that despite "H.H."s own efforts still subsisted in his text as signposts and tombstones (indicative of places or persons that taste would conceal and compassion spare), this remarkable memoir is presented intact. Its author's bizarre cognomen is his own invention; and, of course, this mask-through which two hypnotic eyes seem to glow had to remain unlifted in accordance with its wearer's wish. While "Haze" only rhymes with the heroine's real surname, her first name is too closely interwound with the inmost fiber of the book to allow one to alter it; nor (as the reader will perceive for himself) is there any practical necessity to do so. References to "H.H."s crime may be looked up by the inquisitive in the daily papers for September-October 1952; its cause and purpose would have continued to come under my reading lamp.

■ Рис. 2. Тестовые изображения для анализа алгоритмов интерполяции: а — контрастное; б — размытое; в — черно-белое; г — текст

личных алгоритмах интерполяции представлены на рис. 3.

Из графиков отчетливо видна зависимость значения *SSIM* при одинаковом коэффициенте масштабирования от алгоритма интерполяции. С уменьшением коэффициента масштабирования *SSIM* после восстановления изображения до исходных размеров практически совпадает у всех алгоритмов интерполяции. Из этого можно сделать вывод, что с увеличением коэффициента масштабирования исчезает разница в качестве между ними. Лидирующую позицию занимают алгоритмы Catmull-Rom и Bicubic.

Следующим шагом в оценке качества алгоритмов масштабирования изображений было определение зависимости качества от типа изображения. Как говорилось выше, в качестве тестовых изображений были выбраны разные типы изображений (см. рис. 2). В экспериментах использовался небольшой коэффициент масштабирования (все тестовые изображения масштабировались «вниз» с коэффициентом 1,5). Полученные изображения восстанавливались до исходного тестируемыми алгоритмами интерполяции с вычислением для них меры *SSIM*. Результат вычислений представлен на рис. 4.

Из гистограммы видно, что за редким исключением для всех типов изображений прослеживается зависимость качества изображения от алгоритма интерполяции. Как и в первом случае, лидирующую позицию занимают алгоритмы Catmull-Rom и Bicubic.

Результаты усреднения экспериментальных данных (табл. 2), полученных для каждого типа изображения, позволяют увидеть наглядную картину оценки качества.

Несмотря на то, что алгоритм Catmull-Rom практически везде показывал наилучшие результаты, в некоторых случаях для какого-то конкретного типа изображения метрика *SSIM* сильно выбивалась из группы. Это повлияло на результаты усреднения, и лидирующие позиции заняли алгоритмы Bicubic и Bilinear, показавшие наиболее стабильные результаты для всех групп изображений с различными коэффициентами масштабирования.

Для оценки времени работы алгоритмов масштабирования измерялось время работы их программной реализации. В качестве ядра была взята условно бесплатная библиотека *FINEGraphics.dll*, написанная на языке ассемблера и оптимизированная. Реализованные алгоритмы этой библиотеки вызывались из программы, написанной на языке Delphi. Исходное изображение размером  $800 \times 600$  пикселей было отмасштабировано «вниз» с семью различными коэффициентами *K*, которые приведены в табл. 3.

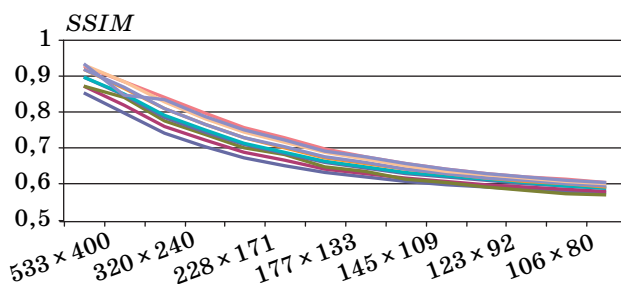


Рис. 3. Зависимость меры качества *SSIM* контрастного изображения от размера сжатого изображения для разных алгоритмов интерполяции: — B-spline; — Mitchell; — Nearest neighbor; — Bell; — Hermite; — Lanczos; — Bilinear; — S-spline; — Bicubic; — Catmull-Rom

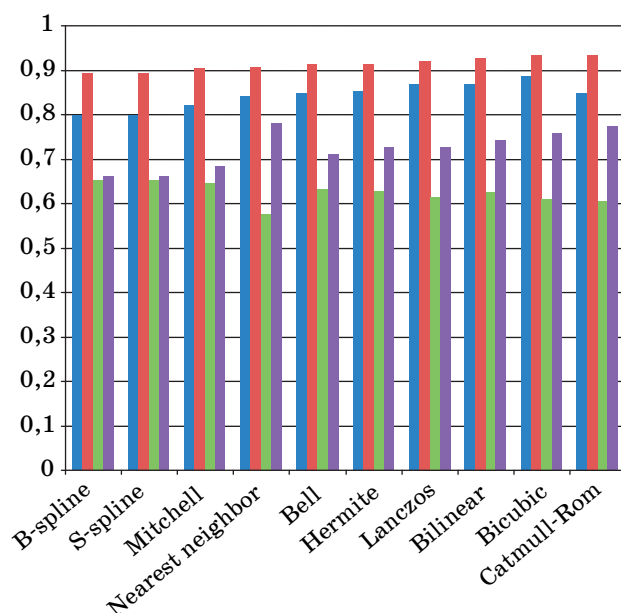


Рис. 4. Зависимость оценки качества мерой *SSIM* от метода интерполяции для разных типов изображений, представленных на рис. 2 (■ — а; ■ — б; ■ — в; ■ — г)

Таблица 2

Алгоритм	<i>SSIM</i>	Алгоритм	<i>SSIM</i>
B-spline	0,7509	Hermite	0,7796
S-spline	0,7509	Lanczos	0,7817
Mitchell	0,7629	Catmull-Rom	0,7899
Bell	0,7753	Bilinear	0,7904
Nearest neighbor	0,7754	Bicubic	0,7965

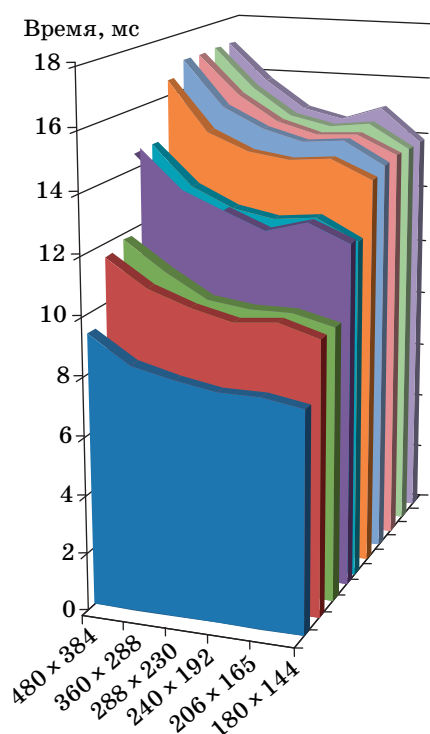
Таблица 3

Размер	<i>K</i>	Размер	<i>K</i>
$400 \times 300$	2	$133 \times 100$	6
$266 \times 200$	3	$114 \times 86$	7
$200 \times 150$	4	$100 \times 75$	8
$160 \times 120$	5		

■ Таблица 4

Размер	Nearest neighbor	Hermite	Bilinear	B-spline	Bell	S-spline	Mitchell	Lanczos	Bicubic	Catmull-Rom
400 × 300	17	21	21	24	24	27	28	28	28	28
266 × 200	16	20	20	24	24	27	28	28	28	28
200 × 150	15	19	19	23	23	25	26	26	26	26
160 × 120	15	19	19	22	22	24	25	25	25	25
133 × 100	15	19	19	22	22	24	25	25	25	25
114 × 86	14	19	18	22	22	24	25	25	25	25
100 × 75	14	18	18	22	21	23	24	24	24	25

Каждое сжатое изображение восстанавливалось до исходного размера перечисленными выше методами, время восстановления (или масштабирования «вверх») заносилось в таблицу с округлением до десятых миллисекунды. Фрагмент полученных данных приведен в табл. 4. Для наглядности был построен график (рис. 5).



■ Рис. 5. Зависимость времени работы алгоритма масштабирования от размера изображения: ■ — Nearest neighbor; ■ — Hermite; ■ — Bilinear; ■ — B-spline; ■ — Bell; ■ — S-spline; ■ — Mitchell; ■ — Lanczos; ■ — Bicubic; ■ — Catmull-Rom

Из графика видно, что чем меньше размер изображения, тем быстрее оно масштабируется. Как и следовало ожидать, самым быстрым оказался метод ближайшего Nearest neighbor (в нем новые пиксели не вычисляются математическим путем, а копируются), а самыми долгими — методы на основе сплайнов.

По скорости работы можно выделить четыре группы алгоритмов масштабирования:

- 1) Nearest neighbor;
- 2) Bilinear, Hermite;
- 3) B-spline, Bell;
- 4) S-spline, Mitchel, Lanczos, Bicubic, Catmull-Rom.

Анализируя данные, полученные при измерении *SSIM* для тестового изображения, и данные измерения времени работы алгоритмов интерполяции, можно сделать следующие выводы.

С увеличением времени работы алгоритма масштабирования растет качество масштабируемой картинке. Соответственно, чем меньше размер файла сжатого изображения, тем ниже качество восстановленного изображения и больше времени потребуется алгоритму масштабирования на его восстановление до исходного размера. Это справедливо для всех алгоритмов масштабирования.

Наибольший интерес представляет сравнение алгоритмов масштабирования между собой. Самый долгий алгоритм Catmull-Rom вопреки ожиданиям не оказывается самым лучшим по качеству получаемой картинке, а самый быстрый алгоритм Nearest neighbor при небольшом коэффициенте компрессии оказывается лучше B-spline и Mitchell. Наибольшего интереса достоин алгоритм Bilinear. Принимая во внимание количественную оценку качества алгоритмов масштабирования, можно сказать, что алгоритм Bilinear является фаворитом, так как при минимальных временных затратах на выходе получается отмасштабированное изображение хорошего качества. Выбор алгоритма масштабирования совпадает с выбором производителей ЖК-телевизоров, так как именно этот алгоритм масштабирования, реализованный аппаратно, используется для масштабирования в ЖК-телевизорах [21].

### Заключение

Проведенные эксперименты подтверждают целесообразность использования предварительного масштабирования изображения перед компрессией для повышения качества восстановленного изображения. По соотношению качество восстановления / время обработки для этой задачи наиболее подходит алгоритм масштабирования Bilinear.

В дальнейшем планируется проведение экспериментов для нахождения оптимального соотношения коэффициентов масштабирования и компрессии с точки зрения качества результирующего изображения, а также оценки симметричности рассмотренного метода для его использования в режиме прямой передачи видеопотока.

## Литература

1. Макаров В. В. Телекоммуникации России: состояние, тенденции и пути развития. — М.: Ириас, 2007. — 296 с.
2. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения. — М.: Техносфера, 2005. — 386 с.
3. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. — М.: Диалог-МИФИ, 2002. — 384 с.
4. Мониц Ю. И., Старовойтов В. В. Оценки качества для анализа цифровых изображений // Искусственный интеллект. 2008. № 4. С. 376 — 386.
5. Гугель Ю. В. и др. Оценка качества передачи динамических изображений в формате mpeg по реальным каналам связи // Тез. докл. VII Всерос. науч.-метод. конф. «Телематика'2000». СПб., 2000. С. 10–11. <http://ipk.admin.tstu.ru/sputnik/index/str/resurs.files/ict.edu.ru/vconf/index44c4.html> (дата обращения: 18.10.2010).
6. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. — СПб.: Питер, 2003. — 688 с.
7. Huynh-Thu Q., Ghanbari M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment // IET Electronics Letters. June 2008. Vol. 44. N 13. P. 800–801.
8. Ватолин Д. Программный продукт оценки качества восстановленного изображения MSU Quality Measure. [http://compression.ru/video/quality\\_measure/video\\_measurement\\_tool.html](http://compression.ru/video/quality_measure/video_measurement_tool.html) (дата обращения: 20.06.2009).
9. Wang Z., Bovik A. C. Modern image quality assessment. — N. Y.: Morgan & Claypool, 2006. — 157 p.
10. Wang Z., Simoncelli E. P. Translation insensitive image similarity complex wavelet domain // IEEE Inter. Conf. Acoustic, Speech and Signal Processing. Philadelphia, 2005. Vol. 2. P. 673–676.
11. Калиткин Н. Н. Численные методы. — М.: Наука, 1978. — 27 с.
12. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2005. — 1072 с.
13. Поляков А. Ю., Брусенцов В. А. Методы и алгоритмы компьютерной графики в примерах на Visual C++. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 560 с.
14. Abramowitz M., Stegun I. A. Handbook of Mathematical Function With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. — Washington.: United States Department of Commerce, 1964. — 890 p.
15. CS465 Notes: Sampling and reconstruction Steve Marschner. Sept. 26, 2004. [http://www.cs.duke.edu/courses/cps124/fall09/notes/12\\_curves/srm\\_sampling.pdf](http://www.cs.duke.edu/courses/cps124/fall09/notes/12_curves/srm_sampling.pdf) (дата обращения: 15.10.2010).
16. ImageMagick v6 Examples — Resize or Scaling. <http://www.imagemagick.org/Usage/resize/#mitchell> (дата обращения: 15.10.2010)
17. Фильтры сглаживания. <http://www.3dcenter.ru/forum/lofiversion/index.php/t83974.html> (дата обращения: 15.10.2010).
18. Передискретизация. <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D1%81%D0%BA%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F> (дата обращения: 15.10.2010).
19. BenVista, Products. <http://www.benvista.com/photozoompro> (дата обращения: 15.10.2010).
20. Richard H. B., John C. B., Brian A. B. An Introduction to Splines for Use in Computer Graphics and Geometric Modeling. — Philadelphia: Morgan Kaufmann Publishers, 1987. — 12 p.
21. Ватолин Д., Путилин С. Оценка качества методов масштабирования изображений и результаты сравнений разных методов. [http://www.graphicon.ru/2003/Proceedings/Technical\\_ru/paper776.pdf](http://www.graphicon.ru/2003/Proceedings/Technical_ru/paper776.pdf) (дата обращения: 20.06.2009).



УДК 004.932, 631.171

# СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ДЕШИФРАЦИИ АЭРОФОТОСНИМКОВ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**И. В. Манылов,**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Проводится сравнение алгоритма расчета евклидова расстояния и алгоритма расчета расстояния Махаланобиса для целей повышения точности дешифрации аэрофотоснимков сельскохозяйственных земель и оценки состояния зеленой растительности. Показано, что для повышения точности классификации изображений, сделанных сверхлегкими аппаратами с высоты 1–3 км и имеющих три канала видимого спектра без использования инфракрасного канала, необходимо учитывать влияние спектральных характеристик соседних точек, окружающих анализируемый пиксель, а также включать в класс более одной обучающей выборки с использованием нескольких эталонных областей.

**Ключевые слова** — аэрофотоснимок, сельское хозяйство, цифровая классификация, дешифрация, анализ изображений, автоматизация.

## Введение

В последнее время возросла потребность в современной и достоверной информации по оценке состояния земель сельскохозяйственного назначения и их использованию как для обеспечения деятельности агропромышленных предприятий, так и для целей охраны окружающей среды. Многие хозяйства по-прежнему отдают предпочтение полевым исследованиям и ручной дешифрации снимков, однако эти методы имеют целый ряд недостатков, к основным из которых можно отнести:

- высокий субъективизм результатов, зависящих от опыта и предпочтений дешифровщика;
- низкую скорость получения результатов дешифрации;
- неизбежные ошибки дешифрации, связанные с человеческим фактором;
- постоянно возрастающую стоимость дешифрации с увеличением площади сельскохозяйственных земель или количества снимков [1].

На сегодняшний день алгоритмы автоматизированной дешифрации средствами вычислительной техники облегчают обработку информации, содержащейся в изображении. Автоматизированная дешифрация аэрофотоснимков позволяет устранить указанные недостатки и поэтому явля-

ется более перспективным способом обработки снимков.

Чтобы выделить на аэрофотоснимке структуры площадей или обнаружить изменения, необходимо провести анализ характеристик пространственного распределения пикселей изображения. В настоящее время одним из наиболее разработанных методов такого анализа является классификация.

Существует много различных алгоритмов для проведения классификации снимков, полученных из космоса, и они подробно описаны в литературе. На основе этих алгоритмов разработано программное обеспечение (ПО), которое широко применяется в различных областях хозяйственной деятельности. В настоящее время это ПО не доступно малым и средним сельскохозяйственным предприятиям из-за высокой стоимости и низкого разрешения снимков.

Целый ряд исследований в литературе и Интернете посвящен оценке точности классификации изображений, в основе которых лежат данные мультиспектральных снимков из космоса. Использование таких снимков небольшими сельскохозяйственными предприятиями невозможно, так как их разрешение не позволяет оценить состояние конкретных земель (исследуемые участки могут быть восприняты как шум или неверно классифицированы).

Применение сверхлегких летательных аппаратов и относительно дешевой фотоаппаратуры позволяет снизить стоимость работ по дистанционному зондированию земной поверхности и дает возможность использовать эти данные для нужд средних и малых предприятий. Учитывая все вышесказанное, определим основную задачу данного исследования: оценить точность классификации снимков, сделанных со сверхлегких летательных аппаратов (мотодельтапланов, беспилотных летательных аппаратов) с высоты 1–3 км и имеющих всего три канала видимого диапазона спектра ( $R$ ,  $G$  и  $B$ ).

### Задача классификации аэрофотоснимков

Задача классификации — формализованная задача, в которой имеется множество объектов, разделенных некоторым образом на классы. Задано конечное множество объектов (выборка), для которых известно, к каким классам они относятся. Классовая принадлежность остальных объектов неизвестна. Требуется построить алгоритм, способный классифицировать произвольный объект из исходного множества.

Алгоритм расчета расстояния между объектами является ключевым моментом задачи классификации, так как от него зависит, к какому классу будет отнесена исследуемая точка аэрофотоснимка. Принимая решение, алгоритм оценивает несходство или расстояние между объектами [2].

При съемке со сверхлегких летательных аппаратов, как правило, используется только три канала информации в видимом диапазоне спектра, но разрешение этих снимков значительно выше, чем при съемке из космоса. Поэтому далее в статье будут рассмотрены два алгоритма классификации именно таких аэрофотоснимков — алгоритмы расчета евклидова расстояния и расстояния Махаланобиса.

Выбор данных алгоритмов обусловлен тем, что формула расчета евклидова расстояния — одна из самых простых и широко применяемых для расчета расстояния в  $N$ -мерном пространстве, а формула расчета расстояния Махаланобиса — одна из самых сложных. Первый алгоритм требует значительно меньше вычислительных ресурсов, чем второй. Далее рассмотрим недостатки и преимущества обоих алгоритмов.

Для классификации аэрофотоснимков будем использовать метод классификации с обучением. Перед проведением классификации необходимо выбрать на исходном снимке эталонные области (обучающие выборки) и назначить им класс. Количество классов зависит от того, сколько областей необходимо получить на результирующей

снимке. Такой подход позволяет не учитывать при сравнении алгоритмов расчета режимы съемки.

Для каждой обучающей выборки предварительно рассчитывается центр тяжести по формуле

$$\mu_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ji}, \quad (1)$$

где  $m$  — количество точек в обучающей выборке;  $i$  — канал аэрофотоснимка.

При расчете расстояния между обучающей выборкой и исследуемой точкой аэрофотоснимка используется расстояние между центром тяжести обучающей выборки и исследуемой точкой [3].

### Алгоритмы расчета расстояния

Евклидово расстояние вычисляется по формуле

$$D(X_j, X_i) = 2 \sqrt{\sum_{k=1}^N (X_{ki} - X_{kj})^2}, \quad (2)$$

где  $N$  — размерность пространства;  $X_{ki}$ ,  $X_{kj}$  — значения объектов  $i$  и  $j$  в  $k$ -м измерении.

Для снимков с тремя каналами  $R$ ,  $G$ ,  $B$  имеем

$$D(X_j, X_i) = 2 \sqrt{(X_{Ri} - X_{Rj})^2 + (X_{Gi} - X_{Gj})^2 + (X_{Bi} - X_{Bj})^2}, \quad (3)$$

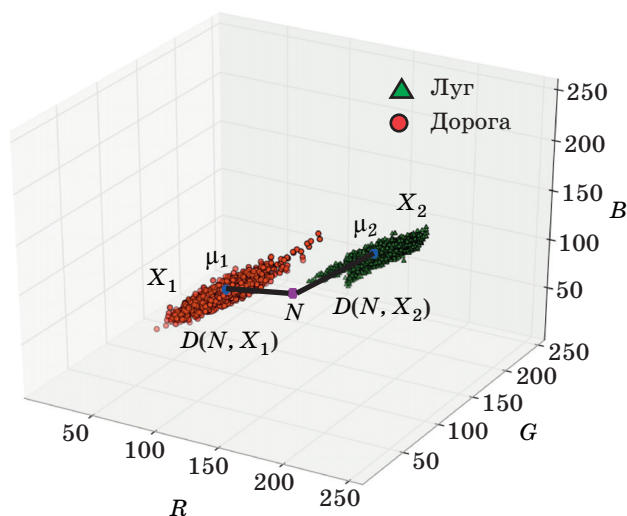
где  $X_{Ri}$ ,  $X_{Rj}$ ;  $X_{Gi}$ ,  $X_{Gj}$ ;  $X_{Bi}$ ,  $X_{Bj}$  — значения каналов  $R$ ,  $G$ ,  $B$  объектов  $i$  и  $j$ .

Алгоритм расчета евклидова расстояния, как видно из формулы, не учитывает ориентацию точек обучающей выборки в пространстве [4]. Для обучающих выборок, которые состоят из точек, равноудаленных от центра тяжести, это не имеет значения. Но для реальных обучающих выборок, в которых присутствуют точки с разными значениями цветовых составляющих  $R$ ,  $G$ ,  $B$ , это приводит к увеличению количества неверно классифицированных областей аэрофотоснимков.

В качестве примера возьмем две обучающие выборки  $X_1$  и  $X_2$ . Взаимное расположение точек обучающей выборки в трехмерном пространстве  $R$ ,  $G$  и  $B$  показано на рис. 1.

Точка аэрофотоснимка  $N$  и два расстояния  $D(N, X_1)$  и  $D(N, X_2)$  на рисунке вычислены по формуле (3). Так как расстояние  $D(N, X_1)$  меньше расстояния  $D(N, X_2)$ , то точка  $N$  будет классифицирована как класс  $X_1$ . Но визуально точка  $N$  находится ближе к классу  $X_2$  и должна быть отнесена к нему. Такая ошибка классификации вызвана тем, что обучающие выборки имеют эллипсоидное распределение точек в пространстве.

Для более точной классификации аэрофотоснимков необходимо учитывать размеры области, занимаемой точками обучающей выборки, и ориентацию этой области в пространстве. Та-



■ Рис. 1. Расположение точек обучающих выборок в пространстве

кой алгоритм был впервые сформулирован индийским статистиком Махаланобисом в 1936 г. и называется *расстоянием Махаланобиса* [5].

Формально расстояние Махаланобиса от многомерного вектора  $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)^T$  до множества со средним значением  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_N)^T$  и матрицей ковариации  $S$  определяется следующим образом:

$$D_M(x) = \sqrt{(x - \mu)^T S^{-1} (x - \mu)}, \quad (4)$$

где  $D_M(x)$  — расстояние Махаланобиса.

Ковариационная матрица в теории вероятностей — это матрица, составленная из попарных ковариаций элементов двух случайных векторов. Матрица ковариации является обобщением дисперсии для многомерной случайной величины. Собственные векторы и собственные числа этой матрицы позволяют оценить размеры и форму облака распределения такой случайной величины, аппроксимировав его эллипсоидом. На рис. 1 видно, что аппроксимация эллипсоидом очень хорошо описывает массив точек обучающих выборок  $X_1$  и  $X_2$ .

Расстояние Махаланобиса — это просто расстояние между заданной точкой и центром тяжести, деленное на ширину эллипсоида в направлении заданной точки. Если матрица ковариации является единичной матрицей, то расстояние Махаланобиса становится равным расстоянию Евклида. Если матрица ковариации диагональная (но необязательно единичная), то получившаяся мера расстояния равна нормализованному расстоянию Евклида. Реальные обучающие выборки, которые используются при классификации снимков, имеют распределение в пространстве,

отличное от правильного эллипсоида; кроме того, области обучающих выборок могут частично перекрываться, особенно для снимков, имеющих только три канала видимого спектра. Это потенциально может служить источником ошибок при проведении классификации. Для уменьшения таких ошибок необходимо тщательно выбирать обучающие выборки, а также предлагается использовать два дополнительных способа:

- при классификации выбранной точки на исходном снимке учитывать спектральные характеристики соседних точек;
- включать в класс более одной обучающей выборки. Это позволит относить к одному классу разные эталонные области. Например, отнести к классу «Нет зелени» различные виды почв и строений.

### Сравнение точности алгоритмов расчета расстояния

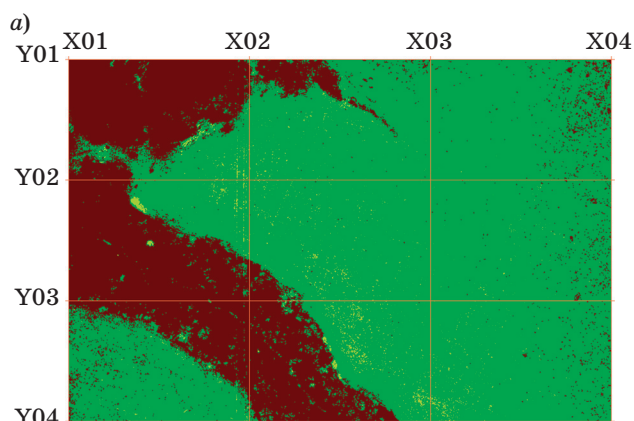
Для оценки эффективности двух рассмотренных алгоритмов автором разработана программа, которая позволяет производить классификацию аэрофотоснимков с использованием вышеописанных алгоритмов и оценивать точность распознавания классов. Ограниченный размер статьи не позволяет более подробно остановиться на описании возможностей этого ПО.

Новизна представленного исследования заключается в том, что анализируются возможности использования снимков, сделанных с высоты 1–3 км и имеющих только каналы видимого спектра. То есть, с одной стороны, имеется разрешение космических аппаратов, а с другой стороны, эти снимки имеют только три канала информации, что исключает использование при проведении классификации инфракрасного канала, который несет значительную часть информации о зеленой растительности.

Перед проведением классификации на исходном снимке были заданы три эталонные области (обучающие выборки), которые были отнесены к трем классам «Лес», «Сухая трава», «Луг». Результаты классификации по двум алгоритмам показаны на рис. 2, а, б.

Для оценки точности классификации исходный снимок был обработан в программе MultiSpec с применением тех же обучающих выборок. Обработанное фото было использовано в качестве эталона при оценке точности классификации по двум алгоритмам, построении матрицы ошибок и расчете индекса каппа-статистики  $k$ , приводимого ниже.

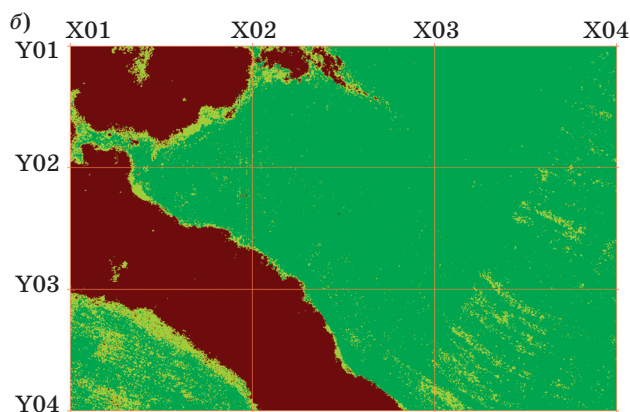
Матрица ошибок формируется следующим образом: элемент  $X_{kl}$  матрицы ошибок равен числу



Программа обработки аэрофотоснимков Version 1.0  
Дата: 21 февраля 2011  
Время: 16:41

УО	Класс	S, %	S, м <sup>2</sup>
■	Лес	27,10	24390,50
■	Сухая трава	1,06	949,50
■	Луг	71,84	64660,00

Площадь исследуемого участка 300 × 300 м  
Шаг сетки 100 м  
Коллекция классов: Дешифровка5  
Алгоритм: Euclidean distance  
Окно дешифрации: [1 × 1]



Программа обработки аэрофотоснимков Version 1.0  
Дата: 21 февраля 2011  
Время: 16:43

УО	Класс	S, %	S, м <sup>2</sup>
■	Лес	25,54	22982,33
■	Сухая трава	8,23	7404,50
■	Луг	66,24	59613,17

Площадь исследуемого участка 300 × 300 м  
Шаг сетки 100 м  
Коллекция классов: Дешифровка5  
Алгоритм: Mahalanobis distance  
Окно дешифрации: [1 × 1]

■ Рис. 2. Результаты классификации по алгоритму расчета евклидова расстояния (а) и алгоритму Махаланобиса (б)

пикселей класса  $k$ , распознанных как класс  $l$ . Элемент матрицы  $X_{kk}$  равен числу пикселей класса  $k$ , распознанных как класс  $k$ . Число правильно классифицированных пикселей располагается на диагонали матрицы. На основе матрицы ошибок при обобщении результатов правильно классифицированных точек был использован так называемый индекс каппа-статистики, вносящий поправку на случайность. Он вычисляется по формуле [6]

$$K = \frac{N \sum_k \sum_l x_{kl} - \sum_{k=1, l=1}^m S_k T_l}{N^2 - \sum_{k=1, l=1}^m S_k T_l}, \quad (5)$$

где  $N$  — общее число пикселей;  $m$  — число классов;  $S_k = \sum_{l=1}^m x_{kl}$  — сумма элементов  $k$ -й строки;  $T_l = \sum_{k=1}^m x_{kl}$  — сумма элементов  $l$ -го столбца.

Дополнительно рассчитывается и общая точность распознавания классов по следующей формуле:

$$P_c = \frac{\sum_k x_{kk}}{N}. \quad (6)$$

Кроме этого используется степень согласованности сравниваемых снимков на основе индекса каппа-статистики (табл. 1).

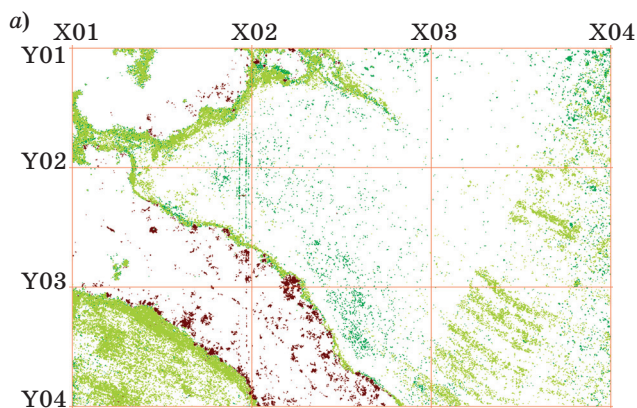
Результаты оценки точности классификации по двум алгоритмам представлены на рис. 3, а, б.

Анализ матрицы ошибок показывает, что точность распознавания класса «Сухая трава» при использовании алгоритма расчета евклидова расстояния составляет всего 3,74 %, при использовании алгоритма Махаланобиса точность повышается до 75,11 %. Точность распознавания классов «Лес» и «Луг» при использовании алгоритма Махаланобиса также выше.

Для алгоритма Махаланобиса индекс каппа-статистики составил 0,93, а для евклидова рас-

■ Таблица 1. Критерии согласованности данных классификации по каппа-коэффициенту [7]

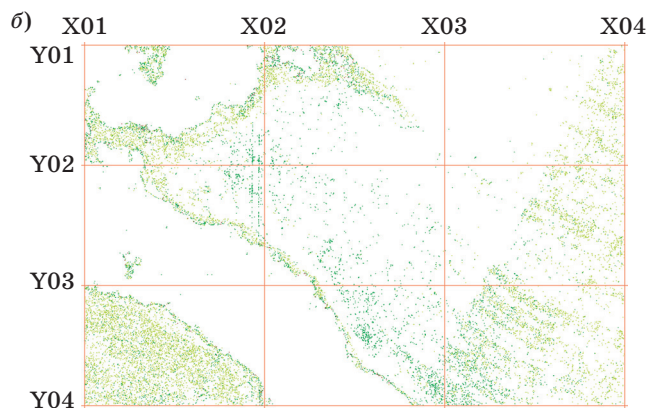
Значение индекса каппа	Согласованность
<0	Отсутствует
0,0 – 0,20	Незначительная
0,21 – 0,40	Слабая
0,41 – 0,60	Умеренная
0,61 – 0,80	Значительная
0,81 – 1,00	Высокая



Программа обработки аэрофотоснимков Version 1.0  
 Дата: 21 февраля 2011. Время: 16:42  
 Площадь исследуемого участка 300 × 300 м  
 Шаг сетки 100 м  
 Коллекция классов: Дешифровка5  
 Алгоритм: Euclidean distance  
 Окно дешифрации: [1 × 1]  
 Матрица ошибок

Классы	Лес	Сухая трава	Луг
Лес	94,77	0,18	5,04
Сухая трава	23,25	3,74	73,01
Луг	1,83	0,99	97,17

Общая точность 87,61 %  
 Индекс каппа-статистики 0,73  
 Оценка индекса Значительная согласованность



Программа обработки аэрофотоснимков Version 1.0  
 Дата: 21 февраля 2011. Время: 16:44  
 Площадь исследуемого участка 300 × 300 м  
 Шаг сетки 100 м  
 Коллекция классов: Дешифровка5  
 Алгоритм: Mahalanobis distance  
 Окно дешифрации: [1 × 1]  
 Матрица ошибок

Классы	Лес	Сухая трава	Луг
Лес	99,87	0,12	0,01
Сухая трава	3,50	75,11	21,39
Луг	0,40	1,51	98,09

Общая точность 96,33 %  
 Индекс каппа-статистики 0,93  
 Оценка индекса Высокая согласованность

■ Рис. 3. Оценка точности классификации по алгоритму расчета евклидова расстояния (а) и расстояния Махаланобиса (б)

стояния — всего 0,73. Следовательно, при обработке аэрофотоснимка алгоритмом Махаланобиса точность распознавания классов на 20 % лучше, чем при использовании алгоритма расчета евклидова расстояния.

Для исследования влияния точек окружения анализируемого пикселя был использован фрагмент снимка, который был дешифрован ручным способом в графическом редакторе. Для дешифрации в программе выбраны две обучающие выборки, которым присвоены классы «Зелень» и «Почва». Также была проведена классификация снимка и оценка точности с использованием в качестве эталона результатов ручной дешифрации. Первый раз классификация проводилась без учета окружения анализируемой точки (матрица 1 × 1). Второй раз классификация выполнялась с размером окна 3 × 3. Результаты приведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что точность классификации повысилась при использовании матрицы 3 × 3 и, следовательно, применение данного ме-

■ Таблица 2. Результаты классификации с учетом окружения анализируемой точки

Матрица 1 × 1		Матрица 3 × 3		
	Зелень	Почва	Зелень	Почва
Зелень	100	0	100	0
Почва	3,53	96,47	3,06	96,94
Индекс каппа-статистики 0,81		Индекс каппа-статистики 0,83		

■ Таблица 3. Результаты классификации с двумя выборками

Одна выборка		Две выборки		
	Зелень	Почва	Зелень	Почва
Зелень	100	0	97,19	2,81
Почва	3,53	96,47	0,03	99,97
Индекс каппа-статистики 0,81		Индекс каппа-статистики 0,98		

тогда целесообразно также при классификации аэрофотоснимков.

Для оценки использования нескольких эталонных областей в одном классе в класс «Почва» была добавлена еще одна эталонная область, которая была выбрана на исходном снимке потому, что почва имеет различные вкрапления.

При проведении классификации получены результаты, которые приведены в табл. 3.

Из этой таблицы видно, что использование двух обучающих выборок в классе «Почва» позволяет классифицировать участки исходного снимка и также может служить для повышения точности дешифрации.

## Заключение

Таким образом, можно сделать вывод о том, что алгоритм Махаланобиса является более эффективным алгоритмом классификации аэрофотоснимков, сделанных сверхлегкими летательными аппаратами с небольшой высоты без использования специальной аппаратуры. Этот алгоритм позволяет значительно повысить точность дешифрации различных объектов при прочих равных условиях проведения аэрофотосъемки. Использование при классификации нескольких эталонных областей одного класса и учет окружения классифицируемых точек также повышает точность дешифрации снимков.

## Литература

1. **Вандышева Н. В.** и др. Мониторинг сельскохозяйственных земель на базе разномасштабных спутниковых данных // Исследование земли из космоса. 2003. № 3. С. 72–84.
2. **Орешкина Л. В.** Обнаружение и распознавание класса объектов на многозональных изображениях дистанционного зондирования // Информатика. 2005. № 2. С. 79–85.
3. **Пятницкий М. А.** Распознавание образов и биоинформатика. [http://bioinformatics.ru/Data-Analysis/patrecog\\_bioinf.html](http://bioinformatics.ru/Data-Analysis/patrecog_bioinf.html) (дата обращения: 21.01.2011).
4. **Методы кластерного анализа**/Национальный технический университет Украины. <http://kpi.ua/do/work/RGR/DATAMINING/clusteranalysismethods.html> (дата обращения: 21.01.2011).
5. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Расстояние\\_Махаланобиса](http://ru.wikipedia.org/wiki/Расстояние_Махаланобиса) (дата обращения: 21.01.2011).
6. **Заславский А. А., Пригарина Т. А.** Оценка согласованности субъективных классификаций при заданных классах // Социология: методология, методы, математические модели. 1994. № 3–4. С. 84–109.
7. **Курбанов Э. А.** Оценка зарастания земель запада республики Марий Эл по данным дистанционного зондирования/Центр устойчивого управления лесами. <http://csfm.marstu.net/> (дата обращения 22.01.2011).

УДК 681.32

## ЭЛЛИПСО-ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ

**Г. Н. Ульянов,**

доктор техн. наук, профессор

**Е. А. Лаврентьев,**

канд. техн. наук, доцент

**И. Н. Павлов,**

канд. техн. наук, ведущий инженер

ОАО «НПО «ЛЭМЗ», г. Москва

Предлагается последовательность формирования временных соотношений для получения суммы и разности дальностей от источника ответного сигнала до приемных постов для двух- и трехмерного случаев. Приведены зависимости по оценке точности метода.

**Ключевые слова** — многопозиционные системы, методы построения многопозиционных систем, эллипсо-гиперболический метод.

### Введение

Мультилатерационные (многопозиционные) системы осуществляют позиционирование воздушных и наземных объектов, оборудованных ответчиками системы управления воздушным движением (УВД), на основе определения времени задержки прихода ответных сигналов на наземные приемные посты.

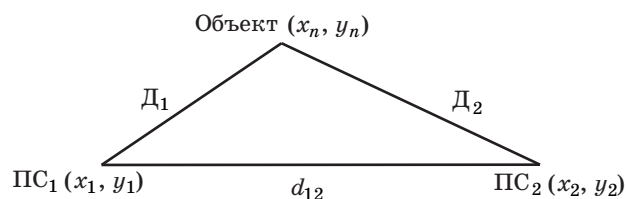
Мультилатерационные системы (МЛС) делятся на широкозонные и аэродромные. Широкозонные МЛС используются в целях наблюдения и контроля воздушных судов на трассах их полета в зоне УВД. Аэродромные системы обеспечивают наблюдение и контроль за воздушными и транспортными средствами в целях автоматизации управления аэродромным движением.

В известных системах используется временно-гиперболический метод, основанный на построении разностно-дальномерной линии (поверхности) положения при измерении разностей времени прихода сигналов на разнесенные приемные станции [1]. В данной статье не затрагиваются технологии обработки времени, а излагается лишь эллипсо-гиперболический метод, который базируется на комплексировании суммарно-дальномерного и разностно-дальномерного способов построения линий (поверхностей) положения. При этом синхронизация шкал времени не требуется.

### Реализация эллипсо-гиперболического метода построения многопозиционных систем

Предлагаемый способ позиционирования объектов аэродромного и воздушного движения направлен на повышение точности определения их координат. Реализация способа требует знания времени задержки ответного сигнала относительно запросного  $\Delta t_{3.0}$ .

Пусть на некоторой базе  $d_{12}$  (рис. 1) развернуты два поста, один из которых представляет приемно-передающую станцию  $ПС_1$ , а второй — приемную станцию  $ПС_2$ . Передатчик 1-го поста излучает электромагнитную энергию (начало сигнала запроса) в нулевой момент времени. По линии связи сигнал запроса передается на 2-й пост, где фиксируется момент его прихода  $t_1^*$ . Запросный сигнал, задержанный в цепях ответчика на  $\Delta t_{3.0}$ , переизлучается в направлении обоих постов. Моменты времени прихода фиксируют на 2-м посту:



■ **Рис. 1.** Иллюстрация эллипсо-гиперболического метода при решении задачи на плоскости

момент  $t_2^*$  — непосредственно от объекта и момент  $t_1$  — по «маршруту» объект — ПС<sub>1</sub> — ПС<sub>2</sub>.

По моментам времени  $t_1^*$  и  $t_2^*$  находится разность  $\Delta\tau^* = t_2^* - t_1^*$ . С учетом времени задержки ответного сигнала относительно запросного имеем

$$\Delta\tau = \Delta\tau^* - \Delta t_{3.0}.$$

Тогда уравнение суммарно-дальномерного метода принимает вид

$$D_1 + D_2 = d_{12} + c\Delta\tau, \quad (1)$$

где  $D_1$  ( $D_2$ ) — расстояние между ПС<sub>1</sub> (ПС<sub>2</sub>) и объектом;  $c$  — скорость распространения электромагнитной энергии.

При составлении уравнения разностно-дальномерного метода необходимо учитывать следующее:

- ноль шкалы времени совпадает с началом ответного сигнала;
- разность времени прихода сигналов на 2-й пост определяется разностью между моментом  $t_1$  прихода сигнала по «маршруту» объект — ПС<sub>1</sub> — ПС<sub>2</sub> и моментом  $t_2^*$ .

С учетом этого

$$D_1 + d_{12} - D_2 = c(t_1 - t_2^*), \quad (2)$$

$$D_1 - D_2 = c\Delta t_{12} - d_{12},$$

где  $\Delta t_{12} = t_1 - t_2^*$ .

Временная диаграмма (рис. 2) иллюстрирует суть предлагаемого метода.

С учетом выражений (1) и (2)

$$D_1 = 0,5c(\Delta\tau + \Delta t_{12});$$

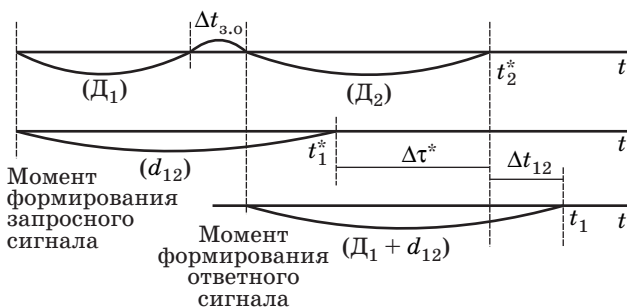
$$D_2 = 0,5c(\Delta\tau + \Delta t_{12}) + d_{12}. \quad (3)$$

Таким образом, по зависимостям (3) определяются дальности  $D_1$  и  $D_2$ .

Для вычисления прямоугольных координат объекта на плоскости необходимо решить систему уравнений вида

$$\begin{aligned} (x_1 - x_n)^2 + (y_1 - y_n)^2 &= D_1^2; \\ (x_2 - x_n)^2 + (y_2 - y_n)^2 &= D_2^2 \end{aligned} \quad (4)$$

относительно  $x_n, y_n$ .



■ Рис. 2. Временная диаграмма эллипсо-гиперболического метода

Аналитическое решение системы (4) при введении обозначений

$$l_i = (x_i^2 + y_i^2)^{1/2}, \quad i = 1, 2; \quad D = (x_n^2 + y_n^2)^{1/2}$$

сводится к виду

$$D_1^2 = l_1^2 + D^2 - 2(x_n x_1 + y_n y_1). \quad (5)$$

Аналогично

$$D_2^2 = l_2^2 + D^2 - 2(x_n x_2 + y_n y_2). \quad (6)$$

При вычитании (6) из (5) получим

$$D_1^2 - D_2^2 = l_1^2 - l_2^2 - 2[x_n(x_1 - x_2) + y_n(y_1 - y_2)].$$

Последнее выражение записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} 0,5(D_2^2 - D_1^2 + l_1^2 - l_2^2) - \\ - x_n(x_1 - x_2) + y_n(y_1 - y_2) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражение (7) при введении обозначения  $0,5(D_2^2 - D_1^2 + l_1^2 - l_2^2) = \gamma$  и делении обеих его частей на  $(x_1 - x_2)$  принимает вид

$$x_n = \frac{\gamma}{x_2 - x_1} - y_n \frac{y_1 - y_2}{x_2 - x_1}.$$

После введения обозначений  $\alpha = \frac{\gamma}{x_2 - x_1}$  и  $\beta = \frac{y_1 - y_2}{x_2 - x_1}$

$$x_n = \alpha - \beta y_n. \quad (8)$$

Таким образом, первое уравнение системы (4) принимает вид

$$\begin{aligned} (x_1 - \alpha + \beta y_n) + (y_1 - y_n)^2 &= D_1^2; \\ (1 + \beta^2)y_n^2 - [2(x_1 - \alpha)\beta - 2y_1]y_n + \\ + [(x_1 - \alpha) + y_1^2 - D_1^2] &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Квадратное уравнение (9) решается относительно  $y_n$ , координата  $x_n$  находится по зависимости (8).

Исходными данными для расчета являются координаты приемных станций  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  и рас-

стояние между ними  $d_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ , а также время задержки ответного сигнала относительно запросного  $\Delta t_{3.0}$ .

Реализация алгоритма определения плоскостных координат объекта заключается в том, что процессор 2-го поста фиксирует моменты прихода сигналов  $t_1^*, t_2^*$  и  $t_1$  именно в такой последовательности:

- вычисляются разности времени прихода сигналов:



$$\Delta t^* = t_2^* - t_1^*; \Delta\tau = \Delta t^* - \Delta t_{3,0}; \Delta t_{12} = t_1 - t_2^*;$$

- определяются дальности  $D_1$  и  $D_2$  в соответствии с выражениями (6), (7);
- вычисляются координаты объекта  $x_n, y_n$  по формулам (8) и (9).

Определение координат воздушного объекта в трехмерном пространстве реализуется следующим образом (рис. 3).

Значения  $D_1$  и  $D_2$  определяются из выражений (1)–(3), полученных для случая расположения 1-го, 2-го постов и объекта на плоскости. При этом роль приемо-передающей станции выполняет 1-й пост.

На 3-м посту фиксируются моменты времени в следующей последовательности:

- $t_3^*$  — момент времени прихода сигнала от 1-го поста, прошедшего расстояние  $d_{13}$ ;
- $t_4^*$  — момент времени прихода сигнала от объекта, прошедшего расстояние  $D_1 + D_3$ ;
- $t_3$  — момент времени прихода переизлученного объектом сигнала, прошедшего расстояние  $D_1 + d_{13}$ .

Вычисляются разности времени:

$$\Delta\tau_1^* = t_4^* - t_3^*; \Delta\tau_1 = \Delta\tau_1^* - \Delta t_{3,0}; \Delta t_{13} = t_3 - t_4^*.$$

Тогда

$$D_3 = 0,5c(\Delta\tau_1 + \Delta t_{13}) + d_{13},$$

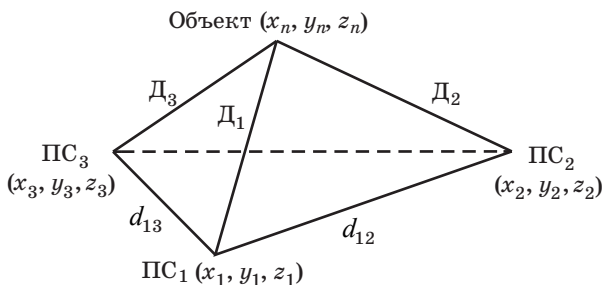
где  $d_{13} = [(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 + (z_1 - z_3)^2]^{1/2}$ .

Вычисление прямоугольных координат воздушного объекта выполняется решением системы уравнений вида

$$\begin{aligned} D_1 &= [(x_1 - x_n)^2 + (y_1 - y_n)^2 + (z_1 - z_n)^2]^{1/2}; \\ D_2 &= [(x_2 - x_n)^2 + (y_2 - y_n)^2 + (z_2 - z_n)^2]^{1/2}; \\ D_3 &= [(x_3 - x_n)^2 + (y_3 - y_n)^2 + (z_3 - z_n)^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

одним из численных методов относительно  $x_n, y_n, z_n$ .

Оценка дисперсии каждой из дальностей может быть получена на основе метода линеаризации функций случайных аргументов [2].



■ Рис. 3. Иллюстрация эллипсо-гиперболического метода при решении задачи в пространстве

Тогда

$$\begin{aligned} \sigma_{D_1}^2 &= \left[ \frac{\partial D_1}{\partial(\Delta\tau)} \right]^2 \sigma_{\Delta\tau}^2 + \left[ \frac{\partial D_1}{\partial(\Delta t_{12})} \right]^2 \sigma_{\Delta t_{12}}^2; \\ \sigma_{D_2}^2 &= \left[ \frac{\partial D_2}{\partial(\Delta\tau)} \right]^2 \sigma_{\Delta\tau}^2 + \left[ \frac{\partial D_2}{\partial(\Delta t_{12})} \right]^2 \sigma_{\Delta t_{12}}^2 + \left[ \frac{\partial D_2}{\partial d_{12}} \right]^2 \sigma_{d_{12}}^2; \\ \sigma_{D_3}^2 &= \left[ \frac{\partial D_3}{\partial(\Delta\tau)} \right]^2 \sigma_{\Delta\tau}^2 + \left[ \frac{\partial D_3}{\partial(\Delta t_{13})} \right]^2 \sigma_{\Delta t_{13}}^2 + \left[ \frac{\partial D_3}{\partial d_{13}} \right]^2 \sigma_{d_{13}}^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Частные производные определяются дифференцированием уравнений

$$\begin{aligned} D_1 &= 0,5c(\Delta\tau + \Delta t_{12}); \\ D_2 &= 0,5c(\Delta\tau + \Delta t_{12}) + d_{12}; \\ D_3 &= 0,5c(\Delta\tau + \Delta t_{13}) + d_{13}. \end{aligned} \quad (12)$$

При этом

$$\frac{\partial D_1}{\partial(\Delta\tau)} = \frac{\partial D_2}{\partial(\Delta\tau)} = \frac{\partial D_3}{\partial(\Delta\tau_1)} = 0,5c;$$

$$\frac{\partial D_1}{\partial(\Delta t_{12})} = \frac{\partial D_2}{\partial(\Delta t_{12})} = \frac{\partial D_3}{\partial(\Delta t_{13})} = 0,5c; \quad \frac{\partial D_2}{\partial d_{12}} = \frac{\partial D_3}{\partial d_{13}} = 1.$$

Числовые значения дисперсий  $\sigma_{\Delta\tau}^2, \sigma_{\Delta t_{12}}^2, \sigma_{\Delta t_{13}}^2$  зависят от способа определения разностей времени. Дисперсии  $\sigma_{d_{12}}^2, \sigma_{d_{13}}^2$  определяются ошибками привязки приемных постов на местности.

Конкретизация перечисленных величин и использование зависимостей (10) обеспечат получение дисперсий дальностей.

Точность определения координат системой мультilaterации может быть оценена с помощью имитационной модели [3, 4]. Оценка точности системы сводится к последовательному выполнению следующих действий:

- заданию координат навигационных постов  $(x_i, y_i, z_i, i = 2, 3, 4)$  и объекта позиционирования  $(x_n, y_n, z_n)$  (при этом целесообразно использовать местную правую прямоугольную систему координат, нулевые значения которой совпадают с точкой расположения 1-го навигационного поста, тогда  $x_1 = 0, y_1 = 0, z_1 = 0$ , а координаты навигационных постов задаются в соответствии с исследуемой конфигурацией их расположения);
- вычислению величин момента прихода сигнала  $t_1^*, t_2^*, t_3^*, t_4^*, t_1$  и  $t_3$ ;
- определению разности времени прихода сигналов  $\Delta\tau^*, \Delta\tau, t_{13}$ ;
- вычислению дальностей  $D_1, D_2$  и  $D_3$ ;
- решению системы уравнений по определению математических ожиданий  $(x_n, y_n, z_n)$ , вычислению систематической ошибки;
- заданию средних квадратических отклонений определения координат 2, 3, 4-го навигаци-

онных постов  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  и вычислению разности времени  $\sigma_t$ ;

- определению дальностей  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$  с наложенными ошибками топогеодезической привязки и счета времени;
- решению системы уравнений и определению  $x_n, y_n, z_n$ ;
- формированию статистической выборки;
- вычислению дисперсии (средних квадратических отклонений) величин  $x_n, y_n, z_n$ .

### Литература

1. Бочкарев В. В. и др. Концепция и системы CNS/ATM в гражданской авиации / Под ред. Г. А. Крыжановского. — М.: Академкнига, 2003. — 415 с.
2. Ульянов Г. Н., Павлов И. Н. Локальная система позиционирования объектов вооружения, военной техники и личного состава // Изв. РАН. СПб., 2008. С. 33–39.
3. Ульянов Г. Н., Павлов И. Н. Оценка точности определения местоположения источника ненаправленного излучения // Актуальные проблемы защиты

### Заключение

Таким образом, совокупность полученных аналитических выражений представляет собой эллипсо-гиперболический метод, реализация которого в многопозиционной системе обеспечивает возможность оценить точностные характеристики разработанного метода для различных вариантов взаимного расположения приемных постов системы.

и безопасности. Вооружение и военная техника: Тр. одиннадцатой Всерос. науч.-практ. конф. / НПО Спецматериалов. СПб., 2008. Т. 1. С. 352–355.

4. Ульянов Г. Н., Павлов И. Н. Суммарно-разностный дальномерный метод позиционирования источника излучения структурированного сигнала // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Вооружение и военная техника: Тр. тринадцатой Всерос. науч.-практ. конф. / НПО Спецматериалов. СПб., 2010. С. 244–248.

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Российская универсальная национальная электронная библиотека (РУНЭБ) начала реализацию проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы зарегистрируетесь на сайте РУНЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющихся в базе данных РУНЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, в том числе добавлять публикации, которых нет в базе данных РУНЭБ, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

УДК 621.313.32

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ НА ТРЕНИЕ В РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА СИНХРОННОГО ВТСП-ДВИГАТЕЛЯ

**Е. Н. Андреев,**

ведущий инженер

**Д. А. Волков,**

ассистент

**А. Р. Орлов,**

заведующий лабораторией

**С. С. Тимофеев,**

старший преподаватель

**М. А. Турубанов,**

аспирант

**Л. И. Чубраева,**

член-корр. РАН, доктор техн. наук, профессор

**В. Ф. Шишлаков,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассмотрены вопросы, связанные с экспериментальным определением механических потерь, возникающих в погружных высокотемпературных сверхпроводниках синхронных двигателей. Изготовлена специальная модель для проведения исследований в различных средах: в жидком азоте, воде, газообразном азоте, при вращении на воздухе. Проанализированы потери холостого хода при вращении роторного диска в жидком азоте. Приведены результаты экспериментального определения времени выбега ротора в различных средах.

**Ключевые слова** — дисковая электрическая машина, высокотемпературная сверхпроводимость, постоянные магниты, механические потери, потери холостого хода.

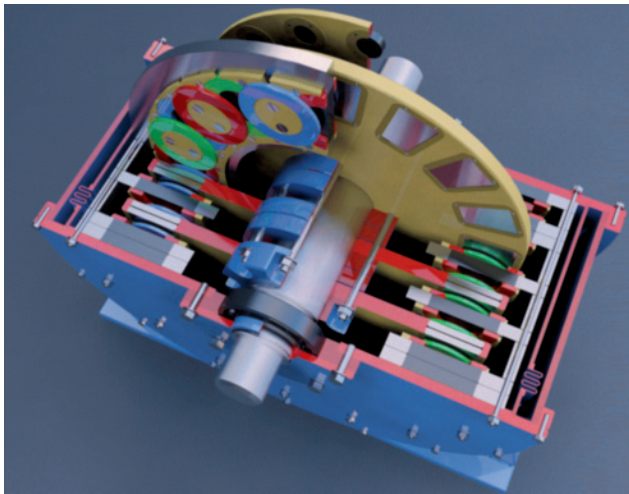
### Введение

Применение дисковых бесконтактных генераторов и двигателей с постоянными магнитами на роторе обусловлено их более высокими удельными энергетическими и массогабаритными показателями, улучшенными динамическими характеристиками, отсутствием щеточно-контактного узла. Дисковые машины целесообразно использовать, в частности, в механизмах, у которых существуют ограничения по массогабаритным показателям. Кроме того, они являются высокомоментными электромеханическими преобразователями энергии и находят применение в ветроэнергетических установках, в гребных двигателях и др. Сравнительно широкое применение этих машин в прикладной сверхпроводимости связано с возможностью существенно упростить

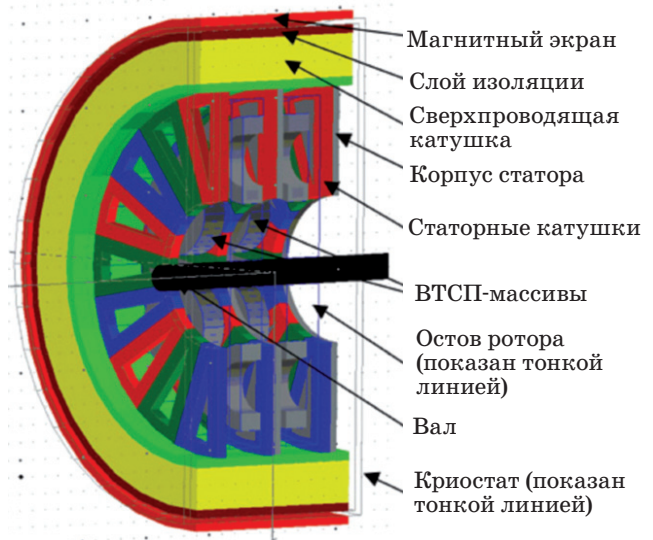
геометрию элементов (как массивов, так и ленточных обмоток) высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП).

### Дисковые сверхпроводниковые машины

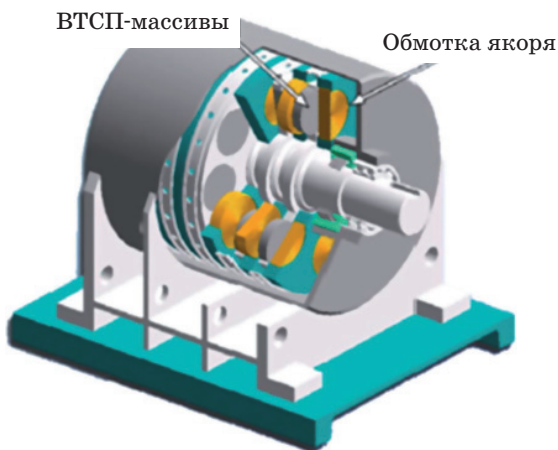
Первая сверхпроводниковая синхронная машина была изготовлена и испытана во ВНИИ-электромаш (Ленинград) в 80-е гг. XX в. Она имела круглые обмотки из низкотемпературных сверхпроводников ( $Nb-Ti$  и  $Nb_3Sn$ ) на роторе и на статоре, работала в жидком гелии, и снижение потерь на трение достигалось подбором величины воздушного зазора и частоты вращения ротора. Так появилась первая 8-полюсная дисковая синхронная машина. Дополнительным преимуществом четного числа пар полюсов явилась возможность размещать обмотки статора не в три,



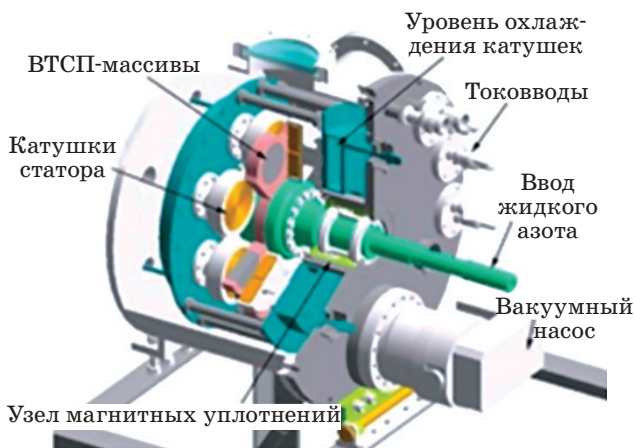
■ Рис. 1. Принципиальная конструктивная схема многодискового синхронного двигателя мощностью 50 кВт (Санкт-Петербург, НИИ ИТЭЭ ГУАП)



■ Рис. 4. Конструкция VTСП многодисковой машины (США)



■ Рис. 2. Многодисковый синхронный VTСП-двигатель (Япония)



■ Рис. 3. Дискосая машина фирмы KINATO SEIKI Co., LTD (Япония)

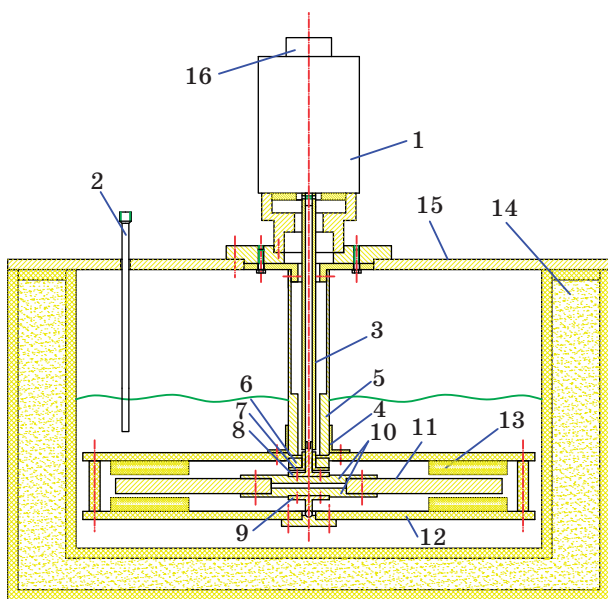
а в два слоя, что увеличило величину поля возбуждения в зоне обмотки якоря. Мощность машины не превышала единиц мегаватт, но при ее исследованиях удалось получить экспериментальные данные о полностью сверхпроводниковой машине без электромагнитного экрана на роторе. В дальнейшем были изготовлены аналогичные машины с обмотками ротора и статора из высокочистого алюминия, с постоянными магнитами и массивами из VTСП на роторе, с обмоткой возбуждения из отечественного ленточного VTСП. В результате был получен широкий спектр экспериментальных данных, что позволило нам перейти к созданию высокомоментного VTСП-двигателя для автономной энергетической установки (рис. 1) [1, 2].

В дальнейшем аналогичные машины с одним роторным диском были изготовлены и испытаны в Венгрии, Германии, Испании и других странах. На рис. 2–4 показаны варианты многодисковых VTСП-машин, разработанных в Японии и США.

### Экспериментальное определение потерь при вращении ротора в жидкой и газообразной среде

Экспериментальные исследования многодискового VTСП-двигателя погружного типа показали, что довольно трудно выделить механические и тепловые потери, возникающие при вращении роторных дисков в жидком азоте. Для определения характера изменения этих потерь была изготовлена специальная модель (рис. 5).

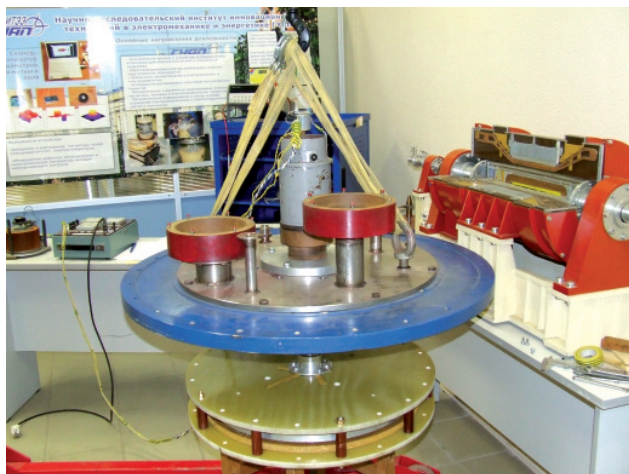
Общий вид модели, имитирующей ротор и два статора дисковой машины, закрепленной на



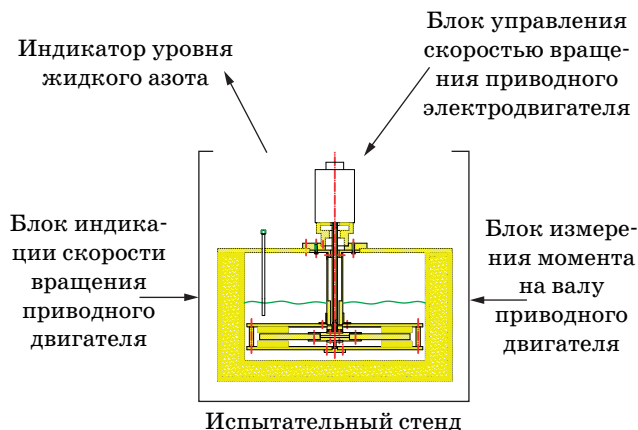
■ Рис. 5. Конструктивная схема экспериментальной установки для определения потерь на трение ротора в жидкой и газообразной среде: 1 — двигатель постоянного тока; 2 — уровнемер; 3 — приводной вал; 4 — 7 — элементы подвеса; 8 — 10 — элементы крепления диска ротора; 11 — диск ротора; 12 — основание; 13 — диски статора; 14 — криостат; 15 — крышка криостата; 16 — датчик скорости

крышке криостата, показан на рис. 6. Диаметр роторного диска 560 мм, толщина 22 мм. Конструкция модели позволяет изменять величину физического зазора между ротором и статором в диапазоне от 6 до 30 мм.

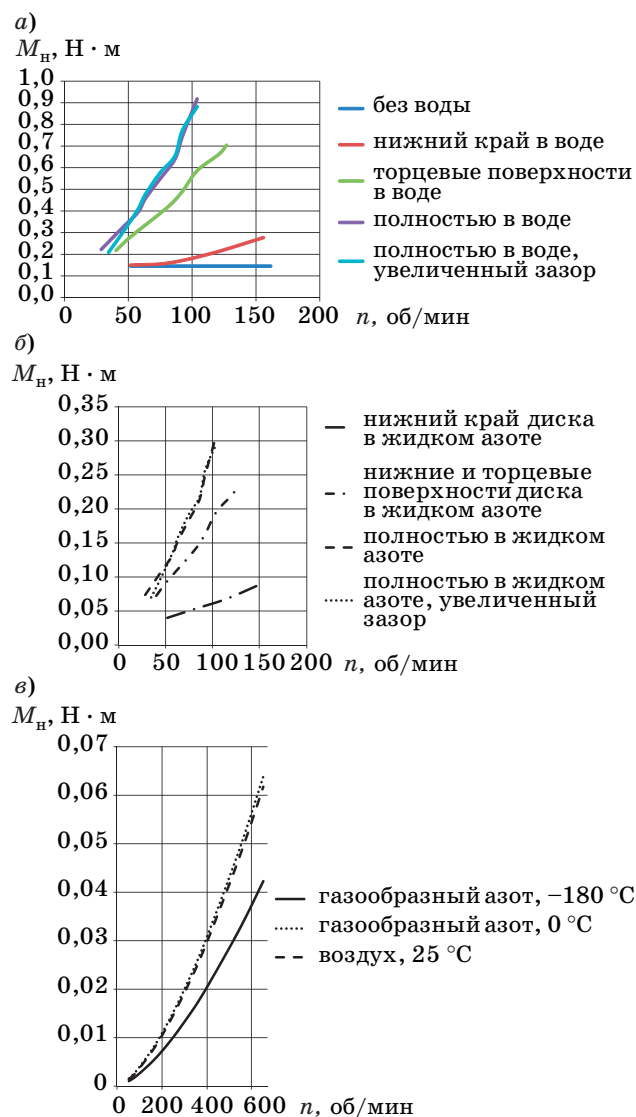
Функциональная схема исследовательской установки на базе испытательного стенда изображена на рис. 7.



■ Рис. 6. Общий вид модели перед установкой в криостате



■ Рис. 7. Схема исследовательской установки

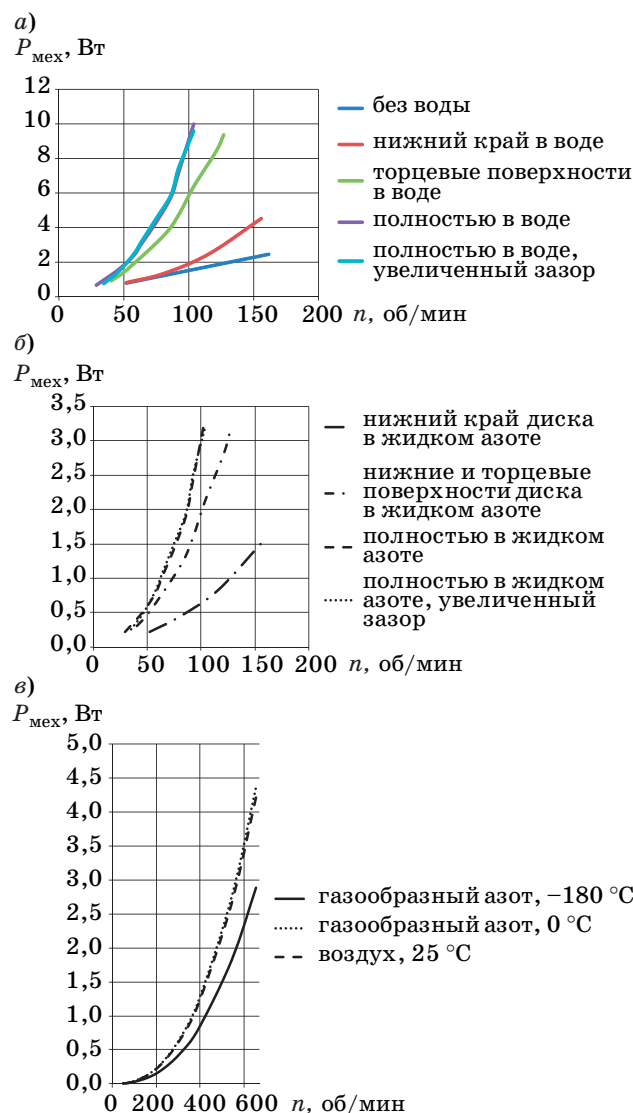


■ Рис. 8. Нагрузочная характеристика при вращении ротора в воде (а), в жидком азоте (б) и в среде газообразного азота и воздуха при различных температурах (в)

Механические потери определялись на холостом ходу путем измерения действующего значения тока якоря приводного двигателя при изменении скорости вращения ротора модели ВТСП синхронного электродвигателя в диапазоне от 0 до 400 об/мин при фиксированной и изменяющейся величине зазора между вращающимся ротором и неподвижным статором.

Измерения проводились в трех средах — в воде, на воздухе, в среде жидкого и газообразного азота. В результате определены величины моментов трения при вращении ротора модели и мощность потерь.

Тепловые потери оценивались по падению уровня жидкого азота до начала и в процессе вра-



■ Рис. 9. Зависимость потерь на трение от частоты вращения в воде (а), в жидком азоте (б) и в среде газообразного азота и на воздухе при различных температурах (в)

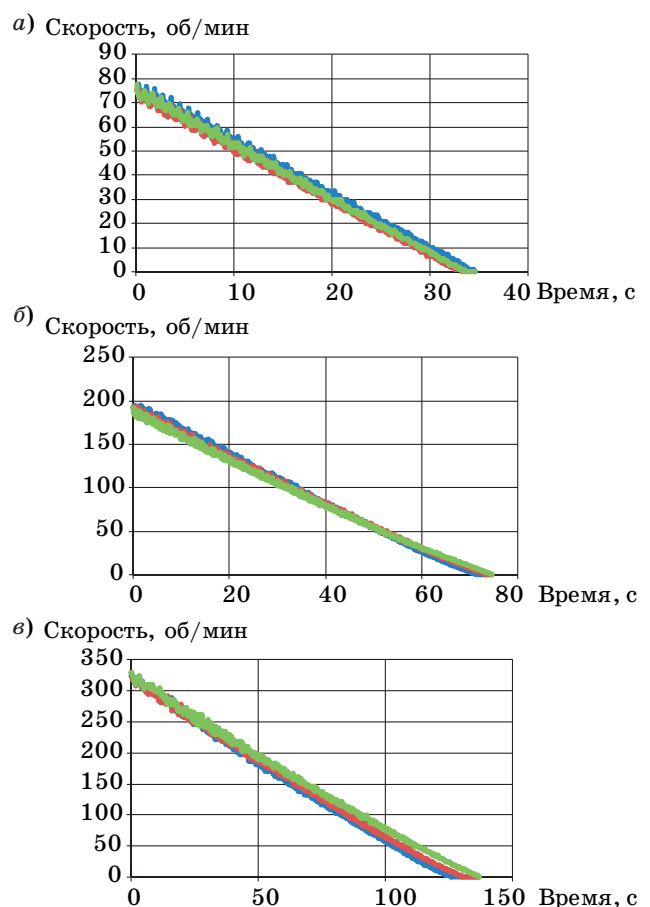
щения ротора масштабной модели в единицу времени.

Графики нагрузочных характеристик и зависимостей величины потерь от частоты вращения ротора представлены на рис. 8, а—в и 9, а—в соответственно.

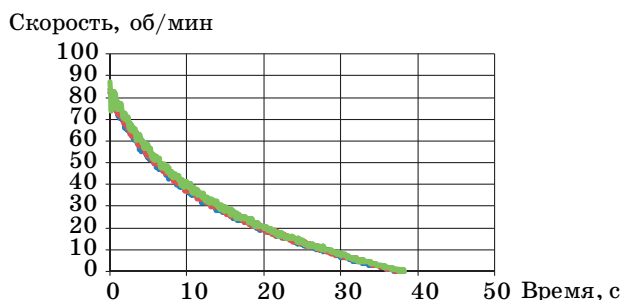
Таким образом, полученные экспериментальные данные показывают, что в многодисковой синхронной машине погружного типа потери при вращении ротора на холостом ходу находятся на приемлемом уровне. При работе двигателя под нагрузкой происходит испарение азота под действием потерь, выделяющихся в обмотке статора, азот переходит в газообразное состояние и потери дисков на трение резко уменьшаются.

### Определение выбега ротора

В ходе эксперимента проводился разгон установки до определенного значения частоты вращения, после чего приводной двигатель отключался и фиксировался переходный процесс по скорости. Исследования проводились при вращении на воздухе и в воде.



■ Рис. 10. Выбег установки на воздухе при частоте вращения 75 (а), 192 (б) и 327 (в) об/мин



■ Рис. 11. Выбег установки в воде при частоте вращения 84 об/мин

Измерения проводились в три этапа для одних и тех же начальных условий: для трех скоростей на воздухе: 75, 192 и 327 об/мин; и для одной скорости 84 об/мин в воде. Среднее время выбега при вращении ротора составило 33,7; 72,9; 130,5 и 37,6 с соответственно. Результаты иллюстрируют рис. 10, а–в и 11.

На основании экспериментальных данных можно говорить о том, что уровень запасенной кинетической энергии влияет на время выбега. Время выбега многодисковой машины будет значительно больше, поскольку запасенная кинетическая энергия увеличится пропорционально количеству дисков. К сожалению, ограниченная мощность приводного двигателя не позволила оценить зависимости времени от частоты вращения в жидкой среде, поскольку при такой низкой частоте вращения кинетическая энергия ротора невелика. При номинальной частоте вращения 375 об/мин жидкая среда позволит уменьшить время выбега. Это может быть использовано при необходимости быстро остановить ротор.

## Заключение

Высокомомментные дисковые синхронные электрические машины представляют интерес как низкооборотные двигатели, в частности в системах электродвижения судов, и как генераторы в ветроэнергетических установках.

Разработанная модель для исследования механических потерь в ВТСП машинах погружного типа позволила получить уникальные экспериментальные данные.

Потери на трение диска в жидких средах в режиме холостого хода являются относительно большими, но в режиме нагрузки жидкий азот переходит в газообразное состояние и потери резко снижаются.

Снижение времени выбега в жидкой среде говорит о том, что для ускорения торможения двигателя необходимо увеличить подачу жидкого азота.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации: контракт № 20.740.11.0070.

## Литература

1. Чубраева Л. И. и др. Совместная работа ВТСП устройств автономной электроэнергетической установки // Сверхпроводимость. 2009. № 14. С. 15–32.
2. Чубраева Л. И. и др. Автономная электроэнергетическая установка с использованием высокотемпературных сверхпроводников // Сверхпроводимость. 2009. № 14. С. 7–13.

УДК 621.391.15

## АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ КОД

**М. В. Гофман,<sup>1</sup>**

аспирант

Петербургский государственный университет путей сообщения

Представлен алгебраический слоённый пространственно-частотно-временной код, в котором элементы каждого слоя кодового слова передаются по доступным в многоантенной системе частотным подканалам, антеннам и посылкам. Также представлены функциональные зависимости между позицией элемента слоённого пространственно-частотно-временного кодового слова и номерами частотного подканала, передающей антенны и посылки. Представлен алгоритм определения элемента слоённого кодового слова для заданного номера частотного подканала, номера передающей антенны и номера посылки.

**Ключевые слова** — многоантенная система, алгебраический пространственно-частотно-временной код, слоённое пространственно-частотно-временное кодовое слово.

### Введение

Пространственно-частотно-временное (ПЧВ) кодовое слово — это конечное или счетное множество конкретных комплексных чисел, каждому элементу которого, по определенному правилу, поставлена в соответствие одна или несколько троек целых положительных чисел. Далее эта тройка целых положительных чисел называется позиционной тройкой, а комплексное число, которому она сопоставляется, называется элементом кодового слова. ПЧВ кодовое слово определено, если указаны все его элементы и соответствующие им позиционные тройки. Для того чтобы задать процесс ПЧВ-кодирования, необходимо указать способ получения элементов конструируемых кодовых слов и правило соответствия между элементами кодового слова и позиционными тройками.

Пространственно-частотно-временное кодовое слово называется *блоковым*, если соответствующие его элементам позиционные тройки составляют конечное множество. Порождающей матрицей ПЧВ-кода называется такая матрица, в результате умножения на которую информационного вектора получается вектор из всех элементов кодового слова. Причем структура этого вектора такова, что для каждого его элемента можно

<sup>1</sup> Научный руководитель — доктор технических наук, профессор кафедры информатики и информационной безопасности Петербургского государственного университета путей сообщения *Е. Т. Мирончиков*.

сразу указать соответствующую ему позиционную тройку.

Пространственно-частотно-временное кодирование применяется в системах беспроводной связи, в которых каждый абонент использует несколько передающих и несколько принимающих антенн. Очень часто такие системы называют ММО-системами беспроводной связи (*MIMO — Multiple Input Multiple Output*). В них элементы позиционной тройки определяют, по какой антенне, по какому частотному подканалу и в какой посылке будет передаваться элемент кодового слова, соответствующий этой тройке.

В данной статье будет рассматриваться ПЧВ-кодирование, основанное на принципе слоения. Кодовые слова называют *слоёнными*, если ПЧВ-кодирование, использованное для их построения, основано на принципе слоения. Принцип слоения заключается в том, чтобы разделить исходный вектор данных на смежные части, подвергнуть их линейным обратимым преобразованиям, а затем по определенному правилу сопоставить элементы результатов преобразований и позиционных троек.

Для определения кодового слова необходимо как множество из всех элементов кодового слова и множество позиционных троек, так и правило, по которому сопоставляются элементы этих множеств. В целях указания такого правила в методах ПЧВ-кодирования, основанных на принципе слоения, используется понятие слоя и смещения



в слое. Под *слоем* понимается упорядоченное подмножество множества всех элементов кодового слова, а под *смещением* — позиция элемента в этом подмножестве. Поэтому для указания на элемент кодового слова достаточно использовать пару целых положительных чисел — номер слоя и смещение в слое; далее эти пары называются *слоевыми парами*. Однако произвольный элемент кодового слова вместе с тем связан и с позиционной тройкой. Наличие этой двойкой связи позволяет создать связь между слоевыми парами и позиционными тройками. Такая новая связь дает возможность косвенно, через слоевые пары, оперировать элементами кодового слова.

Пространственно-частотно-временные кодовые слова можно представлять в форме матрицы, состоящей из элементов кодового слова. Для этого достаточно указать связь между позициями в матрице и позиционными тройками. В такой матрице каждый элемент занимает позицию в соответствии с отвечающей ему позиционной тройкой. Однако в слоённом ПЧВ кодовом слове существует связь между слоевыми парами и позиционными тройками. Поэтому таким же образом можно сформировать матрицу из слоевых пар, которая далее так и называется — *матрицей слоевых пар*. Если матрицу слоевых пар разделить на две, в одной оставив номера слоев из каждой слоевой пары, а в другой — смещения из каждой слоевой пары, то полученные таким образом матрицы будем называть *матрицей слоев* и *матрицей смещений* соответственно.

Каналы связи, в которых влияния на передаваемые элементы ПЧВ кодового слова в среднем одинаковы для всех передаваемых антенн, частотных подканалов и посылок называют пространственно белыми. В работах [1, 2] была описана оптимальная структура матрицы слоев слоённых ПЧВ-кодов, ориентированных на пространственно белые каналы связи. Кодовые слова этих кодов можно строить [3] с помощью порождающих матриц, которые можно получить методом, описанным в работе [4].

Размеры матрицы слоевых пар зависят от числа позиционных троек. Поэтому изменение числа частотных подканалов, числа передающих антенн и числа посылок, требуемых для передачи одного кодового слова, изменяет и размеры матрицы слоевых пар, а вместе с этим и сложность обработки и хранения матрицы слоевых пар. Вследствие этого задача сопоставления требует решения с помощью таких инструментов, которые бы позволяли сопоставлять позиционные тройки и элементы кодового слова без построения матрицы слоевых пар.

Позиционирующие функции, представленные в этой статье, позволяют решить задачу сопостав-

ления элементов слоённого ПЧВ кодового слова и элементов множества позиционных троек без построения матрицы слоевых пар. Значения этих функций определяют элементы матрицы слоевых пар для представленного в этой статье слоённого ПЧВ-кода. Слоённый блоковый ПЧВ-код ориентирован как на пространственно белые каналы, так и на такие, в которых в среднем влияние на каждом из частотных подканалов различно.

В завершающей части статьи дан алгоритм определения элемента слоённого кодового слова для заданной позиционной тройки, который позволит выполнять связывание элемента и позиционной тройки в реальном времени.

Символами «N», «Z», «Q», «R» и «C» обозначим множество целых положительных чисел, кольцо целых чисел, поле рациональных чисел, поле вещественных чисел и поле комплексных чисел соответственно. Символом  $j$  будем обозначать  $\sqrt{-1}$ . Индекс <sup>H</sup> обозначает транспонирование с сопряжением соответственно. Символ  $\lfloor x \rfloor$  — наибольшее целое число, меньшее или равное  $x$ ; символ  $\lceil x \rceil$  — наименьшее целое число, большее или равное  $x$ ; символ  $\{x\}$  — целая часть числа  $x$ , знак числа сохраняется.

Параметры ММО-системы: число передающих антенн —  $N_{Tx}$ ; число посылок —  $N_B$ ; число частотных подканалов —  $N_C$ ; число путей распространения сигнала от каждой антенны —  $L$ . Величины, зависящие от этих параметров:  $N_L \geq L$ ,  $N_q \geq N_{Tx}$ ,  $N_b \leq N_B$ ;  $N_y \triangleq N_L N_{Tx} N_b$  — число элементов в слое; а также  $J \in \mathbb{N} \setminus 0$ .

### Матрица слоев и матрица смещений

Предположим, что ММО-система использует  $N_c \triangleq J N_q N_L$  частотных подканалов,  $N_{Tx} > 1$  передающих антенн и  $N_b \triangleq J N_q N_L N_b$  посылок со всех  $N_{Tx}$  передающих антенн для передачи одного кодового слова. Пусть позиционная тройка (channel, Tx\_antenna, burst) состоит из номера частотного канала, номера передающей антенны, номера посылки соответственно, и очевидно, что  $\text{channel} \geq 1$ ,  $\text{Tx\_antenna} \geq 1$  и  $\text{burst} \geq 1$ . Связь между позиционной тройкой и парой  $(m, k)$ , используемой для задания позиции в двумерной матрице, будет определяться по равенствам

$$m = \text{channel} \quad (1)$$

и

$$k = (\text{burst} - 1) N_{Tx} + \text{Tx\_antenna}. \quad (2)$$

Для построения ПЧВ кодового слова описанного ниже кода требуется  $N_c N_{Tx} N_b$  элементов кодового слова, а так как позиционных троек  $N_{Tx} N_c N_b \geq N_c N_{Tx} N_b$ , то некоторые элементы кодового слова будут связаны с несколькими позици-

онными тройками. Перед тем как связать элементы кодового слова и позиционные тройки, из множества всех элементов кодового слова выделяют  $JN_q N_L$  слоев, в каждом из которых  $N_q$  элементов. Для передачи всех элементов кодового слова требуется  $JN_q N_L N_b = N_B$  посылок со всех  $N_{Tx}$  передающих антенн, однако в каждой из  $JN_q N_L$  посылок передаются одни и те же элементы кодового слова, но по-другому распределенные между частотными подканалами. А именно, они распределены так, что только один раз элемент кодового слова передается по одному и тому же частотному подканалу. Для достижения такой схемы передачи сконструирована матрица слоевых пар с блоковой структурой. Каждый блок матрицы занимает одинаковый по размерам диапазон номеров частотных подканалов  $N_q N_L$  и требует одинакового числа передач  $N_b$  для посылки элементов кодового слова, связанных с его элементами. К тому же элементы кодового слова, связанные со слоевыми парами некоторого блока, полностью определяют  $N_q$  слоев.

Структурную схему матрицы слоевых пар мы разделим на две: в одной представим матрицу слоев, в другой — матрицу смещений. Итак, матрица слоев представляет собой блоковую матрицу

$$\mathbf{L} \triangleq \begin{pmatrix} \mathbf{P}^{(1-1)\bmod(N_q N_L)+1} \mathbf{L}^{1,1} & \mathbf{P}^{(2-1)\bmod(N_q N_L)+1} \mathbf{L}^{1,2} & \dots & \mathbf{P}^{(JN_q N_L-1)\bmod(N_q N_L)+1} \mathbf{L}^{1, JN_q N_L} \\ \mathbf{P}^{(1-1)\bmod(N_q N_L)+1} \mathbf{L}^{2,1} & \mathbf{P}^{(2-1)\bmod(N_q N_L)+1} \mathbf{L}^{2,2} & \dots & \mathbf{P}^{(JN_q N_L-1)\bmod(N_q N_L)+1} \mathbf{L}^{2, JN_q N_L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{P}^{(1-1)\bmod(N_q N_L)+1} \mathbf{L}^{J,1} & \mathbf{P}^{(2-1)\bmod(N_q N_L)+1} \mathbf{L}^{J,2} & \dots & \mathbf{P}^{(JN_q N_L-1)\bmod(N_q N_L)+1} \mathbf{L}^{J, JN_q N_L} \end{pmatrix},$$

где  $\mathbf{P}^j, j = 1, 2, \dots, N_q N_L$  — матрицы перестановок, их определение дано ниже;  $\mathbf{L}^{i,j}, i = 1, 2, \dots, J; j = 1, 2, \dots, JN_q N_L$  — это также блоковые матрицы:

$$\mathbf{L}^{i,j} \triangleq \left[ \mathbf{L}_{n,k} + N_q \left( (i-1) + \left\lfloor \frac{j-1}{N_q} \right\rfloor \right) \bmod(J) \mathbf{E} \right],$$

где  $[\bullet]$  — оператор получения целой части числа;  $n = 1, 2, \dots, N_L$  и  $k = 1, 2, \dots, N_b$ ;  $\mathbf{E}$  — матрица, элементы которой — единицы; а  $\mathbf{L}_{n,k}$  — теплицева матрица, определенная как

$$\mathbf{L}_{n,k} \triangleq \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & N_{Tx} \\ N_q & 1 & \dots & N_{Tx} - 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (N_q - N_{Tx} + 1) \bmod N_q + 1 & (N_q - N_{Tx} + 2) \bmod N_q + 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 2 & 3 & \dots & \left( 1 - \left\lfloor \frac{N_{Tx}}{N_q} \right\rfloor \right) N_{Tx} + 1 \end{pmatrix}.$$

Матрица перестановок  $\mathbf{P}^j, j=1, 2, \dots, N_q N_L$  — матрица вида

$$\mathbf{P}^j \triangleq (p_{c,d}(j)), \tag{3}$$

где  $c = 1, 2, \dots, N_q N_L; d = 1, 2, \dots, N_q N_L$ , в которой элемент, расположенный на  $c$ -й строке и в  $d$ -м столбце:

$$p_{c,d}(j) \triangleq \begin{cases} 1, & c = \eta(j, d; N_q, N_L) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где  $\eta(j, d; N_q, N_L) \triangleq (j + d - \text{goe}(N_q N_L + 1 - d, j)) \bmod(N_q N_L + 1),$  (4)

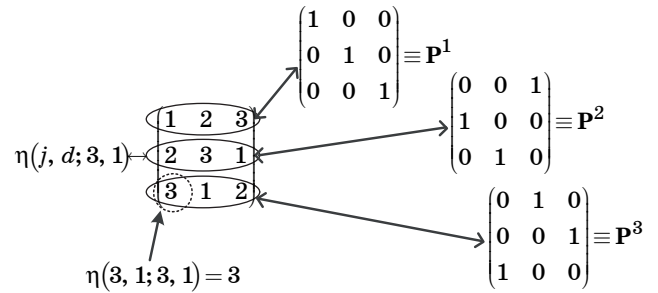
где

$$\text{goe}(a, b) \triangleq \begin{cases} \left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor \\ \frac{a}{b} \end{cases},$$

где  $a, b \in \mathbb{R} \setminus 0$ . Значение функции  $\text{goe}(a, b)$  ( $\text{goe}$  — greater or equal — больше либо равно) либо равно 1, если  $|a| \geq |b|$ , либо равно 0, если  $|a| < |b|$ . На рис. 1,  $a$ – $z$  показаны примеры матриц  $\mathbf{L}_{n,k}$ , а на рис. 2 — примеры матриц  $\mathbf{P}^j$ .

$$\begin{aligned}
 & \text{a) } \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{б) } \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix} \\
 & \text{в) } \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 1 & 2 \\ 3 & 4 & 1 \\ 2 & 3 & 4 \end{pmatrix} \quad \text{г) } \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 4 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

■ Рис. 1. Примеры матриц  $L_{n,k}$  для случаев, когда: а —  $N_{Tx} = N_q = 2$ ; б —  $N_{Tx} = 2, N_q = 3$ ; в —  $N_{Tx} = 3, N_q = 4$ ; г —  $N_{Tx} = N_q = 4$



■ Рис. 2. Пример матрицы, построенной с помощью функции  $\eta(j, d; 3, 1)$ , а также матриц перестановок  $P^1, P^2, P^3$ , получаемых на основе значений ее элементов

Каждый элемент матрицы  $L_{n,k}$  равен номеру слоя, а сама матрица  $L_{n,k}$  является подматрицей циркулянтной теплицевой матрицы

$$\mathbf{K} \triangleq \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & N_q \\ N_q & 1 & \dots & N_q - 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2 & 3 & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

Матрица смещений представляет собой блочную матрицу

$$\mathbf{S} \triangleq \begin{pmatrix} \mathbf{P}^{(1-1)\text{mod}(N_q N_L)+1} \mathbf{S}^{1,1} & \mathbf{P}^{(2-1)\text{mod}(N_q N_L)+1} \mathbf{S}^{1,2} & \dots & \mathbf{P}^{(J N_q N_L - 1)\text{mod}(N_q N_L)+1} \mathbf{S}^{1, J N_q N_L} \\ \mathbf{P}^{(1-1)\text{mod}(N_q N_L)+1} \mathbf{S}^{2,1} & \mathbf{P}^{(2-1)\text{mod}(N_q N_L)+1} \mathbf{S}^{2,2} & \dots & \mathbf{P}^{(J N_q N_L - 1)\text{mod}(N_q N_L)+1} \mathbf{S}^{2, J N_q N_L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{P}^{(1-1)\text{mod}(N_q N_L)+1} \mathbf{S}^{J,1} & \mathbf{P}^{(2-1)\text{mod}(N_q N_L)+1} \mathbf{S}^{J,2} & \dots & \mathbf{P}^{(J N_q N_L - 1)\text{mod}(N_q N_L)+1} \mathbf{S}^{J, J N_q N_L} \end{pmatrix},$$

где  $P^j$  — матрица перестановок, определенная равенством (3);  $S^{i,j}, i = 1, 2, \dots, J; j = 1, 2, \dots, J N_q N$  — блочные матрицы:

$$\mathbf{S}^{i,j} \triangleq (\mathbf{S}_{n,k} + w(n, k; N_{Tx}, N_L) \mathbf{E}),$$

где  $n = 1, 2, \dots, N_L, k = 1, 2, \dots, N_b; w(n, k; N_{Tx}, N_L) \triangleq (n - 1)N_{Tx} + (k - 1)N_{Tx}N_L$  и

$$\mathbf{S}_{n,k} \triangleq \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \left\lfloor \frac{N_{Tx}}{N_q} + 1 \right\rfloor & 2 & \dots & 2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{Tx} & N_{Tx} & \dots & N_{Tx} \end{pmatrix},$$

а  $\mathbf{E}$  — матрица, элементы которой — единицы. Матрицы  $L_{n,k}, S_{n,k}$  и  $\mathbf{E}$  имеют одинаковые размеры, равные  $N_q \times N_{Tx}$ . Такая структура матриц распределяет все элементы кодового слова, соответствующие определенному слою, так, что в их передаче будут задействованы все антенны, все частотные подканалы и все послылки. На рис. 3 дан пример матрицы слоев  $\mathbf{L}$ , матрицы смещений  $\mathbf{S}$  и определяемой ими матрицы слоевых пар  $\mathbf{M}$ .

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 4 & 4 & 3 & 3 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 4 & 4 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 2 & 2 & 1 & 1 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 3 & 3 & 2 & 2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} (1,1) & (2,1) & (2,4) & (1,4) & (1,3) & (2,3) & (2,2) & (1,2) \\ (2,2) & (1,2) & (1,1) & (2,1) & (2,4) & (1,4) & (1,3) & (2,3) \\ (1,3) & (2,3) & (2,2) & (1,2) & (1,1) & (2,1) & (2,4) & (1,4) \\ (2,4) & (1,4) & (1,3) & (2,3) & (2,2) & (1,2) & (1,1) & (2,1) \end{pmatrix}$$

■ Рис. 3. Матрица слоев, матрица смещений и матрица слоевых пар для случая, когда  $N_c = 4, N_{Tx} = 2, N_b = 1, N_q = 2, N_L = 2, J = 1$

### Позиционирующие функции

Определим функциональные зависимости, позволяющие задавать элементы матриц слоев и смещений. А именно, для каждой из матриц представим функции, которые задают значения элементов соответствующих матриц. По значениям этой пары функций можно строить матрицу слоев и смещений, а значит, и матрицу слоев пар.

Матрица слоев состоит из подматриц матрицы  $\mathbf{K}$ , поэтому вначале определим функцию, позволяющую задавать значение элемента этой матрицы по его позиции в этой матрице. Итак, элемент матрицы  $\mathbf{K}$ , расположенный на  $m$ -й строке и в  $k$ -м столбце ( $m = 1, 2, \dots, N_q; k = 1, 2, \dots, N_q$ ), равен значению функции

$$f(m, k; N_q) \triangleq (k - m + \text{goe}(k, m)) \bmod (N_q + 1). \quad (5)$$

Используя функцию (5), можно получить функцию, задающую элемент матрицы  $\mathbf{L}_{n, k}$ , расположенный на  $m$ -й строке и в  $k$ -м столбце ( $m = 1, 2, \dots, N_q; k = 1, 2, \dots, N_{\text{Tx}}$ ):

$$\mu(m, k; N_q, N_{\text{Tx}}) \triangleq f((m-1) \bmod (N_q) + 1, (k-1) \bmod (N_{\text{Tx}}) + 1; N_q). \quad (6)$$

Теперь с помощью функции  $\mu(m, k; N_q, N_{\text{Tx}})$  можно построить матрицы  $\mathbf{L}_{n, k}$ . А для построения матриц  $\mathbf{P}^j$  можно воспользоваться функцией

$$\sigma(m, k, j; N_q, N_L) \triangleq e_{(m-1) \bmod N_q N_L + 1, \eta((j-1) \bmod N_q N_L + 1, (k-1) \bmod N_q N_L + 1; N_q, N_L)}, \quad (7)$$

где  $e_{a, b}$  — элемент единичной матрицы, расположенный на  $a$ -й строке и в  $b$ -м столбце, а  $\eta$  — функция, определенная равенством (4).

Если рассматривать матрицу  $\mathbf{L}$  не как блочную, а как матрицу из целых положительных чисел, то элемент этой матрицы, расположенный на  $m$ -й строке и в  $k$ -м столбце ( $m = 1, 2, \dots, N_c; k = 1, 2, \dots, N_{\text{Tx}} N_B$ ), равен значению функции

$$\begin{aligned} \xi(m, k; N_q, N_{\text{Tx}}, N_L, N_b, J) \triangleq & \sum_{i=1}^{N_q N_L} \left( \sigma \left( m, i, \left[ \frac{k-1}{N_{\text{Tx}} N_b} \right] + 1; N_q, N_L \right) \times \right. \\ & \left. \times \left( \mu(i, k; N_q, N_{\text{Tx}}) + N_q \cdot \left[ \left[ \frac{m-1}{N_q N_L} \right] + \left[ \frac{k-1}{N_q N_{\text{Tx}} N_b N_L} \right] \right] \bmod (J) \right) \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\sigma$  — функция, определенная равенством (7);  $\mu$  — функция, определенная равенством (6). Значение функции  $\xi$  равно элементу матрицы слоев  $\mathbf{L}$ , расположенному на позиции  $(m, k)$ .

Теперь, когда мы знаем функцию  $\xi$ , задающую элементы матрицы слоев, определим функцию, задающую элементы матрицы смещений. Но прежде чем сделать это, укажем правило получения значения каждого элемента матрицы  $\mathbf{S}_{n, k}$ . Значение каждого элемента напрямую связано со значениями элементов матрицы  $\mathbf{L}_{n, k}$ . Каждое значение элемента матрицы  $\mathbf{S}_{n, k}$  получается в результате комплекса следующих действий. Во-первых, будем «двигаться» по матрице  $\mathbf{L}_{n, k}$  слева—направо—сверху—вниз. Во-вторых, при таком движении по матрице  $\mathbf{L}_{n, k}$  будем подсчитывать, сколько раз встречается то или иное число до и включая достигнутую позицию, причем каждое новое число — с помощью отдельного счетчика. Таким образом, если выполняются эти два действия, то, достигнув некоторой позиции, значение счетчика, соответствующего числу, расположенному на этой позиции в матрице  $\mathbf{L}_{n, k}$ , будет равно значению элемента, расположенного на этой позиции, но в матрице  $\mathbf{S}_{n, k}$ . Значит, чтобы определить функцию, задающую элементы матрицы  $\mathbf{S}_{n, k}$ , необходимо указать функцию, значения которой совпадают со значениями, полученными в результате выполнения этих двух действий. Искомой является функция

$$\begin{aligned} c(m, k; N_q, N_{\text{Tx}}) \triangleq & \text{goe}(N_{\text{Tx}}, k) \left( \text{goe}(k, \mu(m, k; N_q, N_{\text{Tx}})) \left( k - \mu(m, k; N_q, N_{\text{Tx}}) + 1 \right) + \right. \\ & \left. + \left( 1 - \text{goe}(k, \mu(m, k; N_q, N_{\text{Tx}})) \right) \left( k + \text{goe}(N_{\text{Tx}}, \mu(m, k; N_q, N_{\text{Tx}})) \left( N_{\text{Tx}} - \mu(m, k; N_q, N_{\text{Tx}}) + 1 \right) \right) \right). \end{aligned}$$

Наконец, если рассматривать матрицу  $\mathbf{S}$  не как блочную, а как матрицу из целых чисел, то число, расположенное на  $m$ -й строке и в  $k$ -м столбце ( $m = 1, 2, \dots, N_c; k = 1, 2, \dots, N_{\text{Tx}} N_B$ ), равно значению функции

$$\zeta(m, k; N_q, N_{Tx}, N_L, N_b) \triangleq \sum_{i=1}^{N_q N_L} \left( \sigma \left( m, i \left\lfloor \frac{k-1}{N_{Tx} N_b} \right\rfloor + 1; N_q, N_L \right) \left( c((i-1) \bmod(N_q) + 1, (k-1) \bmod(N_{Tx}) + 1; N_q, N_{Tx}) + w \left( \left\lfloor \frac{i-1}{N_q} \right\rfloor \bmod(N_L) + 1, \left\lfloor \frac{k-1}{N_{Tx}} \right\rfloor \bmod(N_b) + 1; N_{Tx}, N_L \right) \right) \right). \quad (9)$$

Теперь нам известны функциональные зависимости, позволяющие строить матрицы слоев и смещений. Элементы этих матриц являются связующим звеном между элементами кодового слова и позиционными тройками, так как обе эти матрицы определяют матрицу слоев пар.

Из равенств (1) и (2), а также функций (8) и (9) получается, что соответствие между слоевыми парами и позиционными тройками — это

$$\left( \xi(m, k; N_q, N_{Tx}, N_L, N_b, J), \zeta(m, k; N_q, N_{Tx}, N_L, N_b) \right) \leftrightarrow \left( m, k - \left\lfloor \frac{k-1}{N_{Tx}} \right\rfloor N_{Tx}, \left\lfloor \frac{k-1}{N_{Tx}} \right\rfloor + 1 \right). \quad (10)$$

### Элементы слоённого ПЧВ кодового слова

Определяя процесс ПЧВ-кодирования, необходимо указать и способ получения элементов конструируемых кодовых слов, и правило соответствия между элементами кодового слова и позиционными тройками. Однако в случае с ПЧВ-кодированием, основанным на принципе слоения, правило соответствия разделено на два правила: первое определяет соответствие между элементами кодового слова и слоевыми парами, второе — между слоевыми парами и позиционными тройками. Так как соответствие (10) определяет правило, связывающее слоевые пары и позиционные тройки, то осталось показать, как получить элементы кодового слова и связать элементы кодового слова и слоевые пары.

Вначале опишем алгоритм получения элементов слоённого блокового ПЧВ кодового слова. Для получения всех элементов кодового слова требуется  $N_b N_{Tx} \equiv J N_q N_\gamma$  информационных символов  $s_j \in \mathbb{A} \subset \mathbb{Z} [j]$ ,  $j = 1, 2, \dots, J N_q N_\gamma$ , представляющих собой гауссовы целые числа. Сформируем из этих символов информационный вектор

$$\mathbf{s} \triangleq (s_1 \ s_2 \ \dots \ s_{J N_q N_\gamma})^T.$$

Для удобства описания алгоритма определим еще два вектора:

$$\mathbf{s}_{i,k} \triangleq \left( s_{((i-1)N_q + (k-1)N_\gamma + 1)} \ s_{((i-1)N_q + (k-1)N_\gamma + 2)} \ \dots \ s_{((i-1)N_q + k)N_\gamma} \right)^T \quad (11)$$

и

$$\mathbf{s}_i \triangleq \left( (\mathbf{s}_{i,1})^T \ (\mathbf{s}_{i,2})^T \ \dots \ (\mathbf{s}_{i,N_q})^T \right)^T, \quad (12)$$

где  $i = 1, 2, \dots, J$  и  $k = 1, 2, \dots, N_q$ . Видно, что длины векторов  $\mathbf{s}_{i,k}$  и  $\mathbf{s}_i$  равны  $N_\gamma$  и  $N_q N_\gamma$  соответственно. Теперь информационный вектор можно записать в виде

$$\mathbf{s} = \left( (\mathbf{s}_1)^T \ (\mathbf{s}_2)^T \ \dots \ (\mathbf{s}_J)^T \right)^T. \quad (13)$$

Для того чтобы получить вектор из всех элементов кодового слова, умножим информационный вектор  $\mathbf{s}$  на блочно-диагональную матрицу

$$\mathbf{M} \triangleq \begin{pmatrix} \mathbf{M}_1 & & & \\ & \mathbf{M}_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{M}_J \end{pmatrix}, \quad \text{где } \mathbf{M}_i \triangleq \begin{pmatrix} \Theta_1 & & & \\ & \Theta_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \Theta_{N_q} \end{pmatrix},$$

а  $\Theta_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, N_q$  — комплексные квадратные матрицы размером  $N_\gamma \times N_\gamma$  (определение матриц  $\Theta_k$  будет дано ниже). Получаемый в результате такого произведения кодовый вектор ПЧВ кодового слова

$$\mathbf{x} \triangleq \mathbf{M} \mathbf{s} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{J N_q N_\gamma})^T, \quad (14)$$

где  $x_i \in \mathbb{C}$ ,  $i = 1, 2, \dots, J N_q N_\gamma$ .

Матрица  $\Theta_k$  получается путем вырезания первых  $N_\gamma$  строк и столбцов из матрицы

$$\Psi_k \triangleq \frac{1}{\sqrt{N_\gamma}} \mathbf{F}_{M \times M}^H \text{diag}(1 \ \varphi \ \dots \ \varphi^{M-1}) \varphi^{k-1},$$

где  $\mathbf{F}_{M \times M}$  — матрица прямого дискретного преобразования Фурье, без нормирующего коэффициента, размером  $M \times M$  при  $M = 2^{\lceil \log_2(N_\gamma) \rceil}$ ;  $\varphi = e^{j2\pi/M}$ ;  $\phi = \theta^{1/N_q}$ , а  $\theta$  — либо трансцендентное число над полем  $\mathbb{K}$ , либо алгебраический элемент порядка как минимум  $N_L N_q N_b$  над полем  $\mathbb{K}$ . Поле  $\mathbb{K}$  является расширением поля  $\mathbb{Q}$ , содержит все элементы матрицы  $\mathbf{F}_{M \times M}^H \text{diag}(1 \ \varphi \ \dots \ \varphi^{M-1})$ , информационный алфавит  $\mathcal{A} \subset \mathbb{Z}[j]$ , и величины  $e^{-j2\pi\tau_l/T_s}$ , где  $\tau_l$  — задержка  $l$ -го луча ( $l = 1, 2, \dots, L$ ), а  $T_s$  — время передачи сигнала. Особенностью матрицы  $\Theta_k$  является то, что разность векторов, полученных в результате умножения на нее неодинаковых векторов из гауссовых целых чисел, не имеет нулевых компонент [2].

Чтобы построить поле  $\mathbb{K}$ , можно выполнить следующие действия [5, 6].

1. Получить поле, содержащее информационный алфавит  $\mathcal{A}$ . Для этого можно расширить поле  $\mathbb{Q}$  четвертым корнем из единицы, т. е. числом  $w_4 = \exp(j2\pi/4)$ . В результате получим поле  $\mathbb{Q}(w_4)$ , содержащее информационный алфавит  $\mathcal{A}$ .

2. Чтобы получить поле, содержащее кроме  $\mathcal{A}$  еще и все элементы матрицы  $\mathbf{F}_{M \times M}^H \text{diag}(1 \ \varphi \ \dots \ \varphi^{M-1})$ , достаточно расширить поле  $\mathbb{Q}(w_4)$  корнем полинома  $x^M - w_4$ . В результате получим поле  $\mathbb{Q}(w_{4M})$ , содержащее все элементы матрицы  $\mathbf{F}_{M \times M}^H \text{diag}(1 \ \varphi \ \dots \ \varphi^{M-1})$ . Теперь, если  $\tau_l/T_s = r_l/s_l \in \mathbb{Q}$  и  $\text{gcd}(r_l, s_l) = 1$  для всех  $l = 1, 2, \dots, L$ , то пусть  $n$  будет наибольшим общим кратным целых  $\{s_1, s_2, \dots, s_L, 4M\}$ . Искомое поле  $\mathbb{K} = \mathbb{Q}(w_n)$  будет содержать и  $\mathbb{Q}(w_{4M})$ , и все  $e^{-j2\pi\tau_l/T_s}$ .

Чтобы получить величину  $\theta$ , достаточно найти корни полинома  $x^p - w_n$  при условии, что  $p \geq N_L N_q N_b$ , тогда можно использовать один из корней этого полинома в качестве  $\theta$ .

По аналогии с равенствами (11)–(13) таким же образом определим и части кодового вектора  $\mathbf{x}$ :

$$\mathbf{x}_{i,k} \triangleq \Theta_k \mathbf{s}_i, k = \left( x_{((i-1)N_q + (k-1)N_\gamma + 1)} \quad x_{((i-1)N_q + (k-1)N_\gamma + 2)} \quad \dots \quad x_{((i-1)N_q + k)N_\gamma} \right)^T$$

и

$$\mathbf{x}_i \triangleq \mathbf{M}_i \mathbf{s}_i = \left( \left( \mathbf{x}_{i,1} \right)^T \quad \left( \mathbf{x}_{i,2} \right)^T \quad \dots \quad \left( \mathbf{x}_{i,N_q} \right)^T \right)^T,$$

где  $i = 1, 2, \dots, J$  и  $k = 1, 2, \dots, N_q$ . Теперь кодовый вектор можно представить как

$$\mathbf{x} = \left( \left( \mathbf{x}_1 \right)^T \quad \left( \mathbf{x}_2 \right)^T \quad \dots \quad \left( \mathbf{x}_J \right)^T \right)^T.$$

Обычно в качестве слоев выбирают такие подмножества множества из всех элементов кодового слова, которые получаются независимо от элементов других подмножеств. В данном случае такие подмножества образуют векторы из множества  $\{\mathbf{x}_{i,k}\}$ . Поэтому правило соответствия между элементом  $x_{((i-1)N_q + (k-1)N_\gamma + j)}$  и слоевой парой — это соответствие вида

$$\begin{aligned} & \left( \xi(m, k; N_q, N_{Tx}, N_L, N_b, J) - 1 \right) N_L N_{Tx} N_b + \zeta(m, k; N_q, N_{Tx}, N_L, N_b) \leftrightarrow \\ & \left( \xi(m, k; N_q, N_{Tx}, N_L, N_b, J), \zeta(m, k; N_q, N_{Tx}, N_L, N_b) \right). \end{aligned} \quad (15)$$

### Слоённое ПЧВ-кодирование

Теперь заданы все элементы кодового слова, а также два правила соответствия. Элементы кодового слова составляют вектор  $\mathbf{x}$ . Правило соответствия между слоевыми парами и позиционными тройками — это правило (10), а правило соответствия между слоевыми парами и элементами кодового слова — правило (15). Таким образом, мы задали определенное слоённое ПЧВ-кодирование.

*Алгоритм определения элемента слоённого кодового слова для заданной позиционной тройки.*

1. Задать параметры ММО-системы:  $N_c = JN_q N_L, N_{Tx}, N_b = JN_q N_L N_b$ ; определить по равенству (14) кодовый вектор  $\mathbf{x}$ .

2. Задать позиционную тройку  $a \equiv (\text{channel}, \text{Tx\_antenna}, \text{burst})$ .

3. Используя позиционную тройку  $a$  и равенства (1) и (2), определить пару  $(m, k)$ .

4. Используя правило (10), определить слоевую пару  $b \equiv (\xi(m, k; N_q, N_{Tx}, N_L, N_b, J), \zeta(m, k; N_q, N_{Tx}, N_L, N_b))$ .

5. Используя слоевую пару  $b$  и вектор  $x$ , по правилу (15) определить элемент кодового слова  $x(\xi(m, k; N_q, N_{Tx}, N_L, N_b, J) - 1)N_L N_{Tx} N_b + \zeta(m, k; N_q, N_{Tx}, N_L, N_b)$ .

### Заключение

Разработан алгебраический слоённый ПЧВ-код, в котором элементы каждого слоя передают-

ся по всем частотным подканалам, по всем антеннам и посылкам. Представлены функциональные зависимости между позициями в матрице слоевых пар и самими слоевыми парами. Указано правило соответствия между элементами кодового слова и слоевыми парами, а также между слоевыми парами и позиционными тройками. Представлен алгоритм определения элемента кодового слова для заданной позиционной тройки.

### Литература

1. El Gamal H., Damen M. O. Universal Space-Time Coding // IEEE Transactions on Information Theory. 2003. Vol. 49. N 5. P. 1097–1119.
2. Zhang W., Xia X.-G., Ching P. C. High-Rate Full-Diversity Space-Time-Frequency Codes for Broadband MIMO Block-Fading Channels // IEEE Transactions on Communications. 2007. Vol. 55. N 1. P. 25–34.
3. Гофман М. В. Построение кодовых слов пространственно-частотно-временных кодов // Программные продукты и системы. 2010. № 3. С. 149–151.
4. Гофман М. В. Метод построения алгебраических пространственно-частотно-временных кодов // Изв. Петербургского университета путей сообщения. 2010. № 4. С. 88–98.
5. Xiaoli Ma., Giannakis G. B. Full-Diversity Full-Rate Complex-Field Space-Time Coding // IEEE Transactions on Signal Processing. 2003. Vol. 51. N 11. P. 2917–2930.
6. Kiran T., Rajan B. S. A systematic design of high-rate full-diversity space-frequency codes for MIMO-OFDM systems // ISIT 2005. 4–9 Sept. 2005. P. 2075–2079.

### ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

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

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

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

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несет рекламодатель.*

УДК 681.883:629

## АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

**Е. В. Захарова,**

аспирант

**П. Н. Петров,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Систематизированно изложены с единых методических позиций вопросы пространственной обработки сигналов антенных решеток малоизвестным классом акустоэлектронных устройств с переизлучающей решеткой. Отмечена перспективность, с точки зрения технологичности производства, аналоговых процессоров на поверхностных акустических волнах, использующих анизотропные подложки, которые в то же время являются малоэлементными. Описаны структурные схемы акустоэлектронных устройств, служащие в качестве диаграммообразующих схем для многоэлементных антенных решеток.

**Ключевые слова** — аналоговые процессоры, поверхностные акустические волны, пространственная обработка, многоэлементные антенные решетки, диаграммообразующие схемы.

### Введение

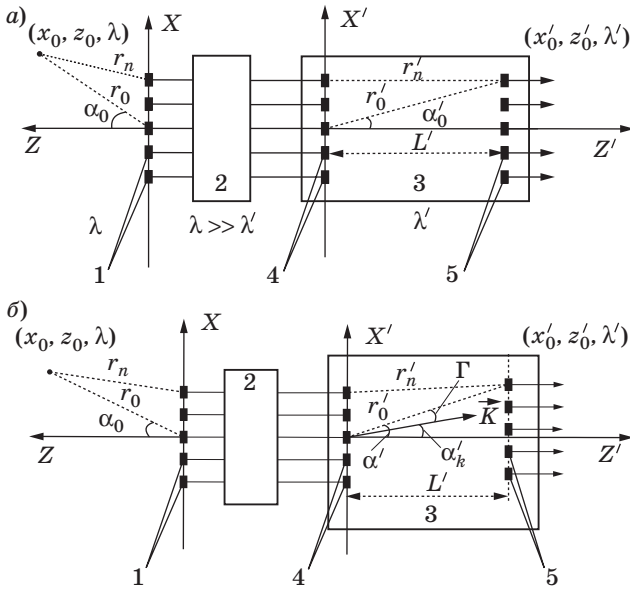
В научно-технической литературе представлены основные теоретические результаты, подтверждающие принципы построения устройств с масштабными переизлучающими решетками (МПР), топологию и характеристики акустических процессоров, возможные области их применения [1, 2].

Конкурентоспособность любых устройств, в том числе акустических процессоров, по сравнению с аналогами может поддерживаться на высоком уровне только при достижении потенциальных параметров. И если повышение рабочего диапазона частот (или уменьшение длин волн  $\lambda$ ) зависит прежде всего от развития технологии, то другие параметры, такие как полоса пропускания  $2\Delta f$ , максимально возможное для обработки акустическими процессорами число элементов антенных решеток (АР)  $N_0 = 2N + 1$  или их апертуры  $D = N_0 d$  (где  $d$  — расстояние между элементами АР), способность пространственного разрешения в ближней и дальней зоне антенны, чаще всего определяются топологическими и конструкторскими решениями. Данный подход является приоритетным в современных исследованиях в области прикладной акустоэлектроники.

Как известно, оптимизация пространственно-временной обработки сводится к алгоритмам линейной фильтрации, являющимся частью общего алгоритма обнаружения, измерения, классификации и обработки изображений, включающего и нелинейные операции. Излучающую антенну, среду распространения электромагнитных (или акустических) волн, приемную АР и устройство с МПР можно представить как совокупность последовательно включенных линейных фильтров, осуществляющих ряд операций над сформированным излучающей антенной пространственно-временным сигналом. В статье [3] показана обобщенная функциональная схема информационно-измерительного канала активной (наиболее полной) локационной системы с устройством МПР, осуществляющим пространственно-временную обработку сигналов АР.

Для обеспечения информационной пропускной способности канала или количественного измерения информационной емкости сигнала используется величина  $E = \lg N_n$ , где  $N_n$  — число независимых информационных (временных, пространственных, поляризационных) степеней свободы сигнала. Без учета поляризационных степеней свободы сигнала для линейной АР [4]





■ **Рис. 1.** Устройство МПР (а) и аналоговый процессор на анизотропной подложке (б): 1 — элементы линейной АР; 2 — многоканальный преобразователь частоты; 3 — подложка акустического процессора; 4 — элементы переизлучающей решетки; 5 — элементы считывающей решетки

$$N_n = \frac{4\Delta f \tau \cdot 2D^2}{\lambda z}, \quad (1)$$

где  $\tau$  — временная продолжительность сигнала;  $z$  — проекция расстояния до источника  $(x_0, z_0, \lambda)$  сигнала на ось  $Z$  (рис. 1, а).

Из выражения (1) следует, что величина  $N_n$  зависит от апертуры  $D$  антенны, т. е. от числа элементов эквидистантной линейной АР, следовательно, и от числа элементов переизлучающей решетки акустического процессора. Однако при реализации акустоэлектронных устройств возникает ряд проблем практического характера, препятствующих достижению расчетных и предельных параметров данных устройств. Поэтому рассмотрим технологические и топологические возможности изготовления акустических процессоров, позволяющих, с одной стороны, наиболее полно реализовать их выявленные потенциальные возможности, а с другой стороны, предложить конструкторские решения, способствующие увеличению числа элементов линейной АР.

### Число каналов в аналоговых процессорах

Попытаться обосновать ограничения количества каналов в аналоговых процессорах можно с различных точек зрения.

В работах [1, 5, 6] определялось максимальное число элементов переизлучающей решетки в зависимости от размеров подложки, ее типа, т. е.

электромеханической константы, полосы, величины рабочих частот, технологических возможностей литографии. При этом считали минимальную апертуру преобразователя  $d_k = \lambda$ , задавались величиной омической составляющей проводимости преобразователей и фиксировали размеры подложки. Если воспользоваться результатами этих работ, то можно установить, что число преобразователей колеблется от 20 до 40 для пьезокварца, а также от 15 до 30 для германата висмута и ниобата лития.

Возможен также «топологический» подход к данной проблеме. Универсальной характеристикой, определяющей основные показатели устройства обработки, в частности пространственные, является пространственная импульсная характеристика (ПИХ)  $H(\mathbf{r}, \alpha, \beta, \alpha', \beta')$ , где  $\alpha$  ( $\alpha'$ ) и  $\beta$  ( $\beta'$ ) — углы места и азимута в пространстве объектов и в пространстве изображений (в среде обработки аналогового процессора). ПИХ является откликом на монохроматический  $\delta$ -источник и определяется с точностью до несущественного множителя как [3]

$$H(k, \alpha_0, \beta_0, \alpha'_0, \beta'_0) = C \int_{\mathbf{r}} P(k, \mathbf{r}) V(k, \alpha_0, \beta_0, \mathbf{r}) W(k, \alpha'_0, \beta'_0, \mathbf{r}) d\mathbf{r},$$

где  $P(k, \mathbf{r})$  — функция раскрытия;  $V(k, \alpha, \beta, \mathbf{r})$  — функция, определяющая распределение комплексных амплитуд принимаемых сигналов;  $W(k, \alpha', \beta', \mathbf{r})$  — опорная функция акустоэлектронного устройства;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор точки на раскрытии АР.

В приближении дальней зоны ПИХ устройств МПР равна

$$h(k, \alpha, \beta, \alpha_0, \beta_0) = \iint_{(x,y) \in Z} P(k, x, y) \times W(k, x, y, \alpha_0, \beta_0) \times \exp[-jk \times (x \sin \alpha \cos \beta + y \sin \beta + z \cos \alpha \cos \beta)] dx dy. \quad (2)$$

Выражение (2), нормированное к значению  $h(k, \alpha = \alpha_0, \beta = \beta_0)$ , служит характеристикой направленности антенны.

Опорная функция устройства МПР обработки сигналов линейной АР описывается приближенно (в системе координат рис. 1) выражением [1]

$$W(x') \cong \exp[-jk'(x' \sin \alpha' + L' \cos \alpha')],$$

где  $L'$  — расстояние между переизлучающей и считывающей решетками;  $k' = 2\pi/\lambda'$ ,  $\lambda'$  — длина волны в аналоговом процессоре. Там же показано, что погрешность такого представления не превосходит  $|\Delta\phi|$  радиан при выполнении условия

$$L' \geq \left[ \frac{\pi (D')^4}{|\Delta\phi| 64\lambda'} \sin \alpha' \operatorname{tg} \alpha' \right]^{1/3}.$$

Из этого условия ясно, что при любом числе элементов переизлучающей решетки выбором соответствующего расстояния  $L'$  до считывающей решетки можно обеспечить заданное  $|\Delta\varphi|$ . Таким образом, все опять свелось к подложкам, обладающим необходимыми размерами.

По-видимому, можно сказать, что жестких принципиальных ограничений на число каналов аналоговых процессоров нет, и если не вводить каких-либо дополнительных условий, все сводится, в конечном итоге, к волновым размерам подложки. Нами был разработан процессор на изотропной подложке из плавленного кварца на рабочей частоте 7 МГц, с числом элементов переизлучающей решетки 239, считывающей — 170.

Если габариты монолитных процессоров по каким-либо причинам являются неприемлемыми, возможны различные компромиссные варианты построения данного типа акустоэлектронных устройств.

### Варианты построения акустоэлектронных устройств МПР для многоэлементных линейных АР

Перепишем, с учетом дискретности решеток, выражение (2), описывающее ПИХ устройств обработки сигналов эквидистантных линейных АР:

$$h_T(\alpha_0, \alpha') = C \sum_{n=-N}^N P(nd) \exp\{-jknd(\sin\alpha_0 - \mu^{-1}\sin\alpha')\}, \quad (3)$$

где  $x = nd$ ,  $x' = nd'$ , а  $d$  и  $d'$  — расстояния между элементами линейной АР и переизлучающей решетки;  $\mu = \sin\alpha'_0 / \sin\alpha_0$  — коэффициент углового масштаба.

При  $P(x) = \text{const}$  выражение (3) может быть записано в замкнутом виде с использованием формулы суммы для  $2N + 1$  членов геометрической прогрессии с точностью до несущественных постоянных множителей как

$$h_T(\alpha_0, \alpha') = C_1 \exp[j(k'r'_0 - kr_0)] \times \frac{\sin[(N + 0,5)(kd\sin\alpha_0 - k'd'\sin\alpha')]}{\sin[0,5(kd\sin\alpha_0 - k'd'\sin\alpha')]}, \quad (4)$$

где  $C_1$  — коэффициенты пропорциональности, а нормированный модуль

$$H_T(\alpha_0, \alpha') = \left| \frac{\sin[(N + 0,5)(kd\sin\alpha_0 - k'd'\sin\alpha')]}{(N + 0,5)\sin[0,5(kd\sin\alpha_0 - k'd'\sin\alpha')]} \right|. \quad (5)$$

Пространственные импульсные характеристики описываются хорошо известной функцией

вида  $\sin N_0 t_p / N_0 \text{sint}_p$ , носящей периодический характер. При  $t_p = \pi m$ , где  $m$  — любое целое число, функция  $H_T(\alpha_0, \alpha')$  равна единице. При  $t_p = \pi s / N_0$ , где  $s$  — любое целое число, эта функция равна нулю, кроме случаев, когда  $s = mN_0$ . Выбрав направление главных максимумов (парциальных диаграмм направленности (ДН)) совпадающим с нулями соседних парциальных диаграмм, т. е. размещая элементы считывающей решетки согласно критерию Релея и учитывая выражение (3), можно записать

$$H(m) = \sum_{n=0}^{N_0-1} x^0(nd) W_{N_0}^{mn}, \quad (6)$$

где  $m = 0, \dots, N_0 - 1$  — номер элементов считывающей решетки выходных процессоров;  $x^0(nd) = P(nd) \exp(jknd \sin\alpha_0)$ ;  $n$  — номер элементов АР,  $n = 0, \dots, N_0 - 1$ ;

$$W_{N_0}^{mn} = \exp\left\{-j \frac{2\pi mn}{N_0}\right\}.$$

Выражение (6), в котором  $x^0(nd)$  есть последовательность из  $N_0$  пространственных отсчетов с периодом  $d$ , а  $H(m)$  — последовательность из  $N_0$  частотных отсчетов, является дискретным преобразованием Фурье (ДПФ). Акустический процессор, построенный таким образом, является диаграммообразующей схемой (ДОС), выполняющей ДПФ.

Наиболее технологичными в настоящее время являются аналоговые процессоры на поверхностных акустических волнах (ПАВ), использующие анизотропные подложки небольших волновых размеров. Вид функции  $H_T(\alpha_0, \alpha')$  сохраняется, если осуществить замену [6]  $t_p = (kd \sin\alpha_0 - k'd' \sin\alpha')$  на  $t_A = [kd \sin\alpha_0 - k'(\alpha_k)d' \sin(\alpha' - \Gamma)]$ , где  $\Gamma$  — угол между направлениями фазовой и групповой скоростей;  $\alpha_k$  — угол, определяющий направление распространения волны относительно кристаллографических осей для данного среза кристалла (рис. 1, б).

Если из-за габаритов подложки аналоговый процессор, непосредственно вычисляющий (6), создать затруднительно, то можно воспользоваться акустоэлектронным устройством, построенным по алгоритму быстрого преобразования Фурье (БПФ) для произвольного составного  $N_0$  [7]. В этом случае вычисление  $N_0$ -точечного ДПФ можно свести к определению  $N_1 N_2$ -точечных и  $N_2 N_1$ -точечных ДПФ и  $N_0$  умножениям на множители поворота  $W_{N_0}$ . Сделав подстановку

$$m = m_1 + m_2 N_2, \quad n = n_1 + n_2 N_1,$$

где  $N_0 = N_1 N_2$ ;  $n_1, m_2 = 0, \dots, N_1 - 1$ ;  $n_2, m_1 = 0, \dots, N_2 - 1$ , преобразуем (6) к виду

$$\begin{aligned}
 H(m_1 + m_2 N_2) = & \\
 = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} & \left[ \sum_{n_2=0}^{N_2-1} x^0[(n_1 + n_2 N_1)d] W_{N_2}^{m_1 n_2} \right] W_{N_2}^{m_1 n_1} \times \\
 & \times W_{N_1}^{m_2 n_1}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Используя алгоритм (7), можно получить алгоритмы БПФ с любыми основаниями, т. е. применить аналоговые процессоры с любым числом элементов решеток. Так, на рис. 2 представлен 25-точечный граф, состоящий из десяти 5-точечных ДПФ ( $N_1 = 5, N_2 = 5$ ). На нескольких малоэлементных аналоговых процессорах можно реализовать ДОС для АР, имеющих несколько сотен приемных элементов.

Еще одним способом обработки сигналов многоэлементных АР процессорами с ограниченным числом элементов является группирование элементов антенны в подрешетки [8, 9]. На рис. 3 показана одна из возможных схем такого группирования, где 1 — элементы АР; 2 — аналоговые процессоры — ДОС; 3 — коммутаторы каналов; 4 — аналоговый процессор с веерными считывающими преобразователями [1], рассчитанный на работу с АР, элементами которой являются подрешетки. В этом случае функцией приемных элементов АР с управляемой ПИХ выполняют аналоговые процессоры (ДОС) в совокупности с коммутатором каналов. При этом эффективность формирования суммарной ПИХ достигается синхронным смещением ПИХ одиночного приемного элемента (подрешетки) и множителя всей решетки.

Используя теорему умножения и учитывая выражение (4), пространственную импульсную характеристику данного устройства МПР запишем как

$$\begin{aligned}
 h_N(\alpha_0, \alpha') = & h_T(\alpha_0, \alpha') \times \\
 & \times \frac{\sin[M(kd_M \sin \alpha_0 - k'd'_M \sin \alpha')]}{\sin[(kd_M \sin \alpha_0 - k'd'_M \sin \alpha')]},
 \end{aligned}$$

где  $M$  — количество подрешеток;  $d_M$  — расстояние между центрами подрешеток;  $d'_M$  — расстояние между элементами переизлучающей решетки аналогового процессора с коммутируемыми входами.

Был рассчитан и изготовлен аналоговый процессор на ПАВ, использующий анизотропную подложку из ниобата лития YZ-среза на рабочей частоте 18,45 МГц с полосой 3,8 МГц, числом элементов переизлучающей решетки 15 и с развязкой между элементами 34 дБ. Он размещен в корпусе микросборки, габариты которого  $40 \times 20 \times 2$  мм. Данный процессор может служить в качестве базового элемента для устройств, изображенных на рис. 2 и 3.

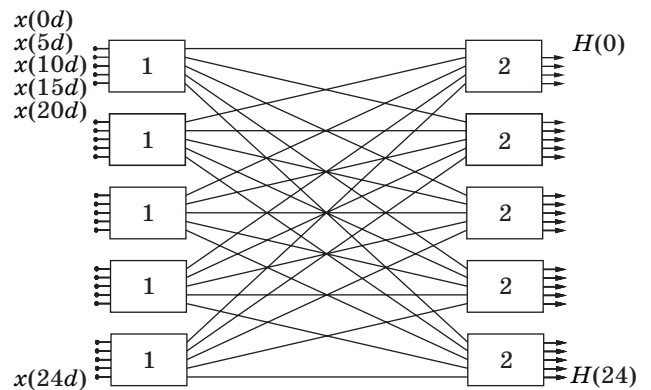


Рис. 2. Структурная схема устройства пространственного БПФ

Предложенные варианты построения устройств МПР либо осуществляют сканирование одной или несколькими ДН, либо формируют веерообразную приемную ДН. Кроме того, акустические процессоры, обладая свойствами обратимости, могут как обрабатывать принимаемые сигналы АР, так и формировать ДН на излучение. В этом случае сигнал подается на элементы считывающей решетки, а на переизлучающей ре-

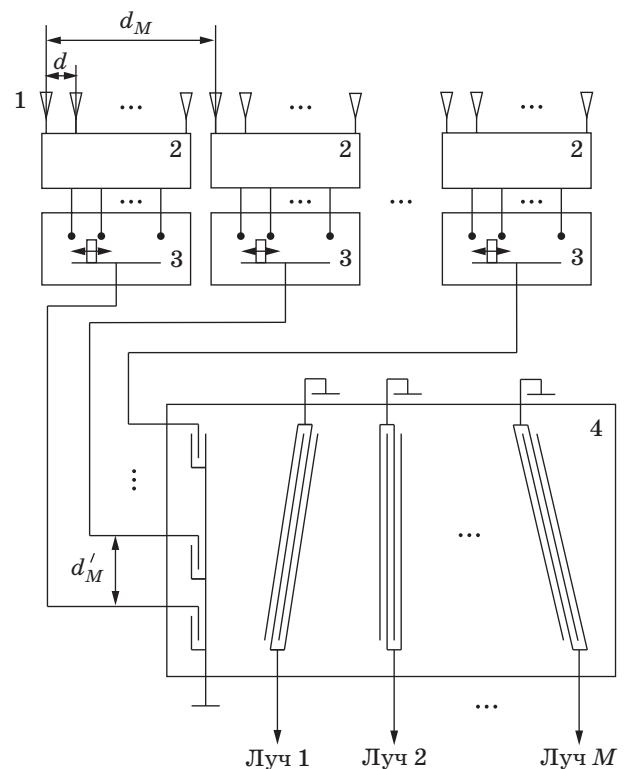


Рис. 3. Комбинированный способ построения устройств МПР: 1 — элементы АР; 2 — аналоговые процессоры — ДОС; 3 — коммутаторы каналов; 4 — аналоговый процессор на ПАВ

шетке и, следовательно, на элементах АР формируется амплитудно-фазовое распределение, позволяющее излучать сигналы под определенным углом  $\alpha$  к оси АР.

### Заключение

Современные аналоговые ДОС на промежуточной частоте, к которым относятся ДОС на ПАВ, сохраняя достоинства аналоговых устройств, могут конкурировать с другими, в том числе и с цифровыми, устройствами по массогабаритным параметрам, простоте изготовления, надежности, стоимости и другим технико-эксплуатационным характеристикам.

Наиболее перспективными с точки зрения технологичности производства являются аналоговые процессоры на ПАВ, использующие анизотропные подложки. Однако на них можно реализовать ДОС с заданными параметрами только для антенн, имеющих от 10 до 30 приемных элементов.

Предложенные два варианта группирования элементов в подрешетки позволяют создавать ДОС (на базе малоканальных аналоговых процессоров различных видов) для одномерных АР, содержащих до нескольких сотен приемных элементов. Комбинированный способ построения акустоэлектронных ДОС позволяет существенно увеличить информационную пропускную способность радиоканалов с антенными решетками.

### Литература

1. **Рогачев В. И., Петров П. Н., Кравец В. С., Кулаков С. В.** Акустоэлектронные устройства обработки гидроакустических сигналов. — СПб.: Судостроение, 1993. — 184 с.
2. **Petrov P. N., Kulakov S. V., Molotok V. V.** Recent advance in acoustoelectronic and acoustooptic phase antenna array signal processing // *The J. of Polish Acoustic Society*. 2002. Vol. 21. P. 147–160.
3. **Петров П. Н., Сенин А. В.** Пространственно-временная обработка сигналов акустоэлектронными устройствами с масштабными переизлучающими решетками // *Информационно-управляющие системы*. 2006. № 3(22). С. 5–11.
4. **Качанов Е. И., Пигулевский Е. Д., Яричин Е. М.** Методы и средства гидроакустической голографии. — Л.: Судостроение, 1989. — 256 с.
5. **Гуревич Г. Л., Жиженкова Л. Н., Пасхин В. М., Шкатов Н. В.** Исследование акустоэлектронных устройств пространственной обработки сигнала // *Радиотехника и электроника*. 1985. № 6. С. 1194–1199.
6. **Petrov P. N.** Spatial pulse response of the multielement acoustoelectronic processor // *SPIE*. 1999. Vol. 3900. P. 263–266.
7. **Гольдберг Л. М., Матюшкин Б. Д., Полен М. Н.** Цифровая обработка сигналов: справочник. — М.: Радио и связь, 1985. — 312 с.
8. **Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И.** Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д. И. Воскресенского. Изд. 2-е, доп. и перераб. — М.: Радиотехника, 2006. — 376 с.
9. **Самойлов Л. К.** Электронное управление характеристиками направленности антенн. — Л.: Судостроение, 1987. — 286 с.

УДК 62.519

# ОПТИМИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ В МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ

**В. А. Комаров,**

канд. техн. наук, доцент

**А. В. Сарафанов,**

доктор техн. наук, профессор

Сибирский федеральный университет

Рассмотрен метод, обеспечивающий улучшение эксплуатационных характеристик многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований объектов с большим временем реконфигурирования. Метод основан на минимизации перекрестных дублирующих операций перестройки за счет определения оптимальной последовательности обработки заданий в соответствии с критерием минимума суммарного времени реконфигурирования. Приведены результаты оценки его эффективности средствами имитационного моделирования.

**Ключевые слова** — многопользовательский режим, распределенные измерительно-управляющие системы, дистанционный эксперимент, удаленный доступ, Интернет.

## Введение

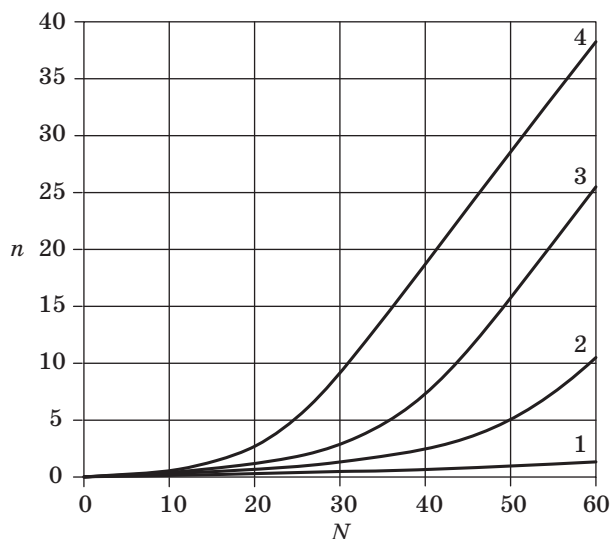
В связи с активным внедрением в научно-исследовательскую и учебную деятельность многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем (РИУС) вопросы повышения их пропускной способности и динамики функционирования становятся все более актуальными. При этом перспективным направлением развития РИУС в области автоматизации экспериментальных исследований радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) являются системы, обеспечивающие экспериментальные исследования протекающих в РЭА комплексных процессов, таких, например, как тепловых и электрических, электрических, тепловых и механических и т. п. [1]. Подобные уникальные исследования в режиме удаленного доступа по сети Интернет представляют особый интерес в научно-исследовательской деятельности (решение вопросов идентификации параметров комплексных математических моделей) и в учебном процессе (изучение комплексных эффектов в РЭА).

## Постановка задачи

Инерционность нагрева и охлаждения отдельных узлов и элементов РЭА как объекта исследо-

вания (ОИ), время изменения номиналов электро-радиоэлементов (ЭРЭ), а также время коммутации вариантов исполнения функциональных узлов и/или типономиналов ЭРЭ служат причиной довольно длительного времени изменения конфигурации ( $t_{\text{рек}}$ ) и состояния объекта исследования ( $t_{\text{рек}} \approx 5 - 10$  с). В свою очередь, длительность времени реконфигурирования ограничивает использование многопользовательского режима функционирования данных РИУС в связи с их малой пропускной способностью и низкой динамикой функционирования. Последние обусловлены недостаточной скоростью обслуживания заданий на измерения и, как следствие, возникающим накоплением заданий в очереди.

В целях оценки объема очереди проведено математическое моделирование функционирования многопользовательской РИУС при различных значениях отношения  $\lambda/\mu$  ( $\lambda$  — интенсивность поступления требований от каждого пользователя,  $\mu$  — интенсивность обслуживания требований) на примере показательного закона распределения времени обслуживания [2, 3]. По результатам получены графики зависимостей среднего числа заданий в очереди  $n$  от числа пользователей  $N$  в произвольный момент времени (рис. 1).



■ Рис. 1. Зависимость среднего числа заданий в очереди для различных отношений  $\lambda/\mu$ : 1 — 0,01; 2 — 0,02; 3 — 0,03; 4 — 0,05

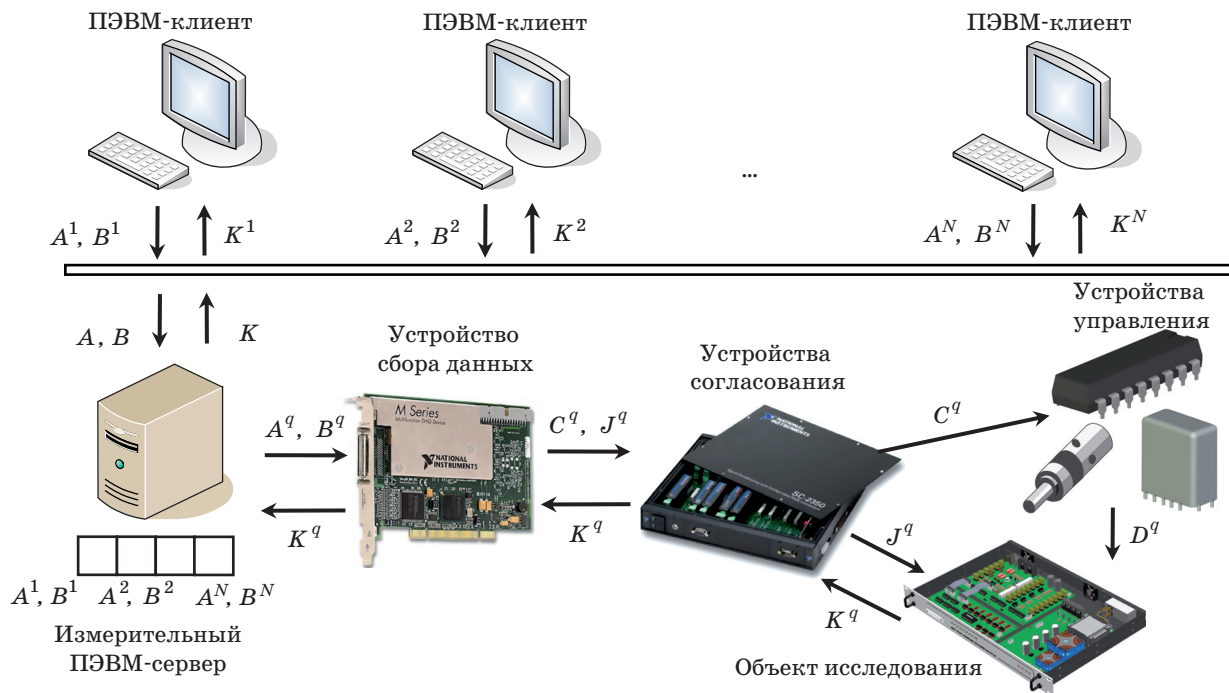
Время обслуживания одного задания  $t_{обсл}$  определяется суммой величин времени реконфигурации  $t_{рек}$  и времени измерения требуемых параметров и характеристик  $t_{изм}$ . Время ожидания результатов измерения пользователями  $t_{ож}$  в общем виде определяется следующим выражением [2, 3]:

$$t_{ож} = t_{оч} + t_{обсл} = n \cdot t_{обсл} + t_{обсл} = t_{рек} \cdot (n + 1) + t_{изм} \cdot (n + 1).$$

Современный уровень развития компьютерных измерительных технологий, унификация аппаратных и программных решений в области автоматизации измерений и обработки измерительной информации [4] позволяют сократить время измерения  $t_{изм}$  вольтамперных, передаточных, частотных, нагрузочных и других характеристик РЭА до 1,5–2 с [5]. Таким образом, для физических процессов, которые можно условно отнести к медленно изменяющимся (инерционным), основной вклад в динамику функционирования вносит величина  $t_{рек}$ . В связи с этим для рассматриваемого класса систем являются актуальными вопросы разработки и исследования методов повышения показателей их функционирования, основанных на сокращении времени изменения конфигурации и состояния объектов исследования.

### Метод минимизации операций управления

Обобщенная структурная схема многопользовательской РИУС автоматизации научного и учебного экспериментов представлена на рис. 2. Многопользовательское функционирование РИУС, обеспечивающее *одновременную работу* группе



■ Рис. 2. Обобщенная структурная схема многопользовательской РИУС:  $A^1, A^2, \dots, A^N$  — массивы параметров управления ОИ;  $B^1, B^2, \dots, B^N$  — массивы параметров тестирующих сигналов и сигналов управления;  $C^q$  — массив (вектор) сигналов управления;  $J^q$  — массив измерительных и тестирующих сигналов;  $D^q$  — вектор воздействий на ОИ;  $K^q$  — массив сигналов, характеризующих состояние ОИ;  $N$  — число пользователей;  $q$  — порядковый номер извлечения заданий из очереди

пользователей, достигается реализацией специализированного алгоритма программного обеспечения (ПО) серверного уровня, которое осуществляет буферизацию и очередность доступа к объекту исследования в порядке поступления заданий на измерение (*first in — first out*) [3, 6, 7]. Подготовка эксперимента — выбор структуры объекта исследования, настройка параметров конфигурации, задание параметров тестирующих сигналов ( $A^N, B^N$ ) — производится на уровне клиентского ПО. Подготовленное задание передается на измерительный ПЭВМ-сервер, сопряженный с объектом исследования, и в случае занятости ОИ измерением ставится в очередь. После освобождения измерителя происходит формирование тестовых сигналов и сигналов управления —  $C^q, J^q$ , реконфигурирование объекта исследования —  $D^q$ , измерение исследуемых сигналов в соответствии с новым заданием —  $K^q$ , передача их обратно пользователю на ПЭВМ-клиент, затем начинается обработка следующего задания.

Рассмотрим очередь заданий на измерительном ПЭВМ-сервере в процессе функционирования многопользовательской РИУС. В соответствии с результатами моделирования (см. рис. 1) среднее число заданий в очереди при  $\lambda/\mu \geq 0,02$  и  $N \geq 50$  превышает 5. Каждое из заданий содержит массивы тестирующих и управляющих сигналов, а также массив параметров управления.

Предположим, что на ОИ подается одно управляемое воздействие  $\bar{X}$  (например, тепловое), описываемое значением  $x_m$ , где  $m = 1 \dots s$ ;  $s$  — максимально возможное число значений  $\bar{X}$ . Введем обозначения:

$S_i$  — состояние ОИ, определяемое  $i$ -м заданием в очереди и соответствующее значению  $x_m$  параметра управления  $\bar{X}$ ,  $i$  — порядковый номер поступления задания в очередь от пользователей,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  — число заданий в очереди;

$S_0$  — состояние ОИ на начало обработки заданий из очереди;

$t_{ij}$  — длительность операции управления, необходимой для перестройки (перевода) объекта исследования из конфигурации  $S_i$  в конфигурацию  $S_j$ , где  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Рассмотрим матрицу длительностей переходов объекта исследования по состояниям  $S_n$  размером  $(n + 1)(n + 1)$ , в ячейках которой расположим соответствующие времена  $t_{ij}$ . В общем случае данная матрица несимметрична, т. е. времена перехода объекта из состояния  $S_i$  в  $S_j$  и из  $S_j$  в  $S_i$  при  $i \neq j$  могут не совпадать, например, в связи с аппаратными особенностями реализации процесса нагрева и охлаждения ЭРЭ, установленного на радиаторе, и т. п. На рис. 3 представлена последовательность «перехода» объекта исследования по состояниям при обслуживании заданий

	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	...	$S_{n-1}$	$S_n$
$S_0$	0	$t_{01}$	$t_{02}$	$t_{03}$	$t_{04}$	...	$t_{0(n-1)}$	$t_{0n}$
$S_1$	$t_{10}$	0	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{14}$	...	$t_{1(n-1)}$	$t_{1n}$
$S_2$	$t_{20}$	$t_{21}$	0	$t_{23}$	$t_{24}$	...	$t_{2(n-1)}$	$t_{2n}$
$S_3$	$t_{30}$	$t_{31}$	$t_{32}$	0	$t_{34}$	...	$t_{3(n-1)}$	$t_{3n}$
$S_4$	$t_{40}$	$t_{41}$	$t_{42}$	$t_{43}$	0	...	$t_{4(n-1)}$	$t_{4n}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$S_{n-1}$	$t_{(n-1)0}$	$t_{(n-1)1}$	$t_{(n-1)2}$	$t_{(n-1)3}$	$t_{(n-1)4}$	...	0	$t_{(n-1)n}$
$S_n$	$t_{n0}$	$t_{n1}$	$t_{n2}$	$t_{n3}$	$t_{n4}$	...	$t_{n(n-1)}$	0

■ Рис. 3. Матрица длительностей «переходов» объекта исследования по состояниям  $S_n$

на измерение в порядке их поступления —  $S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_{n-1}, S_n$ .

Общее время, затраченное на выполнение операций управления, определяемых заданиями в очереди, вычисляется в соответствии с выражением

$$T_{\Sigma \text{упр}} = \sum_{k=0}^n t_{k, k+1}.$$

Следует отметить, что последовательностей перехода по конфигурациям, обязательным условием для которых является начало перехода из состояния  $S_0$ , может быть несколько. На рис. 4 представлены примеры некоторых последовательностей перехода по состояниям, отличных от дисциплины обслуживания *FIFO*, для  $n = 5$ .

Общее число возможных маршрутов  $K_w$  определяется как число перестановок порядка  $n$  [8]:

$$K_w = P_n = n!.$$

В общем виде суммарное время управления определяется в соответствии с выражением [8]

$$T_{\Sigma \text{упр}} = \sum_{\substack{i, j=1 \\ i \neq j}}^n t_{i, j} \cdot x_{i, j},$$

где  $x_{i, j}$  — переменные, ассоциированные с переводом объекта исследования из состояния  $S_i$  в  $S_j$ , т. е.  $x_{i, j} = 1$ , если данный переход входит в маршрут.

	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$
$S_0$	0	$t_{01}$	$t_{02}$	$t_{03}$	$t_{04}$	$t_{05}$
$S_1$	$t_{10}$	0	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{14}$	$t_{15}$
$S_2$	$t_{20}$	$t_{21}$	0	$t_{23}$	$t_{24}$	$t_{25}$
$S_3$	$t_{30}$	$t_{31}$	$t_{32}$	0	$t_{34}$	$t_{35}$
$S_4$	$t_{40}$	$t_{41}$	$t_{42}$	$t_{43}$	0	$t_{45}$
$S_5$	$t_{50}$	$t_{51}$	$t_{52}$	$t_{53}$	$t_{54}$	0

■ Рис. 4. Возможные последовательности перехода по состояниям: — — —  $S_0, S_1, S_5, S_4, S_3, S_2$ ; - - - -  $S_0, S_3, S_2, S_4, S_5, S_1$

рут, и  $x_{i,j} = 0$ , если не входит, при ограничениях, подробно описанных в работе [9].

Основной идеей предлагаемого в статье метода является определение такой последовательности извлечения запросов из очереди (маршрута перехода по состояниям, определяемым значениями управляемого воздействия заданий в очереди), чтобы общее время, затрачиваемое на реконфигурацию, было минимальным:

$$T_{\Sigma \text{упр}} \rightarrow \min.$$

Этим достигается уменьшение времени обслуживания запросов за счет минимизации перекрестных дублирующих операций перестройки объекта исследования (РЭА или ее отдельных функциональных узлов), повышение динамики функционирования и, как следствие, увеличение максимально допустимого числа одновременно работающих пользователей [3, 7].

Задачу минимизации  $T_{\Sigma \text{упр}} \rightarrow \min$  необходимо решать каждый раз при поступлении нового задания в очередь, так как значения параметра управления  $x_m$  поступающих заданий, а также состояние  $S_0$  в произвольный момент времени случайны. Фактически сформулированная задача нахождения минимального значения  $T_{\Sigma \text{упр}} \min$  сходна с классической задачей коммивояжера (бродячего торговца), когда необходимо обойти все города (состояния ОИ, определяемые заданиями в очереди) по наикратчайшему пути (за минимальное время  $T_{\Sigma \text{упр}} \min$ ), для решения которой существует множество известных алгоритмов [8, 9]. Предлагаемый метод может быть также использован для оптимизации управления объектами с несколькими управляемыми воздействиями. В этом случае необходимо будет решить многомерную задачу.

### Оценка эффективности метода

В процессе исследований эффективность рассмотренного метода была проанализирована на имитационной модели многопользовательской РИУС для «жадного» алгоритма [8] решения задачи минимизации при следующих исходных данных:

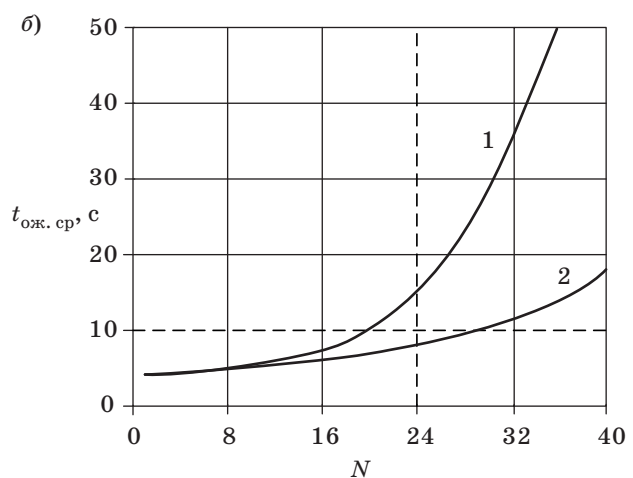
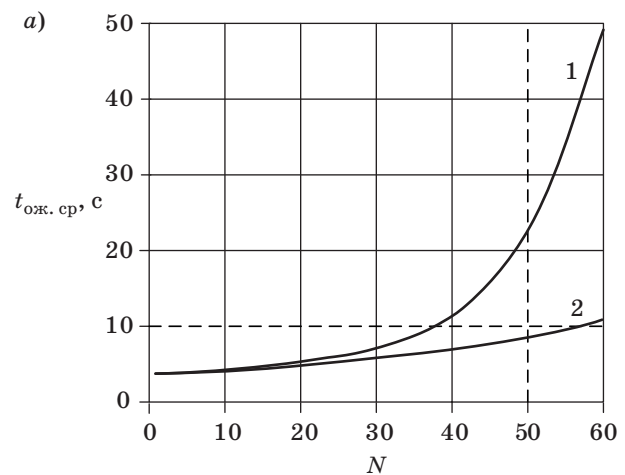
- число управляемых воздействий  $k = 1$ ;
- число значений параметра управления  $m = 10$ ;
- длительность операций перевода объекта исследования из конфигурации  $S_i$  в конфигурацию  $S_j$  принята одинаковой для всех направлений переходов,  $t_{i,j} = 1$  с;
- время измерения параметров и характеристик объекта исследования  $t_{\text{изм}} = 1$  с.

Значения параметра управления, отправляемые с очередными сообщениями от пользовате-

лей, формировались при помощи генератора случайных чисел, распределенных по равномерному закону.

Результаты имитационного моделирования демонстрируют эффективность применения разработанного метода, в частности, для двух значений интенсивностей поступления сообщений  $\lambda$  удалось достигнуть сокращения  $t_{\text{ож. ср}}$  с 24 до 9 с (рис. 5, а) и с 15 до 8 с (рис. 5, б), что при рассмотренных исходных данных равносильно увеличению максимально допустимого числа одновременно работающих пользователей  $N_{\text{max}}$  с 37 до 55 (см. рис. 5, а) и с 20 до 29 (см. рис. 5, б) пользователей соответственно при сохранении динамики функционирования ( $t_{\text{ож. ср}} \approx 8 - 10$  с) на прежнем уровне.

Обозначим через  $\xi$  относительное сокращение величины среднего времени ожидания. При использовании разработанного метода величина  $\xi$  характеризует его эффективность и определяется в соответствии с выражением



■ Рис. 5. Среднее время ожидания результатов измерения: а —  $\lambda_1 = 0,006$ ,  $N = 50$ ; б —  $\lambda_2 = 0,011$ ,  $N = 24$ : 1 — обслуживание запросов в порядке их поступления; 2 — перестановка сообщений в очереди



$$\xi = \frac{t_{\text{ож. ср}} - t_{\text{ож. ср}}^*}{t_{\text{ож. ср}}} \cdot 100\% \Big|_{N=\text{const}},$$

где  $t_{\text{ож. ср}}$ ,  $t_{\text{ож. ср}}^*$  — значение среднего времени ожидания в многопользовательской РИУС соответственно до и после применения разработанного метода.

Для рассмотренного выше примера  $\xi_{\lambda 1} \approx 63\%$ ,  $\xi_{\lambda 2} \approx 47\%$ . Следует отметить, что величина  $\xi$  зависит от вида матрицы длительностей переходов, числа управляемых воздействий  $k$ , числа значений параметра управления  $m$ , текущего числа пользователей системы  $N$ , интенсивности поступления сообщений от каждого пользователя  $\lambda$ .

В настоящее время авторы ведут дальнейшие исследования метода в следующих направлениях:

- выявление оптимальных соотношений величин  $t_{\text{изм}}$ ,  $t_{\text{рек}}$ ,  $k$ ,  $m$ ,  $N$ ,  $\lambda$ , при которых применение метода:

- начинает быть эффективным ( $\xi \geq 10\%$ );

- является наиболее эффективным ( $\xi \rightarrow \max$ );
- оценка влияния алгоритма решения задачи минимизации  $T_{\Sigma \text{упр}} \rightarrow \min$ .

### Заключение

В целом рассмотренный метод существенно расширяет перечень возможных ОИ физических процессов в образцах РЭА при построении многопользовательских РИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований. Применение метода в практике разработки РИУС позволило, в частности, при расширении видов проводимых исследований сократить время ожидания результатов измерения в среднем на 20–40 %, что дало возможность увеличить число одновременно работающих пользователей в среднем на 25 % [10].

В ряде случаев благодаря разработанному методу функционирование РИУС было переведено из монопольного режима в многопользовательский.

### Литература

1. Гольдин В. В., Журавский В. Г., Кофанов Ю. Н., Сарафанов А. В. Информационная поддержка жизненного цикла электронных средств. — М.: Радио и связь, 2002. — 386 с.
2. Takagi H. Queueing analysis. A foundation of performance evaluation. Vol. II. Finite Systems. — Amsterdam: North-Holland, 1993. — 560 p.
3. Комаров В. А., Сарафанов А. В. Разработка математической модели многопользовательского режима функционирования аппаратно-программных комплексов с удаленным доступом // Информационные технологии. 2009. № 3. С. 67–74.
4. Официальный сайт корпорации National Instruments. 2010. www.ni.com (дата обращения: 12.11.2010).
5. Патент РФ № 2406140. Способ тестирования территориально-удаленных объектов / А. С. Глинченко, В. А. Комаров, А. В. Сарафанов.
6. Арбузов Ю. В. и др. Новый подход к инженерному образованию: теория и практика открытого доступа к распределенным информационным и техническим ресурсам / Под ред. А. А. Полякова. — М.: Центр-Пресс, 2000. — 238 с.
7. Глинченко А. С., Комаров В. А., Сарафанов А. В. Повышение эффективности эксплуатации многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем // Вестник Воронежского ГТУ. 2008. № 10. С. 186–189.
8. Таха Хемди А. Введение в исследование операций: пер с англ. 7-е изд. — М.: Вильямс, 2005. — 912 с.
9. Иглин С. П. Решение некоторых задач теории графов в MATLAB // EXPonenta Pro. Математика в приложениях. 2003. № 4. С. 28–33.
10. Сарафанов А. В. и др. Исследование полупроводниковых приборов на основе специализированного сетевого аппаратно-программного комплекса. Версия 1.0: электрон. учеб. пособие. — М.: ДМК Пресс, 2009. — 1 электрон. опт. диск (CD).

УДК 519.816

## КРИТЕРИЙ СОГЛАСОВАННОСТИ ПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ

**П. И. Падерно,**

доктор техн. наук, профессор

**Е. А. Бурков,**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**В. Г. Евграфов,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский военный инженерно-технический университет

Предложен критерий согласованности экспертов, который представляет собой коэффициент значимости противоречивости парных сравнений. Данный критерий позволяет оценить возможность корректного комплексирования экспертных мнений при использовании модифицированного метода анализа иерархий.

**Ключевые слова** — комплексирование мнений, критерий согласованности, метод анализа иерархий.

### Введение

Одной из важнейших проблем, возникающих при обработке экспертных оценок, является анализ согласованности экспертов. Он необходим для решения таких задач, как определение результирующих значений, максимально близких к оценкам, которые выставили все эксперты, и разбиение экспертной группы на коалиции в соответствии с разделяемыми экспертами мнениями.

Подход к определению согласованности экспертов в основном зависит от того, каким образом опрошенные эксперты должны были высказать свое мнение — в виде балльных оценок, ранжирований, парных сравнений и т. д. Достаточно известным и показавшим свою эффективность на практике является метод анализа иерархий (МАИ) [1]. Данный метод экспертного оценивания основан на том, что экспертные мнения представлены в виде матриц парных сравнений. К сожалению, недостаточно развит анализ согласованности матриц парных сравнений и отсутствует критерий, позволяющий оценить согласованность матриц парных сравнений с учетом компетентности экспертов.

### Модифицированный МАИ

В статье [2] был предложен подход к комплексированию мнений групп разнородных экспертов различной компетентности при оценке значимо-

сти показателей, представляющих иерархическую структуру, который позволяет расширить возможности применения классического МАИ. С его помощью можно проводить обработку не конкретных мнений экспертов, представленных в виде матриц парных сравнений, а результирующих матриц, отражающих мнения и компетентность групп экспертов, что значительно упрощает процедуру обработки, особенно в тех случаях, когда каждая группа экспертов работает обособленно. Однако перед комплексированием мнений различных экспертных групп необходимо определить, достаточно ли они согласованы между собой. Если представления групп о сравниваемых элементах иерархии сильно противоречат друг другу, это может привести к резкому снижению достоверности результатов экспертизы.

Возникает необходимость в критерии, который бы позволил оценить согласованность мнений экспертных групп. МАИ предполагает, что мнения экспертов представлены в виде матриц парных сравнений элементов иерархии (для упрощения далее рассматривается двухуровневая иерархия с одним элементом на первом и  $n$  элементами на втором уровнях, причем  $n \leq 9$  [1]). В рассматриваемой модификации МАИ обобщенное мнение экспертов каждой группы формируется путем комплексирования мнений всех экспертов группы, при этом также возникает проблема согласованности их мнений. Поскольку комплексирование мнений экспертных групп выполняется аналогично комплексированию мнений экс-

пертов одной группы, то далее будем говорить не о группах, а об экспертах.

Обобщенное мнение экспертов группы представляет собой обобщенную матрицу парных сравнений следующего вида:

$$\bar{A} = \prod_{l=1}^k \otimes A_l^{\otimes Q_l} = \{\bar{a}_{ij}\}, \quad \bar{a}_{ij} = \sum_{l=1}^k q_{lij} \sqrt{\prod_{l=1}^k a_{lij}^{q_{lij}}}, \quad (1)$$

где символ « $\otimes$ » после знака произведения обозначает адамарово (поэлементное) произведение матриц, а в показателе степени — обобщенную адамарову степень;  $A_l = \{a_{ij}\}$  — матрица парных сравнений  $n$  элементов иерархии  $l$ -м экспертом;  $Q_l = \{q_{ij}\}$ ,  $l \in [1; k]$ ,  $i \in [1; n]$ ,  $j \in [1; n]$  — матрица компетентности  $l$ -го эксперта, элемент которой  $q_{ij}$  — коэффициент компетентности эксперта при сравнении  $i$ -го элемента иерархии с  $j$ -м, причем  $q_{ij} = q_{ji}$  и  $q_{ij} \in [0; 1]$ .

### Подходы к определению согласованности парных сравнений

Для определения возможности комплексирования необходим критерий, который позволит определить согласованность матриц парных сравнений. Рекомендуется [3] либо осуществить переход от парных сравнений элементов иерархии к их ранжированию, либо рассмотреть на основе каждой матрицы парных сравнений вектор приоритетов и лишь затем производить оценку согласованности: в первом случае — с помощью коэффициентов ранговой корреляции Кендэлла или Спирмена, а также коэффициента конкордации; во втором — коэффициентов вариации значимости и интерквартильной вариации. Недостатком данных подходов является невозможность произвести оценку согласованности непосредственно самих матриц парных сравнений. Кроме того, при оценке согласованности на основе ранжирований учитывается не информация о степени превосходства одного элемента иерархии над другим, а лишь сам факт превосходства.

Также для оценки согласованности экспертных мнений предлагается [3, 4] использовать коэффициент согласия, для вычисления которого необходимо сделать переход от матриц парных сравнений, элементы которых несут информацию о степени превосходства элементов иерархии друг над другом, к матрицам, элементы которых несут информацию лишь о факте превосходства или эквивалентности элементов иерархии. При такой оценке согласованности учитывается информация о транзитивности, но не о кардинальности предпочтений экспертов.

В работе [5] предложено условие некомплексированности матриц парных сравнений, однако в нем, как и в рассмотренных выше подходах

к оценке согласованности, не учитывается информация о компетентности экспертов, а рассматриваемая модификация МАИ предполагает, что устроители экспертизы ею располагают.

### Предлагаемый критерий оценки согласованности парных сравнений

Можно сформулировать ряд требований к критерию оценки согласованности экспертных мнений. Критерий должен:

- 1.1) производить оценку согласованности матриц парных сравнений на уровне элементов;
- 1.2) учитывать транзитивность и кардинальность предпочтений экспертов;
- 1.3) учитывать информацию о компетентности экспертов.

Введем в качестве критерия согласованности коэффициент противоречивости экспертных оценок, который представляет собой функцию вида

$$k_{ij} = f(a_{1ij}, a_{2ij}), \quad i, j \in [1; n], \quad a_{1ij}, a_{2ij} \in R, \quad (2)$$

где  $a_{1ij}$  — результат сравнения 1-м экспертом  $i$ -го элемента иерархии с  $j$ -м;  $a_{2ij}$  — результат сравнения 2-м экспертом  $i$ -го элемента иерархии с  $j$ -м;  $R$  — шкала относительной важности. Потребуем, чтобы функция (2) для  $\forall i, j \in [1; n]$ ,  $a_{1ij}, a_{2ij} \in R$  удовлетворяла следующему ряду условий:

- 2.1)  $f(a_{1ij}, a_{2ij}) = f(a_{2ij}, a_{1ij})$ ;
- 2.2)  $f(a_{1ij}, a_{2ij}) = f(a_{1ji}, a_{2ji})$ ;
- 2.3)  $f(a_{1ij}, a_{2ij}) \in [0; 1]$ ;
- 2.4)  $a_{1ij} = a_{2ij} \rightarrow f(a_{1ij}, a_{2ij}) = 0$ .

Рассмотрим в качестве функции, удовлетворяющей условиям 2.1–2.4, коэффициент противоречивости парных сравнений, который имеет вид

$$k_{ij} = \left| \log_{r,2} \frac{a_{1ij}}{a_{2ij}} \right|, \quad i, j \in [1, n], \quad (3)$$

где  $r$  подбирается так, чтобы выполнялось условие 2.3 и для МАИ со шкалой относительной важности  $r$  равнялось девяти.

Что касается условий 1.1–1.3, то предложенный в качестве критерия согласованности коэффициент противоречивости (3) удовлетворяет лишь условию 1.2. Модифицируем коэффициент (3) так, чтобы он удовлетворял условию 1.3, для этого введем в него коэффициенты компетентности экспертов:

$$k_{ij} = \hat{q}_{ij} \left| \log_r \frac{a_{1ij}}{a_{2ij}} \right|, \\ \hat{q}_{ij} = \min \left\{ \frac{q_{1ij}}{q_{1ij} + q_{2ij}}, \frac{q_{2ij}}{q_{1ij} + q_{2ij}} \right\}, \quad i, j \in [1, n], \quad (4)$$

где  $\hat{q}_{ij} \in [0, 0,5]$  — задающий значимость имеющегося противоречия между оценками экспертов

весовой коэффициент, введенный из следующих соображений: в выражении (1) оценка высококомпетентного эксперта имеет большую значимость и при комплексировании оказывает большее влияние на обобщенную оценку. Фактически подобная процедура позволяет разрешить имеющееся противоречие в оценках экспертов в пользу более компетентного эксперта тем надежнее, чем больше разница в их компетентности и чем меньше это противоречие. Например, при проведении комплексирования оценка высококомпетентного эксперта ( $q_{1ij} \rightarrow 1$ ) нивелирует оценку малокомпетентного ( $q_{2ij} \rightarrow 0$ ) коллеги. Максимум  $\hat{q}_{ij}$  достигает, когда  $q_{1ij} = q_{2ij}$ , так как разрешить имеющееся в этом случае серьезное противоречие между оценками экспертов невозможно, потому что неясно, какой из экспертов заслуживает большего доверия, а комплексирование приведет к взаимному «уничтожению» оценок, и значит, будет потеряна важная информация о сравниваемых элементах иерархии. Следовательно, чем меньше разрыв в компетентности между экспертами, тем более важным является противоречие между их мнениями.

Полученный критерий согласованности (4) назовем коэффициентом значимости противоречивости парных сравнений, который удовлетворяет условиям 1.2 и 1.3, однако пока не удовлетворяет условию 1.1, так как позволяет оценить значимость противоречивости двух экспертных оценок (которые представляют собой результаты парных сравнений), но не матриц в целом. Поэтому приведем способ применения коэффициента (4) для двух матриц парных сравнений в целом.

Пусть  $\mathbf{A}_1 = \{a_{1ij}\}$ ,  $\mathbf{Q}_1 = \{q_{1ij}\}$ ,  $i, j \in [1; n]$  — матрица парных сравнений и матрица компетентности 1-го эксперта, а  $\mathbf{A}_2 = \{a_{2ij}\}$ ,  $\mathbf{Q}_2 = \{q_{2ij}\}$ ,  $i, j \in [1; n]$  — аналогичные матрицы 2-го эксперта. Перед комплексированием матриц  $\mathbf{A}_1$  и  $\mathbf{A}_2$  необходимо определить их согласованность, т. е. значимость противоречивости составляющих их оценок. Рассчитаем для этого матрицу коэффициентов значимости противоречивости парных сравнений двух экспертов

$$\mathbf{K}_{1,2} = \{k_{ij}\}, \quad k_{ij} = \hat{q}_{ij} \left| \log_r \frac{a_{1ij}}{a_{2ij}} \right| = \hat{q}_{ij} k'_{ij}, \quad i, j \in [1, n]. \quad (5)$$

Выведем условие комплексированности матриц  $\mathbf{A}_1$  и  $\mathbf{A}_2$  на основе матрицы (5). Коэффициент  $k'_{ij}$  представляет собой противоречивость экспертных оценок и изменяется в диапазоне от 0 до 2, при этом наибольшее его значение достигается при  $a_{1ij} = 9$ ,  $a_{2ij} = 1/9$  (либо наоборот), а наименьшее — при  $a_{1ij} = a_{2ij}$ . Из условия

$$\begin{cases} k'_{ij}(a_{1ij}, a_{2ij}) \geq k'_{ij}(a_{1ij}^*, a_{2ij}^*), \\ (a_{1ij} < 1, a_{2ij} > 1) \wedge ((a_{1ij}^* > 1, a_{2ij}^* > 1) \vee \\ \vee (a_{1ij}^* < 1, a_{2ij}^* < 1)), \end{cases} \quad (6)$$

есть единственное исключение:  $a_{1ij} = 2$ ,  $a_{2ij} = 1/2$ ,  $a_{1ij}^* = 9$ ,  $a_{2ij}^* = 2$ . Если  $q_{1ij} = q_{2ij}$ ,  $a_{1ij} = 2$ ,  $a_{2ij} = 1/2$ , то при комплексировании по формуле (1) обобщенная оценка будет равна единице ( $\bar{a}_{ij} = 1$ ), т. е. получим, что  $i$ -й и  $j$ -й элементы иерархии одинаково важны. Если бы оценки экспертов лежали вне диапазона от  $1/2$  до  $2$ , то такую обобщенную оценку нельзя было бы считать достоверной, так как комплексирование в подобном случае приводило бы лишь к потере информации о сравнительной важности  $i$ -го и  $j$ -го элементов иерархии по причине достаточно серьезного противоречия между экспертными оценками и невозможности его разрешить в силу равенства компетентности экспертов. Однако «2» по лингвистической шкале МАИ означает, что один из сравниваемых элементов иерархии *очень незначительно превосходит* второй элемент, поэтому при некотором допущении можно считать  $\bar{a}_{ij} = 1$  достоверной оценкой. Будем полагать, что это крайний и единственный случай, когда при том, что  $a_{1ij}$  и  $a_{2ij}$  лежат по разные стороны единицы, а также  $q_{1ij} = q_{2ij}$ , полученная при комплексировании обобщенная оценка  $\bar{a}_{ij} = 1$  является достоверной и коэффициент значимости противоречивости (4) имеет предельно допустимое значение  $k_{ij} \approx 0,315$ . Распространив это положение на матрицу (5), потребуем, чтобы среднее значение элементов каждого ее столбца не превышало  $0,315$ . Тогда условие комплексированности двух матриц парных сравнений будет иметь вид

$$\bar{k}_j = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1, i \neq j}^n k_{ij} \leq 0,315, \quad j \in [1; n]. \quad (7)$$

Если при каком-либо значении  $j$  условие (7) не выполняется, то это говорит о том, что между экспертами имеется существенное противоречие в оценке  $j$ -го элемента иерархии, поэтому их мнения, т. е. матрицы  $\mathbf{A}_1$  и  $\mathbf{A}_2$ , комплексировать нельзя.

### Выполнение комплексирования мнений экспертов

Опишем процесс получения обобщенного мнения всех экспертов группы. Необходимо проверить условие (7) для каждой пары экспертов, и все эксперты группы разобьются на коалиции в соответствии с тем, можно ли комплексировать их мнения или нет. Можно выделить четыре основных варианта разбиения на коалиции: 1) почти все эксперты группы составят одну коалицию;

2) эксперты разобьются на 2–3 коалиции, суммарный состав которых охватит большую часть экспертов; 3) эксперты разобьются на множество небольших коалиций; 4) почти все эксперты не попадут ни в одну коалицию. В первом случае мнениями экспертов, которые не попали в общую коалицию, можно пренебречь, особенно если они малокомпетентны, и получить путем комплексирования обобщенное мнение коалиции. Во втором случае получают обобщенное мнение каждой коалиции (мнением не попавших ни в одну из крупных коалиций экспертов также можно пренебречь), а затем обобщенные мнения коалиций вновь проверяются на возможность комплексирования. В том случае, если реализовался третий вариант, необходимо проанализировать сложившуюся ситуацию: возможно, на одном из этапов подготовки экспертизы [6] была допущена ошибка, что-то не учли и следует провести экспертизу снова или хотя бы вернуться к этому этапу и устранить недоработку. Если это невозможно (например, все деньги, отпущенные на проведе-

ние экспертизы, уже потрачены или нет времени), то можно несколько увеличить значение, стоящее в правой части неравенства (7), но при этом следует понимать, что это негативно скажется на достоверности результатов экспертизы. В четвертом случае возможные действия в общем аналогичны предыдущему случаю с той разницей, что следует более внимательно рассмотреть возможность повторного проведения экспертизы.

### Заключение

При проведении экспертиз с использованием методов группового выбора возникает необходимость комплексирования мнений экспертов и получения достоверного обобщенного мнения. Предложенная модификация МАИ дает возможность повысить эффективность проведения экспертизы и надежность получаемых результатов за счет введения критерия согласованности, позволяющего оценить корректность комплексирования экспертных мнений, представленных в виде матриц парных сравнений.

### Литература

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. — 278 с.
2. Падерно П. И. Комплексирование мнений экспертов при экспертной оценке с применением метода анализа иерархий // Человеческий фактор. Проблемы психологии и эргономики. Тверь, 2007. № 3. С. 122–127.
3. Анохин А. Н. Методы экспертных оценок (применение в задачах эргономического обеспечения деятельности оператора АЭС): учеб. пособие / ИАТЭ. — Обнинск, 1996. — 148 с.
4. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. — М.: Статистика, 1980. — 263 с.
5. Пахарьков Г. Н., Хаймур М. О медико-техническом оснащении службы скорой медицинской помощи // Информационно-управляющие системы. 2008. № 5. С. 45–53.
6. Падерно П. И., Попечителев Е. П. Надежность и эргономика биотехнических систем / Под общ. ред. проф. Е. П. Попечителева. — СПб.: СПбГЭТУ. 2007. — 288 с.

УДК 004.75

## ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА СТУДЕНТА ВУЗА

**В. Г. Гришаков,**  
канд. техн. наук  
**И. В. Логинов,**  
канд. техн. наук  
Академия ФСО России

*Проводится обзор и отмечаются недостатки современных методов построения автоматизированных рабочих мест студентов высших учебных заведений. Обосновывается система требований к рабочему месту студента. Предлагается для организации рабочего места использовать сервис-ориентированный подход и мобильные хранилища данных.*

**Ключевые слова** — автоматизированное рабочее место студента, информационно-вычислительная система вуза, хранилище данных, сервис-ориентированный подход.

### Введение

Развитие образовательных процессов в высшей школе характеризуется широким внедрением информационных технологий. Не используя их, сегодня нельзя обучаться на технических специальностях и очень проблематично — на гуманитарных. Эффективность обучения студента напрямую связана в том числе и с эффективностью его рабочего пространства, правильная организация которого позволяет сократить непродуктивные затраты, в первую очередь временные, на выполнение рутинных функций.

Основным элементом рабочего пространства является автоматизированное рабочее место (АРМ), с использованием которого решаются задачи, возникающие в процессе обучения. В вузе выделяются три основные категории сотрудников: научно-педагогические работники, студенты и обслуживающий персонал. Наиболее многочисленной категорией являются студенты, при этом степень автоматизации их деятельности средствами АРМ — наименьшая. В настоящее время студенты свое рабочее пространство, в том числе АРМ, организуют самостоятельно в соответствии с имеющимися у них навыками и знаниями, в большинстве случаев бессистемно и хаотично. Такая ситуация приводит к неэффективной организации деятельности студентов и предполагает на-

личие значительных резервов по повышению качества их обучения.

Анализ области исследования показывает, что, несмотря на общие усилия по повышению информатизации общества и вузов в частности, организации АРМ студентов не уделяется достаточно внимания с точки зрения как научного обоснования, так и практического внедрения. Под АРМ студента в основном понимается ПЭВМ с набором офисного программного обеспечения, специализированного программного обеспечения в рамках конкретных дисциплин, со средством доступа к информационно-вычислительной сети (ИВС) вуза и Интернету [1]. Развитие АРМ происходит по следующим основным направлениям:

— увеличение количества прикладных сервисов и функций, предоставляемых студенту через его АРМ, как в автономном, так и в сетевом режиме ИВС вуза [2] (совершенствуется доступ к информационным ресурсам, расписанию, оценкам, отчетностям и т. д.) на основе порталов, web-сайтов, средств коллективной работы и систем электронного документооборота;

— совершенствование интернет-АРМ, особенно используемых в рамках дистанционного обучения [3], при этом повышается эффективность средств коммуникации и расширяется доступ к информационным ресурсам (разработано множество систем, например: Student workstation DLS,

NetOp school, DL and Asymetrix toolbox, «Доцент», «Прометей», «ИДО МЭСИ», EN LINEA);

— совершенствование лабораторных стендов как составляющих АРМ в основном для технических (электроника, электротехника, физика), биологических (физиология, биология), телекоммуникационных (сетевое и системное администрирование, управление безопасностью), компьютерных (программирование, тестирование) дисциплин [4, 5];

— совершенствование средств и систем автоматизации обучения (Learning Management System — LMS и аналогичных систем), реализующих и часть функций автоматизации деятельности обучаемых (MOODLE, Sakai, ATutor, Claroline, OLAT) [6].

При этом научно-техническая работа в области автоматизации деятельности преподавателя ведется более активно [7, 8]. В рамках указанных исследований решена часть задач, связанных со сложностью процесса автоматизации обучения, определяемая такими его особенностями, как многоплановость, творческая направленность, активность, отсутствующими во многих рутинных профессиях (делопроизводстве, бухгалтерии, учете). В то же время недостаточно внимания уделяется мобильному характеру работы преподавателей и студентов (в различных аудиториях, дома, на конференциях).

Анализ существующих наработок по организации АРМ студентов показывает отсутствие научно обоснованных требований к его архитектуре и набору функций в целом. При этом по отдельным направлениям автоматизации деятельности студента, в частности обучения по некоторым специальностям, элементы АРМ присутствуют. Поскольку в настоящее время только в России насчитывается не менее 3 млн студентов, обоснование архитектуры и принципов организации АРМ студента является актуальной задачей, решение которой позволит существенно повысить эффективность образовательного процесса.

### **Анализ процесса обучения студента с точки зрения его автоматизации**

Процесс обучения является творческим и предполагает длительный срок, в течение которого происходит освоение большого объема разнообразной информации, развитие навыков и умений и становление компетентного специалиста. Для этого в процессе обучения студент работает на нескольких пространственно разнесенных АРМ: домашнем ПЭВМ, ноутбуке или нетбуке, терминальном устройстве, входящем в состав ИВС вуза, мобильном телефоне (коммуникаторе), а также на других, более редко используемых технических средствах.

Основу рабочего пространства студента составляет распределенное хранилище данных и набор программного обеспечения по их обработке, включающий средства непрерывного обучения. В хранилище данных студента входят личная, развлекательная и специальная (по изучаемым дисциплинам) информация, которая представлена документальными и мультимедийными данными. Перенос локальных данных между удаленными рабочими местами осуществляется с использованием внешнего носителя (обычно флеш-диска), объем которого значительно меньше хранилища данных. Физическое представление информации в настоящее время организовано хаотично (используется несколько типов носителей, данные хранятся в слабоструктурированном виде, применяется файловое хранилище). Протоколы взаимодействия между различными субъектами (студент — студент, студент — преподаватель, студент — родственник) четко не определены и устанавливаются в зависимости от навыков субъектов и образованности в области информатики, что приводит к значительным затратам времени на последующее упорядочивание информации. Размер хранилища данных составляет в среднем несколько сотен гигабайт и сотен тысяч документов, что сопоставимо с размером сайтов крупных корпораций. Прикладные сервисы по обработке данных предоставляются как установленным программным обеспечением, так и ИВС вуза, при этом их качество зачастую не удовлетворяет потребностям студентов.

Следует отметить, что существуют технологии организации АРМ на основе удаленного доступа к рабочему столу (через RAdmin, X-Server, MSTSC) за счет применения подгружаемых виртуальных машин, а также на основе порталов вузов и онлайн-сервисов. Однако они имеют недостаток, связанный, в первую очередь, с требованием наличия постоянного доступа к серверу для загрузки оболочки и документов, который ограничен каналом связи. При этом работа с мультимедийными данными без их предварительной загрузки затруднительна. Вторым недостатком является сложность обеспечения защиты данных в связи с их удаленным хранением, что накладывает определенные ограничения на использование рассматриваемых технологий.

Множество рабочих мест студента и средства автоматизации образуют распределенное АРМ студента, которое, с одной стороны, является составной частью ИВС вуза, а с другой — выступает в роли домашнего мультимедийного центра. Анализ существующих ИВС вузов показывает, что АРМ студентов занимают в них около 70–80 % от всех АРМ и около 50–70 % от общего количества терминальных устройств, что определяет

важность рассматриваемой составляющей для процессов совершенствования ИВС вузов.

### Система требований к функциональным возможностям АРМ студента

Отличие АРМ студента от используемых в других предметных областях заключается в функциональных требованиях к нему [9, 10]. В АРМ студента входят следующие функциональные блоки: система хранения данных, набор системных и прикладных сервисов (в первую очередь по обучению), набор методических средств обучения работе на АРМ.

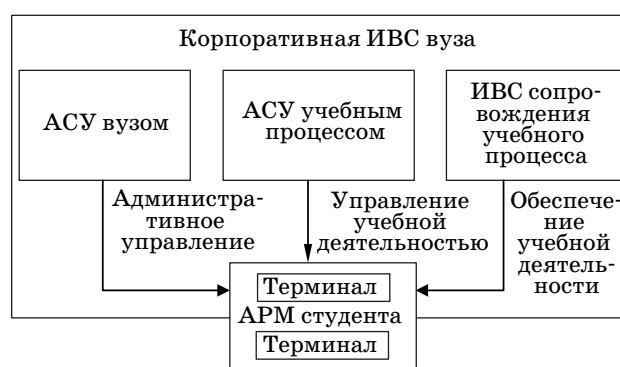
В соответствии с общими принципами построения АРМ должно обеспечивать дружественный интерфейс по взаимодействию как с пользователем, так и с внешними системами. Должна обеспечиваться возможность настройки интерфейса (внешнего вида, стилей, цветовых гамм), количества подключаемых и отображаемых модулей с использованием генераторов интерфейса. Следует отметить, что в настоящее время понятие «дружественный интерфейс» реализуется многими лидерами разработки программного обеспечения и web-сайтов и предполагает удобство как с точки зрения взаимодействия с интерфейсом, так и с точки зрения цветового восприятия. Методические средства обучения работе на АРМ должны обеспечивать обучение студента работе с сервисами в режиме реального времени при выполнении конкретной задачи.

К системе хранения данных предъявляются требования по автоматической настраиваемой индексации и осуществлению синхронизации распределенных узлов хранилища данных в автоматическом режиме. При этом время доступа к данным должно быть меньше времени поиска информации во внешних информационных системах (ИВС вуза или Интернете), что в большинстве информационных систем не реализуется. Системные сервисы должны обеспечивать функции коммуникации, защиты данных, хранения в автоматическом режиме без дополнительных действий пользователя. Дополнительно должна быть предоставлена возможность подключения к сторонним автоматизированным обучающим системам с использованием технологий, реализуемых вузом. Прикладные сервисы должны обеспечивать функционал, достаточный для эффективного обучения: просмотр, редактирование и подготовку документов всех распространенных форматов; поиск данных во внутренних и внешних информационных базах данных и знаний по запросу пользователя; информирование и напоминание о событиях; планирование работ. Подключение новых сервисов должно производиться в автоматическом режиме по запросу пользователя.

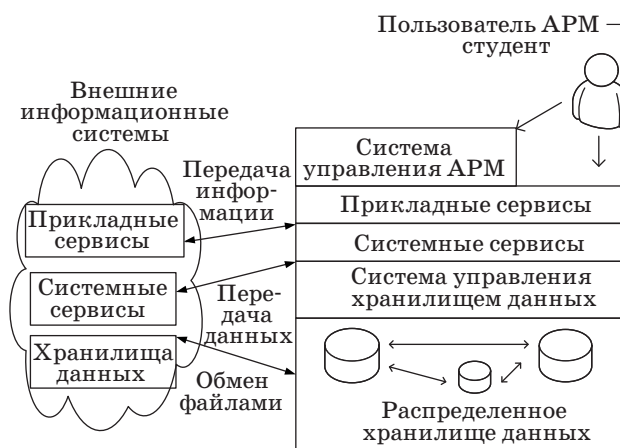
### Модель АРМ студента и его место в составе ИВС вуза

Автоматизированное рабочее место студента в соответствии со своим предназначением входит в состав корпоративной ИВС вуза [11]. Исходя из организационной структуры корпоративной ИВС вуза подсистемы вуза осуществляют взаимодействие с АРМ студента путем генерации управляющих воздействий и ведения автоматизированного обучения (рис. 1).

Представленная система требований предполагает многоуровневую модель АРМ студента (рис. 2). Основой АРМ является распределенное хранилище данных, между узлами которого отсутствуют постоянные физические связи. Для синхронизации и репликации данных должны быть разработаны специализированные прикладные протоколы [12]. Система управления хранилищем управляет распределенным хранилищем данных, выполняет функции ввода, упорядочивания, репликации, выборки, классификации, индексации и выдачу затребованных данных в структурированном виде.



■ Рис. 1. Место АРМ студента в составе корпоративной ИВС вуза



■ Рис. 2. Организационная модель АРМ студента



Системные сервисы отвечают за выполнение системных функций: хранения данных, защиты, коммуникаций, документооборота и т. д.

На основе системных базируются прикладные сервисы, которые выполняют отдельные функции, связанные с процессом обучения и обеспечением иных потребностей. Система управления управляет всем АРМ как в автоматизированном режиме путем определения настроек и обучения, так и в автоматическом режиме, обеспечивая взаимодействие всех элементов АРМ. Студент, как пользователь АРМ, для выполнения своих задач обращается через пользовательский интерфейс к системе управления и прикладным сервисам.

На всех уровнях АРМ осуществляется взаимодействие с внешними информационными системами: обмен файлами, данными, пользовательской и управляющей информацией. Каждый уровень многоуровневой модели АРМ студента должен удовлетворять предъявляемым требованиям по функциональным возможностям, обеспечению совместимости и масштабируемости.

### Перспективный вариант реализации АРМ студента

Перспективным направлением развития АРМ студента является его реализация на основе сервис-ориентированного подхода, широко внедряемого в ИВС вузов [13]. При этом в качестве

основного варианта предлагается использовать веб-сервисы, которые в настоящее время фактически стали стандартным средством предоставления доступа в Интернет. Перспективное АРМ состоит в общем случае из нескольких связанных терминалов (рис. 3).

Каждый терминал включает web-сервер и web-браузер. Web-сервер осуществляет две основные функции — предоставление набора локальных сервисов студенту (доступ к программным сервисам и данным) и взаимодействие с внешними системами: другими терминалами АРМ (репликация данных, доступ к сервисам), порталом вуза (а через него — к автоматизированным обучающим системам) и сторонними информационными системами Интернета. При этом программное обеспечение АРМ представляет собой слабо-связанную систему, обладающую масштабируемостью и повышенной управляемостью. Корпоративный портал вуза должен обеспечивать единство технологий предоставления прикладных сервисов. Создание АРМ на основе сервис-ориентированной архитектуры должно выполняться в следующей последовательности:

- разработка архитектуры АРМ, интерфейсов и протоколов взаимодействия прикладных и системных сервисов;
- реализация системных сервисов и организация распределенного хранилища данных, особая роль при этом должна быть уделена разработ-



■ Рис. 3. Вариант организации АРМ студента

ке механизмов репликации актуальных данных и подгрузке дополнительных, отсутствующих на текущем терминале;

— реализация критических прикладных сервисов с возможностью динамического подключения новых с более развитой функциональностью;

— разработка и внедрение прикладных сервисов в рамках обеспечения образовательных процессов.

Для web-браузера должны быть разработаны надстройки, позволяющие гибко настраивать АРМ студента, по аналогии с конструктором АРМ КАСКАД, прототипы которых широко распространяются многими операторами телематических услуг.

## Литература

1. Horváth L., Rudas I. Course Modeling for Student Profile Based Flexible Higher Education on the Internet // Journal of Universal Computer Science. 2006. Vol. 12. N 9. P. 1254–1266.
2. Положение об автоматизированном рабочем месте (АРМ). — Сыктывкарский лесной институт, 2008. — 4 с.
3. Печатнов В. В. Автоматизированная система дистанционного обучения «Доцент» // Материалы обучающего семинара для работников образования по проекту «Развитие заочной распределенной многопрофильной школы Алтайского края», Барнаул, 26–27 января 1996 г. / Барнаульской гос. пед. ун-т, 1996. С. 9.
4. Дмитриев В. М., Коротина Т. Ю. Автоматизация процесса группового проектного обучения // Докл. ТУСУР. 2008. № 2(18). Ч. 2. С. 125–130.
5. Дмитриев В. М., Кураколов А. Н. Лабораторное автоматизированное рабочее место // Вестник Московского гос. пед. ун-та. Сер. Информатика и информатизация образования. 2005. № 4. С. 55–59.
6. Богомолов В. А. Обзор бесплатных систем управления обучением // Образовательные технологии и общество. 2007. № 10(3). С. 439–459.
7. Григорьева К. В. Разработка АРМ преподавателя для управления качеством обучения: дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2003. 178 с.
8. Лежебоков А. А., Гладков Л. А. АРМ преподавателя с интеллектуальной поддержкой // Программные продукты и системы. 2005. № 4. С. 12.
9. Шураков В. В. и др. Автоматизированное рабочее место для статистической обработки данных. — М.: Финансы и статистика, 1990. — 190 с.
10. Извозчикова С. А., Комнатова В. В., Непша А. А. Создание автоматизированного рабочего места по оценке информационных ресурсов // Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2009. Е. 4. № 24–1. С. 147–149.
11. Крюков В. В., Шахгельдян К. И. Корпоративная информационная среда вуза: методология, модели, решения: монография. — Владивосток: Дальнаука, 2007. — 308 с.
12. Логинов И. В. Организация мобильного хранилища данных в составе распределенного АРМ // Информационные технологии в науке, образовании и производстве. ИТНОП-2010: Материалы IV Международ. науч.-техн. конф., Орел, 22–23 апреля 2010 г. В 5 т. Т. 4. С. 62–66.
13. Соловьев В. М. Средства сервис-ориентированной архитектуры в образовании // Тр. XIV Всерос. науч.-метод. конф. «Телематика'2007», Санкт-Петербург, 18–21 июня 2007 г. СПб.: ИТМО, 2007. С. 110–111.

## Заключение

В статье аргументирована актуальность выработки научно обоснованных требований к АРМ студента вуза. Показана система функциональных требований, определяющих архитектуру АРМ, и построена его организационная модель, представленная в виде многоуровневой схемы. При создании АРМ в качестве перспективного принимается сервис-ориентированный подход, обеспечивающий гибкость, управляемость и масштабируемость АРМ. Направление дальнейших исследований заключается в детализации требований и выработке вариантов АРМ с реализацией интерфейсов и протоколов взаимодействия.

УДК 621.391.266

## СИСТЕМА ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ХИРУРГА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТРАНСУРЕТРАЛЬНОЙ РЕЗЕКЦИИ ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

**М. А. Егошин,**

аспирант

**Р. Г. Хафизов,**

доктор техн. наук, профессор

**Ю. Е. Гарипова,**

канд. техн. наук, старший преподаватель

Марийский государственный технический университет

Представлена система информационной поддержки хирурга при выполнении трансуретральной резекции предстательной железы, основанная на методах обработки сложных биомедицинских изображений. Рассмотрены подходы к обработке изображений предстательной железы методами согласованной и инверсной фильтрации.

**Ключевые слова** — трансуретральная резекция, предстательная железа, биомедицинские изображения, согласованная фильтрация, инверсная фильтрация.

### Введение

Значительный объем в структуре медико-биологических исследований составляют изображения, представляющие двумерные случайные поля [1]. Система анализа подобных биомедицинских изображений включает, как правило, три сопряженных блока: оптическое устройство, формирующее изображение; блок передачи и хранения информации и ЭВМ. С помощью оптического устройства изображение снимается с поверхности образца. Поскольку отражение и поглощение света для различных областей изображения вследствие особенностей в плотности, толщине и химическом составе различное, изображение получается полутонкое. Видеокамерой оно передается в персональный компьютер, где и анализируется программой.

Сущность методики трансуретральной резекции предстательной железы заключается в удалении некоторого объема простаты в целях восстановления мочеиспускательной функции. Выполнение подобных операций затруднено отсутствием достаточной видимости оперируемого поля. Поэтому стоит задача создания объективных методов контроля над положением хирургического инструмента [2].

В работах [2–4] представлен подход к обработке изображений предстательной железы при про-

ведении трансуретральной резекции. Под обработкой изображений для целей навигации во время операции понималось прослеживание траектории движения хирургического инструмента в теле предстательной железы. Прослеживание траектории движения сводится к решению задачи обнаружения одноименных фрагментов в соседних кадрах изображений предстательной железы. При этом производится оценка параметров смещения фрагмента в плоскости кадра и изменения масштаба [3, 4].

Задачу поиска одноименных фрагментов в соседних кадрах изображения  $s(x, y)$  можно рассматривать как частный случай обнаружения изображения объекта. Задача обнаружения изображения объекта формулируется следующим образом: на вход обнаружителя подается либо зашумленное, либо шумовое изображение и на основании априорной информации о статистических свойствах шума исходного и зашумленного сигналов, а также величины меры схожести  $\eta$  зашумленного и эталонного сигналов решающее устройство обнаружителя принимает решение.

### Структура биотехнической системы

Структура биотехнической системы для трансуретральной резекции предстательной железы,

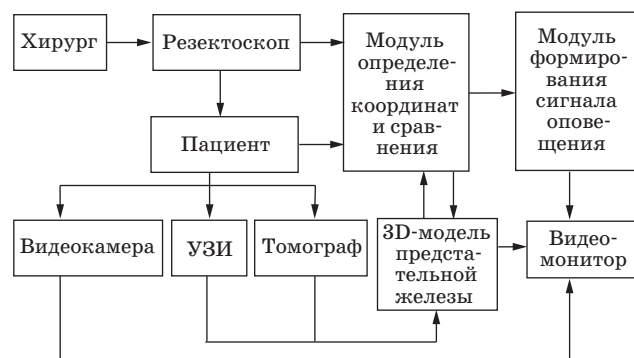
осуществляющей этапы подготовки и проведения операции, представлена на рис. 1.

На этапе подготовки к операции выполняется описание истории болезни, обследование пациента, предусматривающее анализ структуры предстательной железы при помощи интроскопических методов исследования, например компьютерной томографии.

Далее осуществляется построение трехмерной модели капсулы предстательной железы на основе данных компьютерного томографа или анализа размеров и формы простаты на УЗ-изображениях. В формирователе 3D-модели осуществляется анализ границ исследуемого органа методами контурного анализа в каждом отдельном срезе. С учетом расстояния между срезами производится расчет координат каждой точки, принадлежащей капсуле предстательной железы, в трехмерном пространстве.

Во время хирургического вмешательства существует обратная связь с пациентом. Контролируют проведение операции программно, используя построенную виртуальную модель предстательной железы. В режиме реальной операции изображение с микроскопической видеокамеры подается на монитор. Здесь также анализируется местоположение резектоскопа при помощи модуля определения координат. В данном режиме модуль сравнения анализирует разницу между координатами резектоскопа и капсулы предстательной железы, которые вычисляются при построении виртуальной модели органа. Если разница достигает критического уровня, модуль формирования сигнала оповещения извещает хирурга о достижении им критической зоны.

Модуль определения координат является одним из ключевых узлов биотехнической системы информационной поддержки хирурга при проведении операции. В основу работы данного модуля заложены методы обработки и анализа изобра-



■ **Рис. 1.** Структура биотехнической системы для трансуретральной резекции предстательной железы

жений предстательной железы, сформированные видеокамерой резектоскопа.

### Обработка изображений предстательной железы методом согласованной фильтрации

Общее решение задачи оптимальной обработки зашумленных изображений предполагает наличие следующих априорных данных: законов распределения вероятностей значений шума, зашумленного и эталонного (исходного) изображений, их числовых характеристик, значений штрафов за вынесенные правильные и ложные решения, значений априорных вероятностей наличия или отсутствия искомого фрагмента в сцене, а также допустимых значений вероятностей ложных тревог. Наличие всей информации при решении реальных задач, связанных с обработкой изображений, представляет собой редкую ситуацию. Обычно в первую очередь жертвуют знанием априорных вероятностей, предполагая их равными друг другу, и исключают штрафы за правильные решения. В любом случае, корректное и эффективное решение задачи невозможно без учета статистических свойств мешающих факторов.

Когда шум имеет равномерную спектральную плотность и распределен по нормальному закону, алгоритм обработки оказывается довольно простым. Достаточная статистика для принятия решения при этом вырабатывается линейным фильтром, характеристики которого согласованы с характеристиками обрабатываемого изображения.

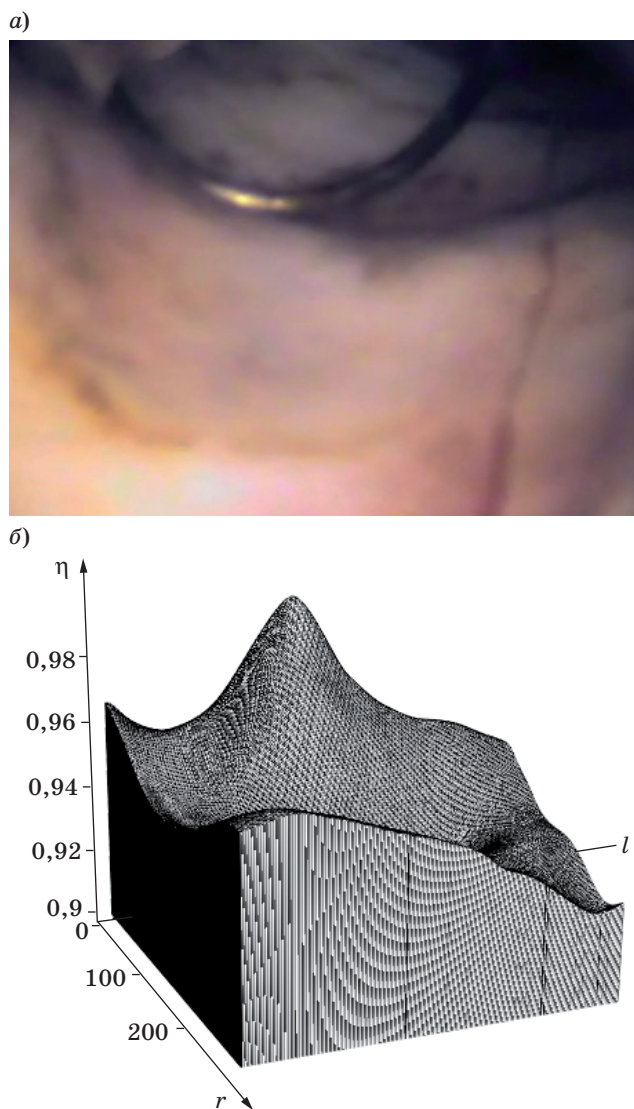
При обнаружении роль шума выполняют отсчеты яркостей фона, окружающего обнаруживаемое изображение объекта. Сложность решения задачи обнаружения применительно к рассматриваемой в работе задаче определяется плохо структурированным фоном. Его статистика отличается большой пространственной неоднородностью, по крайней мере, относительно первого начального и второго центрального моментов. Данное обстоятельство приводит к необходимости разбивать анализируемую сцену на ряд непересекающихся областей, для которых характерна статистическая однородность. Таким образом, задача обнаружения становится нерегулярной по изображению, которое разбивается на ряд статистических локально-однородных областей. Работа обнаружителя также затрудняется отсутствием априорной информации об обнаруживаемых объектах.

В работах [3, 4] представлен подход к решению задачи обнаружения фрагмента изображения по результатам работы согласованного фильтра. Для этого на изображении, полученном в момент времени  $(t - \Delta t)$ , выбирается фрагмент  $s(x, y)$  и в ре-

жиме обнаружения производится обработка текущего изображения  $f(x, y)$ . В режиме поиска окно фильтра перемещается в пределах изображения  $f(x, y)$  и на каждом шаге производится вычисление отклика согласованного с фрагментом фильтра:

$$\eta(l, r) = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} s(x, y) f(x+l, y+r). \quad (1)$$

В случае если отклик согласованного фильтра больше его значения, рассчитанного в предыдущем такте сравнения, то он будет записан в память, а также координаты, соответствующие этому значению. Эти координаты далее используются для расчета смещения фрагмента в плоскости кадра. На рис. 2, а представлен пример изображения предстательной железы, а на рис. 2, б —



■ Рис. 2. Изображение предстательной железы (а) и отклик согласованного с фрагментом изображения фильтра (б)

отклик согласованного с фрагментом изображения фильтра в некоторый фиксированный момент времени  $t_0$ .

Выходной сигнал фильтра  $\eta(l, r)$  сравнивается с пороговым уровнем  $\alpha$ , и если  $\eta(l, r) \geq \alpha$ , то принимается решение об обнаружении изображения объекта заданного класса. Величина порогового уровня определяется принятым критерием обнаружения и в самом общем случае определяется вероятностями наличия и отсутствия в кадре изображения обнаруживаемого объекта и значениями допустимых вероятностей правильных и ложных решений.

Таким образом, задача обнаружения изображения фрагмента заданного класса сводится к синтезу согласованного фильтра, формирующего достаточную статистику (меру схожести)  $\eta(l, r)$ , и к сравнению этой статистики с пороговым уровнем.

Анализируя результат, представленный на рис. 2, б, можно отметить, что область, примыкающая к пиковому отсчету согласованного фильтра, является сглаженной. Воздействие шума может привести к возникновению погрешности оценки координат смещения фрагмента от кадра к кадру, которая, в свою очередь, приводит к неправильному прослеживанию траектории движения хирургического инструмента.

### Обработка биомедицинских изображений методом инверсной фильтрации

Для устранения указанного недостатка предлагается использовать метод инверсной фильтрации на том основании, что искомый фрагмент и окружающий его «фон» являются сходными в энергетическом смысле. В соответствии с определением, данным в работе [5], сходными в энергетическом смысле являются объекты, функции которых имеют пропорциональные (или равные) распределения спектральной плотности мощности по частотам.

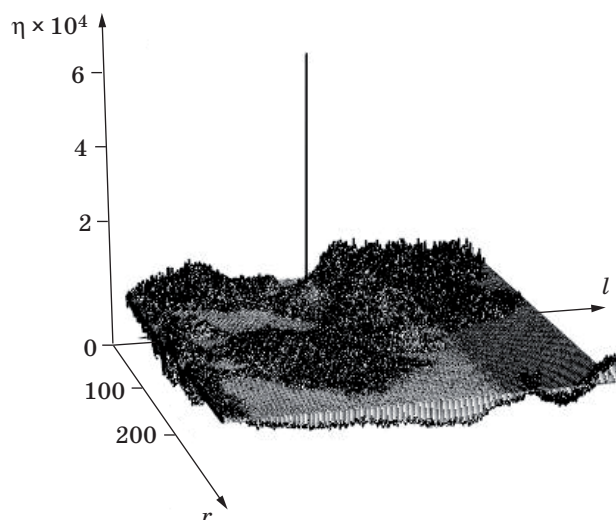
В этом случае передаточная функция оптимального фильтра будет равна

$$H(\omega_x, \omega_y) = C/S(\omega_x, \omega_y), \quad (2)$$

где  $C$  — множитель, характеризующий интенсивности фона и случайного шума;  $S(\omega_x, \omega_y)$  — спектральная плотность фрагмента  $s(x, t)$ . В отличие от обычного согласованного фильтра, имеющего передаточную функцию, прямо пропорциональную комплексно-сопряженному спектру объекта:

$$H(\omega_x, \omega_y) = CS^*(\omega_x, \omega_y), \quad (3)$$

фильтр с передаточной функцией вида (2) осуществляет пропускание пространственно-частотных спектральных составляющих по кривой, обратной к спектру опознаваемого объекта, и поэто-

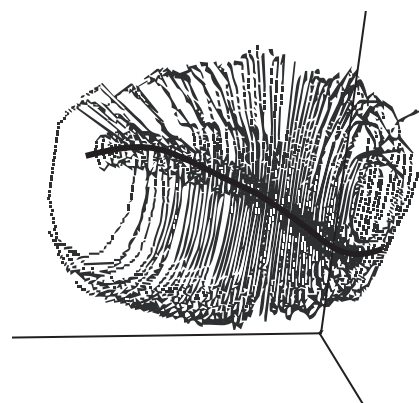


■ Рис. 3. Отклик инверсного фильтра

му называется инверсным [5]. Из сопоставления выражений (2) и (3) видно, что амплитудно-частотная характеристика инверсного фильтра обратно пропорциональна амплитудно-частотной характеристике согласованного фильтра, а их фазочастотные характеристики совпадают.

Теоретически инверсный фильтр дает бесконечное значение отношения сигнал/помеха, так как отклик на полезный сигнал у него равен  $\delta$ -функции. Бесконечное значение отношения сигнал/помеха получается из-за того, что передаточная функция (2) соответствует фильтру с бесконечно широкой полосой пропускания. На практике ширина полосы пропускания всегда конечна, что является следствием конечной области интегрирования, которая, в свою очередь, ограничена размерами апертуры пространственного фильтра. На рис. 3 представлен отклик инверсного фильтра при обработке изображения, показанного на рис. 2, а.

По результатам обработки изображений на экране видеомонитора отображается траектория



■ Рис. 4. Траектория движения резектоскопа в теле предстательной железы

движения резектоскопа в теле предстательной железы (рис. 4).

### Заключение

Современные методы слежения за хирургическим инструментом в теле органа при выполнении малоинвазивных операций требуют применения дополнительных навигационных устройств, которые осложняют процесс выполнения хирургического вмешательства. В данной работе представлена система информационной поддержки хирурга при выполнении трансуретральной резекции предстательной железы, основанная на методах обработки сложных биомедицинских изображений. Интраоперационная навигация при трансуретральной резекции, основанная на совмещении 3D-изображения предстательной железы с видеоэндоскопическими данными, позволяет повысить точность манипуляций хирурга и тем самым снизить число операционных осложнений. Представленная в работе система прошла апробацию в урологическом отделении Республиканской клинической больницы Республики Марий Эл (г. Йошкар-Ола).

### Литература

1. Ахутин В. М. Биотехнические системы: Теория и проектирование. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. — 220 с.
2. Хафизов Р. Г., Дубровин В. Н., Третьякова Ю. Е. Анализ сопряженных пространственных статических и динамических сцен при проведении трансуретральной резекции предстательной железы в режиме предварительного осмотра // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 3. С. 14–20.
3. Гарипова Ю. Е., Хафизов Р. Г. Обработка динамических изображений для решения задач навигации

при проведении трансуретральной резекции предстательной железы // Медицинская техника. 2010. № 4. С. 17–20.

4. Гарипова Ю. Е., Хафизов Р. Г. Траекторная обработка динамических изображений предстательной железы для решения задачи навигации резектоскопа при выполнении трансуретральной резекции // Биотехносфера. 2010. № 3. С. 50–54.
5. Василенко Г. И. Голографическое опознавание образов. — М.: Сов. радио, 1977. — 328 с.

УДК 330.101.5

## ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ РИСКА НЕУСПЕХА РЕШЕНИЯ ТРУДНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

**Е. Д. Соложенцев,**

доктор техн. наук, профессор

**С. В. Яценко,**

студентка

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Предложена структурная модель риска неуспеха решения трудных экономических проблем, в которой субъекты (государство, бизнес, банки, ученые, общественное мнение) и объекты-задачи логически связаны как события. Приведены сценарии, логическая и вероятностная модели риска. Показано, что без ученых, И<sup>3</sup>-технологий и общественного мнения невозможно эффективно решить трудные экономические проблемы России.

**Ключевые слова** — логическая модель, вероятностная модель, риск, неуспех, экономика, событие, государство, бизнес, банки, ученые, общественное мнение, взятки, коррупция.

### Введение

Анализ экономических проблем и методик их решения в условиях глобализации мирового рынка, кризиса и реформ выполнен по работам ряда крупных ученых. Так, академик В. М. Полтерович предлагает планы выхода России из экономического кризиса и ее развития в виде постепенных консервативных реформ [1]. Академик А. И. Татаркин и член-корреспондент РАН Р. С. Гринберг оценивают социально-экономические последствия присоединения России к ВТО и излагают методы диагностирования экономической безопасности регионов [2].

Названные работы имеют большое значение, но не используют адекватный математический аппарат для анализа и управления риском и эффективностью процессов и систем. В работах не обсуждаются также модели для эффективного управления предприятиями и компаниями, хотя именно они составляют основу экономики страны.

Лауреат Нобелевской премии Дж. Бьюкенен [3] рассматривает модель устойчивого развития государства на основе теории игр двух субъектов в экономике и политике. Однако успех решения трудных проблем определяет большее число субъектов, и теория игр не адекватна поведению сложных систем.

Академик В. Л. Макаров и доктор техн. наук А. Р. Бахтизин [4] дают оценку новому инструменту в общественных науках — агент-ориен-

тированным моделям для получения знаний об обществе и моделирования социальных систем. Однако этот инструмент может быть использован в ограниченном числе случаев.

Профессор И. А. Рябинин разработал логико-вероятностное исчисление (ЛВ-исчисление) для решения проблем надежности и безопасности в технике [5]. Им разработаны методы вычисления булевой разности, веса, значимости и вклада инициирующего события. Предложенный аппарат является аналогом вычисления производных в математическом анализе, где Л-переменные принимают только два значения: 0 и 1. Однако в экономике переменные принимают большое число значений.

Некоторые ученые-экономисты [6] утверждают, что экономическая наука подошла к естественному рубежу, за которым ничего конструктивного нет.

На основе анализа установлена актуальность задачи создания методики, модели, технологии и программных средств для решения трудных экономических проблем с использованием адекватного математического аппарата и И<sup>3</sup>-технологий [7, 8]. В трудных проблемах сложные события состоят из событий организационных и решения экономико-математических задач. Последние к тому же имеют астрономическую вычислительную сложность.

И<sup>3</sup>-технологии строят Л-модель риска неуспеха решения трудной экономической проблемы,

элементы которой есть субъекты: государство, бизнес, банки, ученые, общественное мнение и задачи, составляющие суть проблемы.

**ЛВ-модель решения трудной экономической проблемы**

В модели риска неуспеха решения трудной экономической проблемы (рис. 1) или реализации технического проекта сценарий события неуспеха проблемы *DP* (*difficulty problem*) формулируется так: неуспех события *DP* происходит из-за неуспеха событий *S* (*subjects*) И (логическое) событий *T* (*objects-tasks*).

Успех события *S* зависит от успеха событий *S*<sub>1</sub>, *S*<sub>2</sub>, ..., *S*<sub>*n*</sub> (государства, бизнеса, банков, разработчиков И<sup>3</sup>-технологий (ученых), общественно-го мнения). Успех события *T* зависит от успеха решения задач *T*<sub>1</sub>, *T*<sub>2</sub>, ..., *T*<sub>*m*</sub>.

Таким образом, «субъекты» определяют, кто решает трудную проблему *DP*, а «объекты» — какие задачи решаются в проблеме *DP*. Обозначим *DP*, *S*, *T*, *S*<sub>1</sub>, *S*<sub>2</sub>, ..., *S*<sub>*n*</sub>, *T*<sub>1</sub>, *T*<sub>2</sub>, ..., *T*<sub>*m*</sub> как события и соответствующие Л-переменные.

Логические функции неуспеха событий:

$$DP = S \wedge T; \tag{1}$$

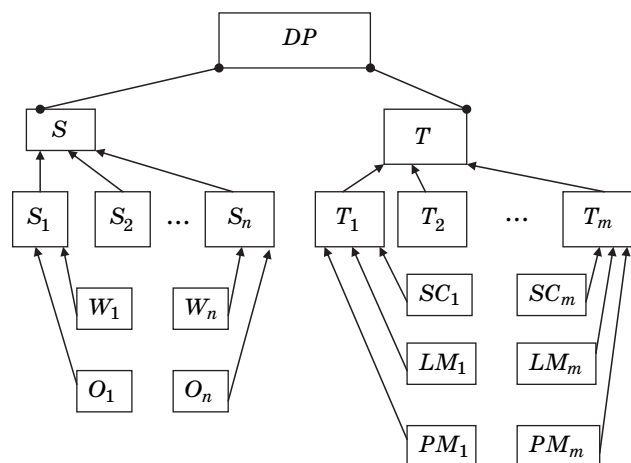
$$S = S_1 \vee S_2 \vee \dots \vee S_n; \tag{2}$$

$$T = T_1 \vee T_2 \vee \dots \vee T_m. \tag{3}$$

Вероятностные функции неуспеха событий:

$$P\{DP = 0\} = P\{S = 0\} \cdot P\{T = 0\}; \tag{4}$$

$$P\{S = 0\} = P\{S_1 = 0\} + P\{S_2 = 0\}(1 - P\{S_1 = 0\}) + P\{S_3 = 0\}(1 - P\{S_1 = 0\})(1 - P\{S_2 = 0\}) + \dots; \tag{5}$$



■ **Рис. 1.** Структурная модель неуспеха решения трудной проблемы: — — логическая связь ИЛИ; —●— логическая связь И

$$P\{T = 0\} = P\{T_1 = 0\} + P\{T_2 = 0\}(1 - P\{T_1 = 0\}) + P\{T_3 = 0\}(1 - P\{T_1 = 0\})(1 - P\{T_2 = 0\}) + \dots \tag{6}$$

**Субъекты.** Представим *S*<sub>1</sub>, *S*<sub>2</sub>, ..., *S*<sub>*n*</sub> как сложные события в виде Л-сложения событий «отсутствие желания» (*wishes*) *W*<sub>1</sub>, *W*<sub>2</sub>, ..., *W*<sub>*n*</sub> и «отсутствие возможностей» (*opportunities*) *O*<sub>1</sub>, *O*<sub>2</sub>, ..., *O*<sub>*n*</sub>. Обозначим их как Л-переменные, имеющие вероятности. Например, для *S*<sub>1</sub> вводятся события *W*<sub>1</sub> и *O*<sub>1</sub> с Л-связью ИЛИ. Отсутствие желания имеет свои мотивы. Отсутствие возможности — это отсутствие ресурсов, технологий и методик. Для событий *W*<sub>1</sub>, *W*<sub>2</sub>, ..., *W*<sub>*n*</sub>, *O*<sub>1</sub>, *O*<sub>2</sub>, ..., *O*<sub>*n*</sub> могут быть разработаны сценарии с Л-операциями И, ИЛИ, НЕТ.

Вероятности событий для субъектов определяются методом сводных показателей Н. В. Хованова с использованием нечисловой, неточной и неполной экспертной информации на программном комплексе АСПИД-3W [9].

**Объекты-задачи.** Задачи *T*<sub>1</sub>, *T*<sub>2</sub>, ..., *T*<sub>*m*</sub> описываются как ЛВ-модели риска. Последовательно для каждой *i*-задачи (например, *T*<sub>1</sub> — противодействие взяткам и коррупции в учреждении, *T*<sub>2</sub> — противодействие взяткам и мошенничествам чиновников, *T*<sub>3</sub> — противодействие взяткам при обслуживании) строят (см. рис. 1) сценарий (*Scenario*) риска *SC*<sub>*i*</sub>, Л-модель риска *LM*<sub>*i*</sub> и В-модель риска *PM*<sub>*i*</sub>.

Неуспех решения задач *T*<sub>1</sub>, *T*<sub>2</sub>, ..., *T*<sub>*m*</sub> и неуспех разработки сценариев *SC*, Л-моделей *LM* и В-моделей *PM* рассматриваются как события и обозначаются Л-переменными с теми же идентификаторами.

Логико-вероятностные модели строят по сценарию *SC* риска с Л-связями И, ИЛИ, НЕТ между событиями, который разрабатывают специалисты [5, 8]. По сценарию просто записать Л-модель риска *LM* и далее построить В-модель риска.

Вероятности событий определяют решением задачи идентификации по статистическим данным. Применяются специальные программные средства, так как задачи построения ЛВ-модели риска и анализа риска отличаются большой вычислительной сложностью.

**Проблема противодействия взяткам и коррупции**

**Субъекты.** Рассмотрим пример ЛВ-модели риска неуспеха противодействия взяткам и коррупции. Она проста и компактна в математической записи. Сценарий для построения модели следующий. Риск неуспеха события *S* зависит от риска неуспеха событий для ряда субъектов, а именно (см. рис. 1): Государства *S*<sub>1</sub> ИЛИ Бизнеса *S*<sub>2</sub> ИЛИ Служб экономических преступлений



$S_3$  ИЛИ Разработчиков И<sup>3</sup>-технологий  $S_4$  ИЛИ Общественного мнения  $S_5$ . Заглавное ИЛИ означает Л-операцию, а события неуспеха субъектов — Л-переменные.

Логическая функция и В-функция риска неуспеха события  $S$  для случая  $n = 5$  аналогичны выражениям (2) и (5). Если принять риски событий неуспеха  $S_1, S_2, \dots, S_5$  равными  $P_1 = P_2 = \dots = P_5 = 0,5$  (нейтральная позиция), то риск неуспеха события  $S$  велик — 0,96875. Риск неуспеха также велик, если риски для событий равны, например, 0,2. Тогда риск неуспеха события  $S$  равен 0,673.

Представим событие неуспеха субъекта  $S_j$  как сложное событие в виде Л-сложения событий «отсутствие желаний»  $W_j$  и «отсутствие возможностей»  $O_j$ , имеющих вероятности. Риски неуспеха событий, зависящих от критериев «отсутствие желаний» и «отсутствие возможностей», естественно, разные. Некоторые субъекты могут вообще не желать решения проблемы. Не случайно в работе Дж. Бьюкенена рассматривается ситуация, когда государство считает выгодным сотрудничать с коррупцией [3]. Поэтому необходимы желания и возможности ученых и общественно-непрофессиональным правительством или его сотрудничеством с коррупцией.

Сценарии риска неуспеха события  $DP$  для субъектов с их желаниями  $W$  и возможностями  $O$  приведены в работе [8].

**Задачи  $T$  трудной экономической проблемы противодействия взяткам и коррупции** следующие:

$T_1$  — противодействие взяткам и коррупции в учреждении;

$T_2$  — противодействие мошенничествам, воровству и взяткам чиновников;

$T_3$  — противодействие взяткам при обслуживании.

При решении названных задач используются статистические данные и ЛВ-модели риска. Задачи  $T_1, T_2, T_3$  имеют большую вычислительную сложность. Решение этих задач рассмотрено в работе [8].

**Обсуждение.** Риск неуспеха решить проблему противодействия взяткам и коррупции велик — 0,991. Без изменения политики государства и поведения бизнеса, привлечения И<sup>3</sup>-технологий, ученых и общественного мнения актуальную для страны проблему не решить. Успех решения проблемы противодействия взяткам и коррупции возможен при разных стратегиях. Это или установление диктатуры времен И. Сталина, или существование влиятельного общественного мнения (демократии и сильной оппозиции), как в западных странах, или введение смертной казни,

как в Китае, или отрубание рук, как в мусульманских странах. И<sup>3</sup>-технологии с ЛВ-моделями риска и базами знаний предлагают западный путь с прозрачными и контролируемыми общественностью решениями задач противодействия взяткам и коррупции.

### Противодействие взяткам и коррупции в учреждении

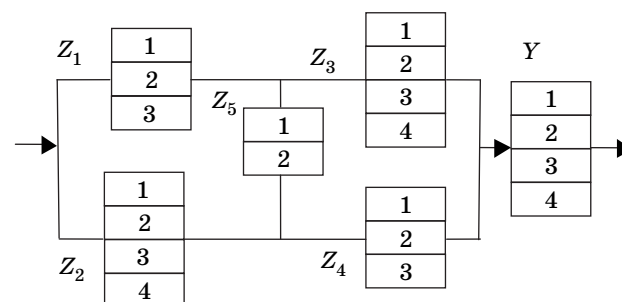
Учреждение принимает решения по неким проектам  $Y$  (делам граждан). Проектов много, и для каждого известно, был ли он успешным ( $Y = 1$ ) или неуспешным ( $Y = 0$ ). Неуспех проектов объясняется необоснованной выдачей разрешения или ресурсов из-за взяток. Элементами сценария риска взяток являются отделы  $Z_1, \dots, Z_j, \dots, Z_n$ , каждый из которых имеет  $N_1, \dots, N_j, \dots, N_n$  чиновников, принимающих решения. Отделы  $Z_1, \dots, Z_j, \dots, Z_n$  связаны Л-связями ИЛИ, И, НЕТ. Чиновник из  $Z_{j1}, \dots, Z_{jr}, \dots, Z_{jn_j}$  отдела  $j$ , принимая решение, ставит визу на соответствующем документе. Число разных комбинаций взяток

$$N_{\max} = N_1 N_2 \dots N_j \dots N_n. \quad (7)$$

Рассмотрим ЛВ-модель риска взяток на примере условного учреждения (рис. 2), которое имеет пять отделов  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5$ . Чиновники из  $Z_1$  и  $Z_2$  проверяют бизнес-проекты, а чиновники из  $Z_3$  и  $Z_4$  принимают решения об объеме финансирования. Начальники из  $Z_5$  «руководят» процессом. Клиент идет к одному из начальников, который за взятку направляет его к чиновникам из групп  $Z_1 - Z_4$ , которые берут взятки.

Логическая функция риска взяток в совершенной дизъюнктивной нормальной форме содержит  $N_{\max}$  Л-слагаемых. В действительности Л-функцию можно записать проще, если учесть связи отделов учреждения.

Здесь чиновники из  $Z_1$  и  $Z_2$  проверяют обеспечение кредитов, а чиновники из  $Z_3$  и  $Z_4$  принимают решения о размере и сроках кредита. Чиновники (начальники) из  $Z_5$  «руководят» процессом.



■ Рис. 2. Структурная модель риска взяток в учреждении

Клиент идет к одному из начальников, который за взятку направляет его к чиновникам из групп  $Z_1 - Z_4$ , которые берут взятки.

Логическая модель риска взяток на основе кратчайших путей успешного функционирования системы со взятками запишется так:

$$Y = Z_1 Z_3 \vee Z_2 Z_4 \vee Z_1 Z_5 Z_4 \vee Z_2 Z_5 Z_3. \quad (8)$$

Вероятностная модель риска взяток после ортогонализации (8) на программном комплексе «Арбитр», разработанном А. С. Можаяевым [10], запишется так:

$$P = p_2 p_4 + p_1 p_3 + q_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + p_1 q_2 q_3 p_4 p_5 - p_1 p_2 p_3 p_4. \quad (9)$$

Идентификация ЛВ-модели взяток заключается в решении задачи оптимизации алгоритмическим итеративным методом для определения вероятностей  $P_{jr}$ ,  $j = 1, \dots, n$ ;  $r = 1, \dots, N_j$  (с которыми чиновники берут взятки) по статистике фактов взяток, установленных судом. Выдача креди-

тов оформлена документами, где зафиксированы визы чиновников.

**Пример.** Для идентификации В-модели риска взяток в банке использована статистика из 1000 кредитов, из которых 700 были хорошими и 300 плохими (средний риск взяток  $P_{av} = 300/1000 = 0,3$ ). Использовался специальный программный комплекс, разработанный в ИПМаш РАН [8]. Пять признаков имеют от 4 до 11 градаций — всего 40 градаций. В результате идентификации В-модели риска взяток определены вероятности  $P_{jr}$  для всех чиновников и подсчитаны характеристики ЛВ-модели риска взяток (табл. 1 и 2). Сумма вероятностей-частот  $P_{2jr}$  событий-градаций для чиновников отдела равна 1. Вероятности взяток у чиновников  $P_{jr}$  отличаются более чем в 10 раз. Наибольшие средние вероятности  $P_{jm}$  имеют отделы 1 и 4. Эти же отделы вносят наибольшие вклады в средний риск  $P_m$ . Вероятности взяток отделов  $P_{jm}$  отличаются в 2 раза.

### Противодействие взяткам при обслуживании

Риск взяток может быть вычислен по статистическим данным по параметру обслуживания, например времени решения чиновником (учреждением) проблемы клиента от поступления заявки до принятия решения.

Параметр обслуживания может иметь непрерывные или дискретные значения. В обоих случаях с целью использовать аппарат ЛВ-исчисления будем строить дискретное распределение на выбранных интервалах разбиения значений параметра. Каждому интервалу со средним значением параметра на нем присваивается номер градации. Градации составляют группы несовместных событий. Вероятности событий-градаций определяются по формуле

$$P_j = N_j / N, \quad (10)$$

где  $N_j$  — число параметра в статистике с градацией;  $N$  — размер статистики.

Параметр обслуживания  $Y$  имеет допустимое значение  $Y_{ad}$ . Вероятность  $P\{Y < Y_{ad}\}$  назовем риском взятки. Сценарий взятки: если параметр обслуживания меньше допустимого значения, то имеется подозрение на взятку.

Для параметра обслуживания при заданном риске могут быть вычислены: допустимое значение  $Y_{ad}$ , число значений в «хвосте» распределения  $N_{ad}$  и энтропия вероятностей параметра в «хвосте» распределения  $H_{ad}$ .

**Пример.** Для приема в детский сад предъявляются документы:

- заявление от родителей о приеме в детский сад;

■ Таблица 1. Средние вероятности взяток для групп чиновников

Группа $j$	Вероятность $P_{jm}$	Вероятность $P_{2jm}$	Число чиновников $N_j$
1	0,478113	0,25	4
2	0,348310	0,1	10
3	0,298833	0,2	5
4	0,388857	0,0909	11
5	0,291868	0,1	10

■ Таблица 2. Вероятности взяток чиновников

Номер градации	Вероятность $P_{1r}$	Частота $P_{21r}$
Группа $Z_1$		
1	1,0	0,274
2	0,596084	0,269
3	0,248278	0,063
4	0,070927	0,394
Группа $Z_2$		
1	0,0	0,0
2	0,687703	0,014
3	0,227359	0,002
4	1,0	0,054
5	0,510577	0,017
6	0,704722	0,086
7	0,570149	0,057
8	0,448856	0,224
9	0,434821	0,187
10	0,001675	0,359

- свидетельство о рождении ребенка;
- паспорт одного из родителей;
- документ, подтверждающий льготу (*benefit*);
- медицинская карта.

Имелись статистические данные по приему детей в детский сад. Всего было принято 50 детей с временем ожидания в очереди от 1 дня до 400 дней. По статистическим данным построена гистограмма распределения для параметра обслуживания  $Y$  — времени ожидания. Используется информация о документе, подтверждающем льготу.

Определены следующие оценки параметров статистики приема детей:

$Y_{\min} = 1, Y_{\max} = 400$  — минимальное и максимальное время ожидания;

$Y_{av} = 60,2$  — среднее время ожидания (*average*);

$\sigma = 9,9$  — среднеквадратическое отклонение;

$N^{ben} = 7$  — число принятых в садик детей

с льготой (*benefit*);

$Y_{\min}^{ben} = 21, Y_{\max}^{ben} = 156$  — минимальное и максимальное время ожидания с льготой;

$Y_{av}^{ben} = 62$  — среднее время ожидания детей с льготой.

Рассматриваемый период  $\{1, 400\}$  разбит на интервалы по 15 дней (столбец 2 в табл. 3) и подсчитано число дней  $N_j, j = 1, 2, 3, \dots$ , попавших в интервалы (столбец 3). Вероятность попадания в интервал (столбец 4) вычисляется по формуле (10).

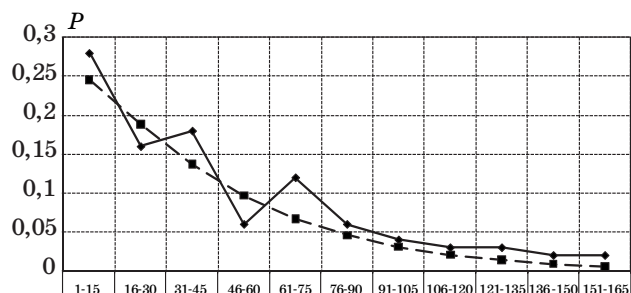
Сумма вероятностей по первым пяти интервалам уже близка к 1. Для дискретного распределения параметра обслуживания  $Y$  может быть выбран закон Вейбулла

$$f(x, \alpha, \beta) = (\alpha/\beta^\alpha)x^{\alpha-1} \exp(-(x/\beta)^\alpha) \quad (11)$$

с параметрами  $\alpha = 1,118; \beta = 2,988$ . Закон Вейбулла (рис. 3) используют в задачах надежности с наибольшей интенсивностью отказов в начале распределения.

■ Таблица 3. Зависимость между параметрами риска  $N_j, P_j, Y_{ad}, N_{ad}$  и  $Risk$

№ пп.	Интервал ожидания приема, дн.	Число принятых в интервале, $N_j$	Вероятность принятия в интервале, $P_j$	Допустимое значение параметра, $Y_{ad}$	Число принятых со взяткой, $N_{ad}$	Риск взятки $Risk$
1	2	3	4	5	6	7
1	1 – 15	14	0,28	15	14	0,28
2	16 – 30	8	0,16	30	22	0,44
3	31 – 45	9	0,18	45	31	0,62
4	46 – 60	3	0,06	60	34	0,68
5	61 – 75	6	0,12	75	40	0,8



■ Рис. 3. Распределение Вейбулла для параметра обслуживания: — — реальные данные; - - - - модельные данные

Интервал времени ожидания приема детей с льготой  $\{21, 156\}$  находится не в начале интервала  $\{1, 400\}$ , а существенно смещен вправо именно из-за взяток: некоторых детей принимали в садик за взятку за меньшее время за счет мест детей с льготами. Здесь мы исследуем «голову» распределения.

Обозначим допустимое значение параметра обслуживания  $Y_{ad}$  (столбец 5) и будем считать, что если для параметра обслуживания

$$Y < Y_{ad}, \quad (12)$$

то дети принимались в детский сад за взятку.

Число детей  $N_{ad}$ , принятых за взятку, подсчитывается суммированием при выполнении условия (12) (столбец 6). Риск подозрения на взятку (столбец 7)

$$Risk = N_{ad}/N. \quad (13)$$

Введем в ЛВ-модель риска взяток следующие параметры, описывающие прием ребенка в детский сад: параметр обслуживания  $Y$ , параметр  $Z_1$  — наличие справки о льготе (две градации) и параметр  $Z_2$  — лицо в администрации, ставившее визу на заявлении родителя (три градации: директор детского сада, зам. директора, начальник над директором). Используем для параметра обслуживания  $Y$  в соответствии с (12) всего две градации (0 — обслуживание со взяткой, 1 — обслуживание без взятки) и перейдем к уже знакомой нам модели риска в классификации. Тогда при заданном параметре эффективности  $Y_{ad}$  можно определить, кто из администрации с какой вероятностью берет взятки.

### Заключение

Основные результаты настоящей работы следующие.

Предложена структурная модель риска неуспеха решения трудных экономических проблем,

в которой субъекты (государство, бизнес, банки, ученые, общественное мнение) и задачи, составляющие суть проблемы, логически связаны как события.

Описаны сценарии и разработаны логическая и вероятностная модели риска неуспеха решения трудных экономических проблем. Показано, что без ученых, И<sup>3</sup>-технологий и общественного мнения невозможно эффективно решить трудные экономические проблемы России.

Приведены примеры ЛВ-моделей риска неуспеха решения двух задач противодействия взяткам и коррупции.

И<sup>3</sup>-технологии со временем могут стать основой постановки и решения трудных проблем. Предлагается целесообразным создавать научные центры и наукограды не только по проблемам нанотехнологий и наноматериалов, но и по всегда существовавшим проблемам управления риском и эффективностью тысяч объектов и систем в экономике.

## Литература

1. Полтерович В. М. Элементы теории реформ. — М.: Экономика, 2007. — 447 с.
2. Гринберг Р. С., Татаркин А. И. Оценка социально-экономических последствий присоединения России к ВТО. — М.: Экономика, 2007. — 534 с.
3. Бьюкенен Дж. Избранные труды (Смерть Запада и др.). — М.: Альфа пресс, 1997. — 360 с.
4. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р. Новый инструмент в общественных науках — агент-ориентированные модели: общее описание и конкретные примеры // Экономика и управление. 2009. № 12 (59). С. 13–25.
5. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. 2-е изд. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. — 276 с.
6. Балацкий Е. Б. Мировая экономическая наука на современном этапе: кризис или прорыв? // Научное ведение. № 2. 2001. С. 25–45.
7. Соложенцев Е. Д., Карасев В. В. И<sup>3</sup>-технологии для управления риском в экономике // Журнал экономической теории. № 2. 2010. С. 151–162.
8. Соложенцев Е. Д. И<sup>3</sup>-технологии для экономики. — СПб.: Наука, 2011. — 387 с.
9. Колесов Д. Н., Михайлов М. В., Хованов Н. В. Оценка сложных финансово-экономических объектов с использованием системы поддержки принятия решения АСПИД-3W: учеб. пособие / ОЦЭиМ. — СПб., 2004. — 64 с.
10. Поленин В. И., Рябинин И. А., Свиринов С. К., Гладкова И. П. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография / Под ред. А. С. Можяева. — СПб.: НИКА, 2011. — 416 с.

УДК 334.723.4

## ФОРМИРОВАНИЕ РИСК-ПРОФИЛЯ ПРОЕКТОВ ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА

**В. Ж. Дубровский,**

доктор экон. наук, профессор

**Е. А. Кузьмин,**

аспирант, младший научный сотрудник

Уральский государственный экономический университет

Показана сложная организационная структура для реализации проектов государственно-частного партнерства, определены основные виды проектов. Представлены авторские подход и инструменты оценки рисков проектов государственно-частного партнерства. Введено понятие ключевых показателей риск-эффективности, предложен базовый набор показателей риск-эффективности проектов государственно-частного партнерства, которые могут быть использованы в механизмах принятия управленческих решений на различных уровнях.

**Ключевые слова** — проектный риск-менеджмент, государственно-частное партнерство, оценка рисков, ключевые показатели риск-эффективности.

### Введение

В условиях перехода экономики к более высокому уровню развития — инновационной экономике — вопросы принятия решений с учетом рисков и неопределенности, проблема адекватной оценки рисков приобретают самостоятельное теоретическое и прикладное значение как важная составная часть теории и практики управления для субъектов экономических отношений, вовлеченных в процесс реализации проектов государственно-частного партнерства (ГЧП).

Это вызвано в первую очередь тем, что экономическую ответственность за принятые решения, как правило, несут субъекты экономических отношений, а государство принимает роль модератора процесса реализации проектов. При этом риски проектов распределены субсидиарно в соответствии с соотношением вложенного участниками капитала.

В связи с этим вопрос выявления, оценки и управления рисками представляет большой практический интерес для субъектов экономических отношений. Практическая актуальность данного вопроса предопределила необходимость дальнейшего теоретического исследования сущности риска и методов его исчисления.

### Риск-профиль проектов ГЧП

Систематизация позиций ряда ученых позволила сформулировать определение риска как вида неопределенности относительно результатов достижения субъектом целей конкретных операций, допускающего существование негативного для субъекта варианта развития событий. Риск составляет объективно неизбежный элемент принятия любого управленческого решения в силу того, что неопределенность выступает неотъемлемой характеристикой условий ведения бизнеса [1].

В процессе реализации проектов при ГЧП организационные структуры сталкиваются с достаточно широкой совокупностью различных проектных рисков. Это приводит к тому, что управление риском должно обеспечивать единую систему эффективных мер по преодолению негативных последствий каждого элемента указанной совокупности, тем самым управление должно носить комплексный, интегрированный характер по отношению ко всей совокупности рисков или портфелей рисков реализуемых проектов.

Необходимость использовать интегрированный подход в управлении портфелем рисков приводит к тому, что они исследуются на двух уровнях. Первый уровень — анализ и оценка рисков проектов по отдельности, что создает условия для

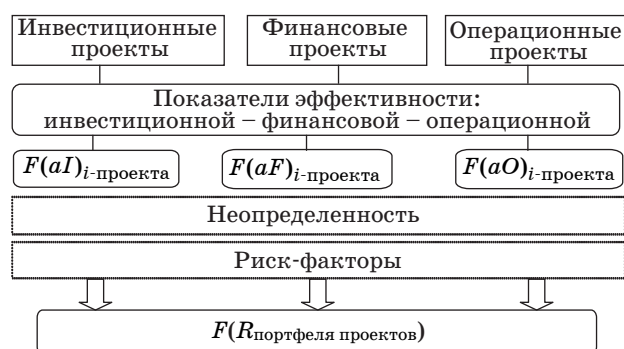
понимания особенностей той или иной рискованной ситуации либо специфики неблагоприятных последствий ее реализации. Подобный анализ дает возможность выбрать наиболее подходящие инструменты управления для каждого конкретного риска проекта.

Второй уровень — изучение рискованного портфеля в целом, что позволяет установить общее влияние рисков в сложных организационных структурах, реализующих проекты ГЧП. Это обеспечивает единый комплексный взгляд на риски проектов, а значит, и определение особенностей политики и концепции управления рисками в целом.

Несомненно, что система управления проектными рисками опирается на оба этих уровня и сочетает в себе инструменты и методы, характерные для каждого из них. Несоблюдение этого условия приведет к потере контроля и адекватности проводимой политики и, как следствие, к уменьшению финансовой, экономической и социальной эффективности.

Рассматривая структуру процесса интегрированного управления рисками проектов с точки зрения не только вертикального, но и горизонтального анализа, можно выделить три типа проектов как составных организационных элементов системы. В структуру организационных элементов входят последовательно три различных типа проектов, реализуемых при ГЧП: финансовые, инвестиционные и операционные (текущие). Предлагаемая базовая классификация проектов позволит выстроить логический алгоритм риск-анализа проектов ГЧП в специфике реализации различных проектов.

Изучение портфеля рисков проектов при реализации ГЧП в целом означает, что в исследовании рискованных ситуаций наряду с источниками неопределенности включен еще один аспект — степень взаимосвязи между рисками, т. е. степень корреляционной зависимости. Кроме того, риски могут иметь разную природу, что делает процесс управления портфелем таких рисков



■ Организационная структура, реализующая портфель проектов ГЧП

комплексным и требующим учета специфических внутренних связей между ними [2].

Оценка рисков проектов и формирование риск-профиля — это процесс представления качественного и количественного анализа идентификации рисков проектов и их определения в целях выработки адекватного управленческого воздействия. Такая оценка рисков проектов определяет степень важности риска и позволяет с ее помощью выбрать адекватный способ реагирования. Доступность сопровождающей информации помогает легче расставить приоритеты для разных категорий рисков проектов.

Комплексный подход к оценке риск-профиля проекта предполагает проведение оценки по двум направлениям — количественному и качественному [3].

Качественная оценка рисков проектов — это оценка условий возникновения рисков и определение их воздействия на проект стандартными методами и средствами. Использование этих средств помогает частично избежать неопределенностей, которые часто встречаются в проекте. Качественная оценка рисков проектов в большей степени подвержена субъективности, что значительно ухудшает итоговые показатели и усложняет принятие верного управленческого решения по воздействию на риски проектов. Однако в ряде случаев только с помощью методов качественной оценки рисков проектов возможно получить представление о текущем состоянии риск-профиля.

Количественная оценка рисков проектов определяет вероятность возникновения рисков и влияние их последствий на проект, что помогает верно принять управленческие решения.

Поскольку применение количественных методов оценки значительно превосходит показатели использования качественных средств и методов оценки рисков, то целесообразно представить авторское видение оценки риск-профиля проектов, реализуемых при ГЧП именно количественными методами.

$$F(aR)_{i\text{-проекта}} = F(aF)_{i\text{-проекта}} + F(aI)_{i\text{-проекта}} + F(aO)_{i\text{-проекта}}$$

или

$$F(aR)_{i\text{-проекта}} = \sum \beta_j \times Af_j + \sum \beta_j \times Ai_j + \sum \beta_j \times Ao_j,$$

$$\text{оптимальность } F(aR)_{i\text{-проекта}} \rightarrow \max,$$

где

$F(aR)_{i\text{-проекта}}$  — функция риск-профиля  $i$ -проекта;

$F(aF)_{i\text{-проекта}}$  — функция финансовой риск-эффективности  $i$ -проекта;

$F(aI)_{i\text{-проекта}}$  — функция инвестиционной риск-эффективности  $i$ -проекта;

$F(aO)_{i\text{-проекта}}$  — функция операционной риск-эффективности  $i$ -проекта;

$\beta_j$  — коэффициент при параметре показателя риск-эффективности;

$Af_j$  — параметр финансовой риск-эффективности;

$Ai_j$  — параметр инвестиционной риск-эффективности;

$Ao_j$  — параметр операционной риск-эффективности.

На основании авторского подхода функция оценки риска  $i$ -проекта представляет собой комбинацию трех функций показателей риск-эффективности, включающих соответственно показатели инвестиционной, финансовой и операционной риск-эффективности, взаимосвязь которых представлена на рисунке.

Функции риск-эффективности выражают зависимость уровня риска, присущего проекту, через параметры. В качестве параметров выступают различные характеристики процесса хозяйствования по выделенным направлениям (операционному, инвестиционному, финансовому). Складывающийся комплекс показателей в рамках направлений характеризуется в динамике конкретными значениями данных показателей, которые используются при практическом расчете и оценке уровня риск-эффективности проекта или портфеля проектов.

Использование коэффициента  $\beta_j$  в расчетах по функциям риск-эффективности не сопряжено с переводом от значений параметра к значениям показателя, так как коэффициент  $\beta_j$  является коэффициентом, отражающим зависимость между системой показателей и базовым результирующим эффектом, который определяет совокупный успех или его отсутствие в реализации проекта.

При этом расчеты и оценки уровня риска в рассматриваемой модели не определяют вероятность осуществления проекта, поскольку значения используемых показателей в ситуации максимальной полезности отражают прямую зависимость между функцией риск-эффективности и результирующим параметром.

Таким образом, для того чтобы произвести оценку риска реализации проекта, необходимо выполнить аналогичный расчет с применением нормализованных значений показателей, которые были использованы. Расчет полученной пороговой эффективности закладывается в основу дальнейших расчетов.

Сравнительная оценка нормального значения функции риск-эффективности и значения функции в текущих условиях дает основания для оценки рисков уже с употреблением классических моделей, в том числе моделей нормального экспоненциального, пуассоновского и других ви-

дов распределений величин. С использованием такого подхода в формировании риск-профиля проектов становится возможным оценить риск реализации проекта с вероятностной характеристикой.

Выявленные отклонения при сравнительной оценке, их относительная и абсолютная величина определяют направления для оптимизации процесса управления проектом или портфелем проектов с целью нивелировать воздействие отрицательных факторов, отражающих свое влияние в параметрах функции риск-эффективности по каждому виду (операционной, инвестиционной, финансовой).

Каждая из функций риск-эффективности проекта отражает в количественном выражении уровень риска только в одном из основных направлений деятельности.

Функция финансовой риск-эффективности проекта характеризует уровень риска, относящегося к финансовой деятельности проекта, и выражается следующим образом:

$$F(aF)_{i\text{-проекта}} = \sum \beta_j \times Af_j \times \varphi_j, \quad (*)$$

$$\sum \varphi_j = 1,$$

$$\text{оптимальность } F(aF)_{i\text{-проекта}} \rightarrow \max,$$

где  $\varphi_j$  — вес параметра финансовой риск-эффективности проекта в функции.

Коэффициент  $\beta_j$  при параметре показателя риск-эффективности по формуле (\*) рассчитывается на основе корреляционно-регрессионного анализа в модели множественной регрессии при выборе в качестве результирующего показателя значения абсолютного эффекта при реализации проекта (дисконтированный денежный поток; прибыль; валовой выпуск продукции, работ, услуг и др.).

Показатель  $\varphi_j$ , являющийся весовым коэффициентом в формуле (\*), включен в целях приведения расчетов к единичной форме. В данном случае различные группы показателей риск-эффективности (финансовой, операционной, инвестиционной) должны между собой соотноситься, имея эталон нормального состояния, именно поэтому использование весового коэффициента  $\varphi_j$  является необходимым условием проведения достоверных расчетов.

В определении нормального значения показателя риск-эффективности по формуле (\*) используются критерии пороговой эффективности  $\upsilon$ , которые могут быть заложены на основе как количественных методов оценки, так и качественных способов определения. Превышение значения показателя риск-эффективности над нормальным (пороговым значением) позволяет оценить теку-

■ **Таблица 1.** Параметры финансовой риск-эффективности проекта

Параметр	Коэффициент при параметре	Вес параметра	Пороговое значение	Условие оптимальности параметра $Af$
$Af_1$	$\beta_1$	$\varphi_1$	$\nu_1$	max
$Af_2$	$\beta_2$	$\varphi_2$	$\nu_2$	max
$Af_{...}$	$\beta_{...}$	$\varphi_{...}$	$\nu_{...}$	max
$Af_{m-1}$	$\beta_{m-1}$	$\varphi_{m-1}$	$\nu_{m-1}$	max
$Af_m$	$\beta_m$	$\varphi_m$	$\nu_m$	max

щее состояние управления рисками проектов и использовать его в качестве индикатора.

Одновременное использование коэффициентов  $\beta_j$  и  $\varphi_j$  дает возможность провести весь комплекс исчислений в сопоставимых мерах расчетов, при этом не нарушая общей смысловой логики представления показателей риск-эффективности. Соблюдение требования сопоставимости расчетов между различными показателями риск-эффективности приводит к необходимости ввода весового параметра  $\varphi_j$ , который не учитывает корреляционной связи показателей, принимаемых к расчету, и результирующего показателя.

Параметры финансовой риск-эффективности и их характеристика, а также значения показателя веса каждого конкретного параметра заносятся в таблицу (табл. 1). При этом должно соблюдаться частное условие по каждому параметру, определяющее максимизирующую форму условия оптимальности.

Функции инвестиционной и операционной риск-эффективности проекта характеризуют уро-

вень риска, относящегося к инвестиционной и операционной деятельности проекта соответственно.

Параметры инвестиционной и операционной риск-эффективности проекта и их характеристика, а также значения показателей весов каждого конкретного параметра заносятся в таблицу аналогично табл. 1, при этом должны выполняться условия по каждому из параметров, описанные выше.

Использование представленного алгоритма расчета риск-эффективности проектов на практике позволяет оценить как частные значения риск-эффективности, так и комплексное значение всех функций риск-эффективности. В качестве примера расчета можно использовать комплексные инвестиционные планы (КИП) развития территорий, объединяющие в себе набор проектов, призванных улучшить социально-экономическую обстановку в регионе. В данном случае за основу взят КИП г. Сокол (Вологодская область), утвержденный в 2010 г.

По всем экономическим параметрам г. Сокол относится к так называемым моногородам, где на ряде градообразующих предприятий, объединенных в слитный производственно-технологический процесс, занято более 25 % экономически активного населения территориального образования (ТО), а также приходится более 50 % производства продукции — валовой муниципальной выпуск. В связи с этим оценка рисков реализации КИП в схеме ГЧП и выбор оптимальных управленческих решений является актуальной задачей на текущий момент.

Расчеты ряда показателей риск-эффективности по муниципальному образованию г. Сокол в разрезе внедрения комплексного инвести-

■ **Таблица 2.** Расчет параметров риск-эффективности для КИП развития территории г. Сокол

Показатель	Ед. изм.	Факт	Коэффициент	Вес
Доля работающих на градообразующих предприятиях от численности населения трудоспособного возраста ТО	%	28,1	0,327	0,12
Доля работающих на малых предприятиях от численности населения трудоспособного возраста ТО	%	7,2	0,709	0,19
Среднемесячная заработная плата работников крупных и средних предприятий ТО	руб.	9224	0,068	0,1
Объем отгруженных товаров, выполненных работ и услуг собственного производства градообразующими предприятиями	млн руб.	2612	0,244	0,14
Доля предприятий в общегородском объеме отгруженных товаров, выполненных работ и услуг собственного производства	%	32,3	0,351	0,23
Доля малых предприятий в общегородском объеме отгруженных товаров собственного производства организаций	%	11,6	0,822	0,15
Количество малых предприятий в ТО (без учета индивидуальных предпринимателей)	ед.	125	0,844	0,05
Доля собственных доходов бюджета ТО в общих доходах ТО	%	33,6	0,899	0,02
Импакт-фактор $F(R)$				417,7



ционного плана развития территории приведены в табл. 2.

Теоретические и практические вопросы использования различных моделей оценки риска и неопределенности рассматривали многие ученые, среди которых можно отметить Ю. П. Панибратова, С. А. Ершову, И. Т. Балабанова, Н. В. Хованова и многих других.

Так, в работах Хованова уделяется значительное внимание оценке неопределенности в сложных производственных или организационных структурах в построении сложных показателей эффективности [4], к которым относится реализация портфеля проектов или конкретного проекта ГЧП. Рассматривая характеристику неопределенности условий принятия решений, следует отметить, что риск и неопределенность отражают различную сущность одного процесса — процесса риск-менеджмента.

Н. В. Хованов подчеркивает необходимость использовать весовые коэффициенты по отношению к информации, являющейся неточной или неполной, а также выраженной в качественных показателях. Учет неопределенности играет важную роль в определении общего уровня риска при реализации проектов на основе синтетической функции.

Осуществив все расчеты по частным функциям риск-эффективности, производим расчет итоговой функции риска проекта. Значение данной функции позволяет оценить уровень риска проекта на конкретный момент времени, а при наличии данных за некоторый период времени позволяет оценить значение риска в динамике, тем самым определить тренд и особенности изменения функции.

Динамика функции риска позволяет в абсолютных и относительных величинах произвести анализ отклонений и выявить факторы, которые способствовали изменению функции риска проекта.

Расчет абсолютного и относительного изменения функции риска проекта осуществляется следующим образом:

$$\Delta F(aR)_{i\text{-проекта}} = F(aR)_{i\text{-проекта}}^t - F(aR)_{i\text{-проекта}}^{t-k};$$

$$\Delta \% F(aR)_{i\text{-проекта}} = \frac{F(aR)_{i\text{-проекта}}^t}{F(aR)_{i\text{-проекта}}^{t-k}} \times 100,$$

где

$\Delta F(aR)_{i\text{-проекта}}$  — абсолютное изменение функции риска проекта;

$F(aR)_{i\text{-проекта}}^t$  — функция риска проекта в момент времени  $t$ ;

$F(aR)_{i\text{-проекта}}^{t-k}$  — функция риска проекта в момент времени  $t - k$ ;

$\Delta \% F(aR)_{i\text{-проекта}}$  — относительное изменение функции риска проекта.

Значения функции риска проекта также позволяют рассчитать показатели эффективности по двум направлениям — экстенсивному и интенсивному. Экстенсивное направление учитывает расчет показателей применительно к абсолютным, интенсивное — к относительным показателям:

$$I(F(aR))_{i\text{-проекта}} = \frac{\Delta F(aR)_{i\text{-проекта}}}{\Delta CT_{i\text{-проекта}}};$$

$$I(F(aR))_{i\text{-проекта}}^{\sim} = \frac{\Delta \% F(aR)_{i\text{-проекта}}}{\Delta CT_{i\text{-проекта}}},$$

где

$I(F(aR))_{i\text{-проекта}}$  — экстенсивный показатель эффективности функции риска проекта;

$\Delta F(aR)_{i\text{-проекта}}$  — абсолютное изменение функции риска проекта;

$\Delta CT_{i\text{-проекта}}$  — транзакционные издержки проекта;

$I(F(aR))_{i\text{-проекта}}^{\sim}$  — интенсивный показатель эффективности функции риска проекта;

$\Delta \% F(aR)_{i\text{-проекта}}$  — относительное изменение функции риска проекта.

### Показатели риск-эффективности

В целом набор показателей для расчета риск-эффективности определяется для каждого проекта индивидуально и зависит от множества факторов. Однако риск-анализ в данном блоке сложных организационных структур при реализации проектов ГЧП базируется на анализе групп показателей и коэффициентов, который позволяет не только определить их количественные значения, но и выявить их взаимосвязь и взаимозависимость между собой.

Можно выделить ряд основных групп показателей: ликвидности, деловой активности, финансовой устойчивости (зависимости), прибыльности, производственные (операционные), рыночные.

Показатели эффективности риск-функций проекта ГЧП отражают условную эффективность управленческих решений в области риск-менеджмента через различные соотношения значений показателей маржинального дохода и транзакционных издержек по каждому проекту или портфелю проектов ГЧП.

В рамках анализа эффективности выделяют несколько уровней показателей эффективности: уровень показателей емкости, отдачи, проекта, холдинга; уровень относительных и абсолютных показателей.

Первый показатель эффективности риск-функции — индекс риска организационной структуры при реализации проектов:

$$I(R)_{\text{структуры}} = \sum \frac{\Delta MP_i}{\Delta CT_i} \times d_i,$$

оптимальность  $I(R)_{\text{структуры}} \rightarrow 0(\min)$ ,

где

$\Delta MP_i$  — изменение маржинального дохода;  
 $\Delta CT_i$  — изменение транзакционных издержек;  
 $d_i$  — доля проекта в портфеле.

Исходной базой для показателя индекса риска организационной структуры является индекс риска проекта и его производные показатели. В силу специфики подхода можно предложить ограниченное множество вариантов соотношения транзакционных издержек с некоторыми результирующими показателями. В качестве базовых принимается соотношение транзакционных издержек 1) к маргинальному доходу и 2) к объему выпуска продукции в натуральных и стоимостных величинах.

*Первый вариант расчета индекса риска проекта и его производных показателей:*

— показатель отдачи

$$I(R)_{i\text{-проекта}} = \frac{\Delta MP_i}{\Delta CT_i},$$

оптимальность  $I(R)_{i\text{-проекта}} \rightarrow \max$ ,

где

$I(R)_{i\text{-проекта}}$  — абсолютный индекс риска проекта;

$\Delta MP_i$  — изменение маржинального дохода проекта;

$\Delta CT_i$  — изменение транзакционных издержек проекта;

— показатель емкости

$$I(R)_{i\text{-проекта}}^{\sim} = \frac{\Delta CT_i}{\Delta MP_i},$$

оптимальность  $I(R)_{i\text{-проекта}}^{\sim} \rightarrow \min$ ,

где  $I(R)_{i\text{-проекта}}^{\sim}$  — абсолютный индекс риска проекта;

— индекс риска проекта (относительный)

$$I(R)_{i\text{-проекта}}' = \frac{\% \Delta MP_i}{\% \Delta CT_i},$$

где  $I(R)_{i\text{-проекта}}'$  — относительный индекс риска проекта.

*Второй вариант расчета индекса риска проекта и его производных показателей:*

— показатель отдачи

$$I(R)_{i\text{-проекта}} = \frac{\Delta V_i}{\Delta CT_i},$$

оптимальность  $I(R)_{i\text{-проекта}} \rightarrow \max$ ,

где

$\Delta V_i$  — изменение выпуска (в стоимостном или натуральном выражении) по проекту;

$\Delta CT_i$  — изменение транзакционных издержек проекта;

— показатель емкости

$$I(R)_{i\text{-проекта}}^{\sim} = \frac{\Delta CT_i}{\Delta V_i},$$

оптимальность  $I(R)_{i\text{-проекта}}^{\sim} \rightarrow \min$ ;

— индекс риска проекта (абсолютный)

$$I(R)_{i\text{-проекта}}' = \frac{\% \Delta V_i}{\% \Delta CT_i}.$$

Выбор базовых показателей, используемых для определения «эталона» риска проектов или для соизмерения рисков различных проектов, производится с учетом внутренних и внешних факторов, влияющих на реализацию проекта, а также с учетом возможности получить достоверные количественные оценки результирующих показателей.

### Заключение

Представленный подход к оценке рисков проектов ГЧП может быть использован в целях интегрированной оценки рисков любых объектов, включая как сложные организационные структуры, так и отдельные проекты, реализующиеся через бизнес-единицы.

В рамках данной статьи было предложено авторское видение способа оценки рисков проектов ГЧП, осуществляемых сложными организационными структурами. Введено понятие «ключевые показатели риск-эффективности», а также определен ряд показателей риск-эффективности при реализации проектов ГЧП, которые могут быть использованы в качестве инструмента выбора наиболее подходящей стратегии управления проектными рисками на различных уровнях принятия управленческих решений.

Работа выполнена при поддержке РГНФ, грант № 11-12-66006а/У.

### Литература

1. Ермасова Н. Б. Риск-менеджмент организации: учеб.-практ. пособие. — М.: Дашков и К, 2009. — 380 с.
2. Панкратов А. А. Государственно-частное партнерство в современной практике: основные теоретические и практические проблемы: монография. — М.: Анкил, 2010. — 248 с.
3. Балдин К. В., Воробьев С. Н. Модели и методы управления рисками в предпринимательстве: учебник. — М.: МПСИ, 2009. — 432 с.
4. Хованов Н. В., Федотов Ю. В. Модели учета неопределенности при построении сводных показателей эффективности деятельности сложных производственных систем // Науч. докл. НИИ менеджмента СПбГУ. 2006. № 28. С. 1–37.

УДК 681.51

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ СВОИХ ФУНКЦИЙ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО СВОЙСТВ

**А. А. Салангин,**

канд. техн. наук, доцент

Псковский государственный политехнический институт

Для оценки показателей функционирования в экспериментах с изменяющейся моделью может быть предложен метод аппроксимации траектории успешных испытаний, основанный на гипотезе об экспоненциальном росте вероятности успешной работы технического комплекса. В статье содержание метода доведено до вычислительного эксперимента на примере оценки вероятности выполнения тактической задачи.

**Ключевые слова** — модель, траектория испытаний, вычислительный эксперимент.

### Введение

Создание сложной системы включает в себя ряд этапов, связанных с разработкой эскизного и технического проектов, изготовлением аппаратуры, сборкой, комплексной лабораторной отработкой, и завершается натурными испытаниями. При оценке показателей функционирования технического комплекса используют методы статистической обработки данных исходя из предположений о неизменности свойств объекта. Реально же в процессе проектирования объекта производят доработки, его свойства изменяющие. Для оценки показателей функционирования в экспериментах с изменяющейся моделью может быть предложен метод аппроксимации траектории успешных испытаний [1, 2].

### Учет изменения свойств проектируемого объекта

Пусть автоматическая система включает в себя объект управления и управляющую систему, состоящую из устройств получения информации, ее переработки и устройств исполнения управляющих сигналов. Система функционирует в некоторой среде, и ее действие должно удовлетворять предъявленным требованиям. Отработка такой системы в процессе испытаний сводится к последовательности опытов. После выполнения каждого из них на основании результатов эксперимента определяются изменения в системе, на-

правленные на повышение ее качества. Обработка и анализ результатов испытаний систем такого типа показали, что можно использовать гипотезу об экспоненциальном росте вероятности успешной работы [1]:

$$P_i = P_\infty - (P_\infty - P_0)e^{-\beta i},$$

где  $i$  — номер испытания;  $P_\infty$  — предельно допустимое значение вероятности успешной работы;  $P_0$  — начальный уровень вероятности успешной работы системы перед испытаниями. Обозначим  $\lambda = e^{-\beta}$ ,  $0 < \lambda < 1$ , тогда

$$P_i = P_\infty - (P_\infty - P_0)\lambda^i. \quad (1)$$

Учет изменения свойств объекта сводится к определению параметров  $P_0$ ,  $P_\infty$ ,  $\lambda$  в соотношении (1). Смоделируем процесс испытаний с помощью генератора псевдослучайных чисел величин  $\xi_i = \{0, 1\}$ , характеризующих исход  $i$ -го испытания по оценке  $P_i$ , причем  $\xi_i = 1$  означает успешное испытание,  $\xi_i = 0$  — неуспешное испытание.

Пусть количество накопленных успешных испытаний после  $j$  испытаний системы  $k_j^* = \sum_{i=1}^j \xi_i$ .

График зависимости  $k_j^* = f(j)$  — ступенчатая линия, называемая траекторией успешных испытаний или траекторией результатов испытаний. Эту траекторию можно аппроксимировать сред-

ним значением  $k_j = \overline{k_j^*} = \sum_{i=1}^j \overline{\xi_i} = \sum_{i=1}^j P_i$ .

С учетом использованной гипотезы об экспоненциальном росте вероятности успешной работы после суммирования, сделав замену

$$b = P_\infty, \quad c = \frac{(P_\infty - P_0)\lambda}{1 - \lambda},$$

получим

$$k_j = jb - c(1 - \lambda^j). \quad (2)$$

Развивая подход, предложенный К. А. Пупковым [1], после проведения вычислительного эксперимента найдем оценки параметров  $b, c, \lambda$  по методу наименьших квадратов для функции

$$U = \sum_{j=1}^n (k_j - k_j^*)^2 \rightarrow \min_{b, c, \lambda},$$

где  $n$  — общее число испытаний. Отсюда, используя необходимые условия минимума функции  $U$ :

$$\frac{\partial U}{\partial b} = \frac{\partial U}{\partial c} = \frac{\partial U}{\partial \lambda} = 0, \quad \text{построим систему уравнений}$$

$$\begin{cases} a_{11}b - a_{02}c - r_{01} = 0 \\ a_{20}b - a_{11}c - r_{10} = 0, \\ a_{21}b - a_{12}c - r_{11} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

где  $a_{kl} = \sum_{j=1}^n j^k (1 - \lambda^j)^l$ ;  $r_{kl} = \sum_{j=1}^n j^k (1 - \lambda^j)^l k_j^*$ ,  $k, l = 0, 1, 2$ .

Выразим  $b$  и  $c$  из первых двух уравнений системы (3):

$$b = \frac{1}{D}(r_{10}a_{02} - r_{01}a_{11}); \quad c = \frac{1}{D}(r_{10}a_{11} - r_{01}a_{20}), \quad (4)$$

где  $D = a_{20}a_{02} - a_{11}^2$ . Подставив  $b, c$  в третье уравнение системы (3), получим относительно параметра  $\lambda$  уравнение

$$F(\lambda) = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{02} & r_{01} \\ a_{20} & a_{11} & r_{10} \\ a_{21} & a_{12} & r_{11} \end{vmatrix} = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) существует, так как анализ непрерывной функции  $F(\lambda)$  показал, что  $F(0) = 0, F(1) = 0, F(\varepsilon) > 0, F(1 - \varepsilon) < 0, \varepsilon > 0$ . Следовательно, по теореме Пеано должно существовать такое  $\lambda^*$ , для которого  $F(\lambda^*) = 0$ . Поиск решения можно осуществить одним из известных численных методов или графически. По вычисленному значению  $\lambda^*$  определяем величины  $b, c$  и по формуле (1) находим вероятность успешных испытаний для текущих значений  $j$ . По формуле (2) можем найти значения  $k_j$ , аппроксимирующие траекторию успешных испытаний.

Рассмотренный подход позволил провести вычислительный эксперимент с использованием исходных данных  $P_0 = 0,3; P_\infty = 0,9; \lambda = 0,75$  для различного количества испытаний. Так, по резуль-

татам проведения серии  $n = 40$  испытаний построена зависимость  $F(\lambda)$  (рис. 1) и найдено значение корня уравнения (5)  $\lambda^* = 0,84$ . Далее по формулам (4) вычислены  $b$  и  $c$ , а затем  $P_0 = b = 0,32; P_\infty = 0,92$ .

Сравнение вероятности успешных испытаний с использованием формулы (1) представлено на рис. 2 для исходных значений параметров  $P_0 = 0,3; P_\infty = 0,9; \lambda^* = 0,75$  и их оценок  $\hat{P}_0 = 0,32; \hat{P}_\infty = 0,92; \hat{\lambda}^* = 0,84$ , полученных по результатам моделирования.

Значения параметров, полученные моделированием с различным числом испытаний  $n$ , представлены в таблице.

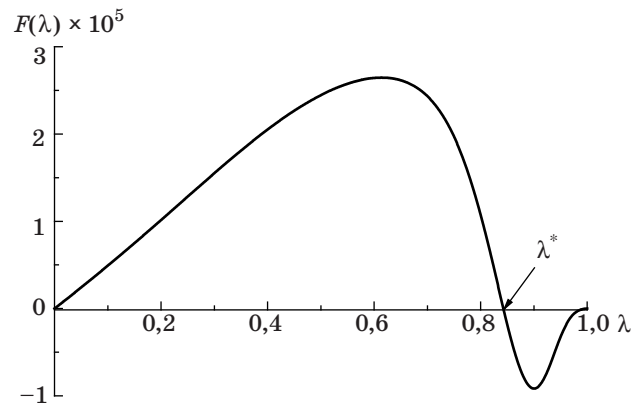


Рис. 1. Зависимость  $F(\lambda)$  для определения корня  $\lambda = \lambda^*$

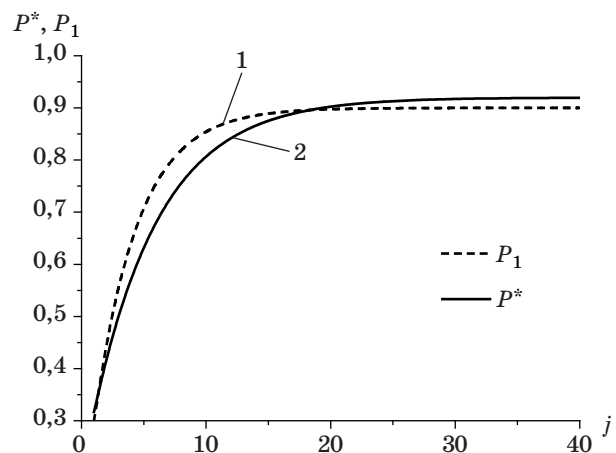


Рис. 2. Зависимость вероятности успешных испытаний от количества испытаний: 1 — для исходных значений параметров; 2 — для смоделированных параметров

Параметр	Исходное значение	Смоделированные оценки		
		$n = 10$	$n = 20$	$n = 40$
$P_0$	0,3	0,17	0,32	0,32
$P_\infty$	0,9	0,81	0,87	0,92
$\lambda^*$	0,75	0,5	0,54	0,84

Таким образом:

- 1) расчетные оценки параметров достаточно близки к моделируемым, например, определяемые значения  $P_\infty$  ниже моделируемых всего на 2 %;
- 2) получаемая зависимость  $P(j)$  позволяет оценить целесообразность последующих испытаний и доработок.

### Заключение

Практическая значимость рассмотренного подхода состоит в возможности прогнозировать вероятность успешной работы технического комплекса с учетом ее роста в результате устранения дефектов. Метод может быть распространен на опре-

деление текущей оценки математического ожидания и дисперсии погрешности показателя функционирования системы.

### Литература

1. Пупков К. А., Коньков В. Г. Интеллектуальные системы (исследование и создание) / МГТУ. — М., 2003. — 343 с.
2. Салангин А. А. Методология системного анализа проектируемых технических комплексов: монография / ППИ. — Псков, 2009. — 280 с.

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

При подготовке рукописей статей редакция просит Вас руководствоваться следующими рекомендациями.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 16 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала в Word шрифтом Times New Roman размером 13.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание, полное название организации, аннотация (7–10 строк) и ключевые слова на русском и английском языках, подрисуночные подписи.

**Формулы** в текстовой строке набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), только в том случае, если средства Word не позволяют набрать формулу или символ (например, простая дробь, символы с «крышками» и т. д.), используйте имеющийся в Word формульный редактор Mathtype или Equation; формулы, стоящие в отдельной строке, могут быть набраны как угодно; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте вкладку Define; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), т. к. этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

**Иллюстрации** в текст не заверстываются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы изготавливаются в векторных программах: Visio 4, 5, 2002–2003 (\*.vsd); Coreldraw (\*.cdr); Excel; Word; AdobeIllustrator; AutoCad (\*.dxf); Компас; Matlab (экспорт в формат \*.ai);

— фото и растровые — в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

**В редакцию предоставляются:**

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, факс, эл. адрес), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40 × 55 мм;

— экспертное заключение.

**Список литературы** составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Более подробную информацию см. на сайте: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)

## IV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» — САИТ-2011

17–23 августа 2011 г.

Место проведения: Башкирия, Белорецкий р-н, пос. Новоабзаково, д/о Абзаково.

### Организаторы

Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН  
Институт системного анализа РАН  
Магнитогорский государственный университет  
Челябинский государственный университет  
Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН  
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН  
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН  
Российская ассоциация искусственного интеллекта  
Институт информационных технологий Болгарской академии наук  
ООО «Технологии системного анализа»  
Комитет РАН по системному анализу  
Институт математики НАН Беларуси  
Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси

### Направления работы

Теоретические аспекты системного анализа  
Самоорганизация в сложных системах  
Математические методы системного анализа и управления  
Методы и информационные технологии поддержки принятия решений  
Технологии автоматизации и управления  
Динамика макросистем  
Информационные технологии поиска и анализа информации  
Информационные технологии в науке, образовании, медицине, экономике и промышленности  
Информационная безопасность  
Интеллектуальные технологии и системы  
Методы приобретения и представления знаний интеллектуальными системами  
Распознавание аудио-, видео- и графических образов  
Распределенные и параллельные вычисления  
Распределенная информационно-алгоритмическая среда для научных исследований  
Автоматизация программирования  
Проблемы неопределенности и риска в экономике  
Управление развитием наукоемких и информационных технологий  
Системный анализ социально-экономических процессов

Моделирование демо-экономических процессов  
Проблемы устойчивого развития  
Системное регулирование и управление  
Методология системного подхода в новой информационной среде

### Круглые столы

Наука и инновационная экономика  
Инструменты системного анализа

В рамках САИТ проходит молодежная школа-семинар и выставка-демонстрация программных продуктов.

### Язык конференции

Рабочими языками конференции являются русский и английский.

### Оргвзнос

Участники конференции в возрасте до 35 лет (молодые ученые) освобождаются от оплаты организационного взноса.

Подробная информация на сайте конференции:  
<http://www.isa.ru/sait>

### Публикация трудов

Все доклады, принятые на конференцию, будут опубликованы в трудах конференции.  
Лучшие доклады будут рекомендованы к изданию в ведущих научных журналах.

### Контрольные сроки

Регистрация и представление докладов — до 20 апреля 2011 года на сайте конференции.  
Извещение авторов о решении программного комитета — до 1 мая 2011 года (по электронной почте).  
Представление докладов для включения в труды — до 15 мая 2011 года.  
Перечисление регистрационного взноса — до 1 июля 2011 года.

### Дополнительная информация и справки

117312, Москва, Проспект 60-летия Октября, д. 9,  
Институт системного анализа РАН  
Жарова Наталия Юлиевна  
Тел.: 7 (499) 135-51-64  
Факс: 7 (499) 783-91-32  
Эл. адрес: [saitconf@gmail.com](mailto:saitconf@gmail.com)  
Сайт: <http://www.isa.ru/sait>

# МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» — ИНФОТЕХ-2011

5–10 сентября 2011 г.

Место проведения конференции: база отдыха «Горизонт» Севастопольского национального технического университета

## Организаторы конференции

Министерство образования и науки Украины  
Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь, Украина  
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, РФ  
Институт проблем информатики РАН, г. Москва, РФ  
Технический университет, г. Люблин, Польша  
Естественно-гуманитарный университет в Седлицах, г. Седлице, Польша  
Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь  
Высшая техническая школа, г. Рапперсвилль, Швейцария

## Направления работы конференции

Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей  
Системный анализ, управление и моделирование  
Системы и средства искусственного интеллекта  
Методы и системы защиты информации, информационная безопасность  
Компьютерные системы, сети и компоненты  
Автоматизированные системы управления и информационные технологии  
Информационные технологии в образовании, экономике, экологии  
Программное и аппаратное обеспечение устройств обработки графической информации

Планируется проведение круглых столов по основным направлениям работы конференции.

## Язык конференции

Рабочие языки конференции — украинский, русский, английский.

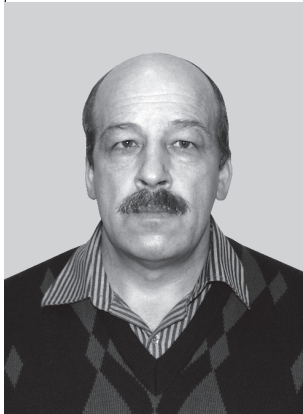
## Контрольные сроки

Конференция проходит в два этапа.  
Первый этап проходит с 1 июля по 5 сентября — интернет-конференция, доклады публикуются на сайте конференции [sev-infotech.info](http://sev-infotech.info).  
Второй этап: с 5 по 9 сентября — проведение пленарных и секционных заседаний. Форма участия в конференции: очная, заочная.  
Прием тезисов или докладов — до 30.05.2011 г.  
Извещение авторов о решении программного комитета — до 15.06.2011 г.  
Перечисление регистрационного взноса за участие в конференции — до 30.06.2011 г.  
Размещение материалов на сайте конференции в виде стендовых докладов, обсуждение — 01.07.2011 – 05.09.2011 г.

## Дополнительная информация и справки

Почтовый адрес:  
Украина, 99053,  
г. Севастополь, ул. Университетская 33,  
Севастопольский национальный технический университет, кафедра кибернетики и вычислительной техники, Линчевской Ирине Алексеевне.  
Телефоны: (0692) 435-16-9, (050) 952-12-81, Смагина Анна Олеговна  
E-mail: [sev-infotech@mail.ru](mailto:sev-infotech@mail.ru)  
Сайт: <http://www.sev-infotech.info>

**АНДРЕЕВ**  
Евгений  
Николаевич



Ведущий инженер кафедры информационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1979 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Электромеханика». Является автором 57 научных публикаций и семи запатентованных изобретений. Область научных интересов — сверхпроводимость, нанотехнологии, электрические машины. Эл. адрес: kaf\_32@aanet.ru

**БУРКОВ**  
Евгений  
Александрович



Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2008 году окончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления». Является автором 16 научных публикаций. Область научных интересов — теория принятия решений, теория игр, экспертное оценивание. Эл. адрес: eaburkov@gmail.com

**ВОЛКОВ**  
Дмитрий  
Александрович



Ассистент кафедры информационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Электромеханика». Является автором 26 научных публикаций и одного запатентованного изобретения. Область научных интересов — сверхпроводимость, нанотехнологии, электрические машины, возобновляемая энергетика. Эл. адрес: kaf\_32@aanet.ru

**ГАРИПОВА**  
Юлия  
Евгеньевна



Старший преподаватель кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Марийского государственного технического университета. В 2007 году окончила Марийский государственный технический университет по специальности «Инженерное дело в медико-биологической практике». В 2010 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 15 научных публикаций. Область научных интересов — распознавание образов, обработка медико-биологических изображений. Эл. адрес: GaripovaYE@marstu.net

**ГОФМАН**  
Максим  
Викторович



Аспирант кафедры информатики и информационной безопасности Петербургского государственного университета путей сообщения. В 2008 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления». Является автором четырех научных публикаций. Область научных интересов — математическое моделирование беспроводных мобильных каналов связи, MIMO-системы связи, методы кодирования и декодирования MIMO-кодов. Эл. адрес: maxgof@gmail.com

**ГРИШАКОВ**  
Вадим  
Геннадьевич



Начальник отделения Академии ФСО России. В 2000 году окончил Академию ФСО России. В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций и одного изобретения. Область научных интересов — теория управления корпоративными информационно-вычислительными сетями, распределенное моделирование. Эл. адрес: vg@academ.msk.rsnet.ru



**ЕВГРАФОВ**  
Владимир  
Георгиевич



Профессор кафедры прикладной математики и информационных технологий Военного инженерно-технического университета МО РФ, заслуженный деятель науки РФ.

В 1953 году окончил Балтийское высшее военно-морское училище.

В 1984 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 300 научных публикаций.

Область научных интересов — функционально-структурная теория эффективности, качества и надежности систем «человек — машина — среда», эргономическое проектирование, эргономическая экспертиза.

Эл. адрес:  
pan121@spb.skylink.ru

**ЕГОШИН**  
Михаил  
Андреевич



Аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Марийского государственного технического университета.

В 2008 году окончил Марийский государственный технический университет по специальности «Инженерное дело в медико-биологической практике».

Является автором семи научных публикаций.

Область научных интересов — распознавание образов, анализ изображений, обработка медико-биологических изображений.

Эл. адрес:  
EgoshinMA@gmail.com

**ЗАХАРОВА**  
Елена  
Валентиновна



Аспирант кафедры электронных и телевизионных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2009 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Радиотехника».

Является автором девяти научных публикаций.

Область научных интересов — акустоэлектроника, пространственно-временная обработка сигналов.

Эл. адрес:  
helen-kravetz@yandex.ru

**КОМАРОВ**  
Владимир  
Александрович



Доцент кафедры приборостроения и нанoeлектроники Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета.

В 2005 году окончил Красноярский государственный технический университет.

В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 40 научных публикаций.

Область научных интересов — компьютерные измерительные технологии, системы дистанционного управления объектами, автоматизация экспериментальных исследований и др.

Эл. адрес:  
VKomarov@sfu-kras.ru

**КУЗЬМИН**  
Евгений  
Анатольевич



Младший научный сотрудник Управления по научно-исследовательской работе, аспирант и ассистент кафедры экономики предприятий Уральского государственного экономического университета.

В 2010 году окончил Уральский государственный экономический университет по специальности «Национальная экономика».

Является автором более 30 научных публикаций и девяти авторских свидетельств на объекты интеллектуальной собственности.

Область научных интересов — риск-менеджмент, сложные организационные структуры, планирование на предприятиях.

Эл. адрес: kuzmin@usue.ru

**ЛАВРЕНТЬЕВ**  
Евгений  
Анатольевич



Доцент, начальник отдела ОКБ ОАО «НПО «ЛЭМЗ», г. Москва.

В 1980 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электронные устройства вычислительной техники».

В 1996 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 150 научных публикаций и шести запатентованных изобретений.

Область научных интересов — радиолокационное распознавание, цифровая обработка сигналов и информации в радиолокационных системах.

Эл. адрес: srclav@rambler.ru

**ЛОГИНОВ  
Илья  
Валентинович**



Инженер Академии ФСО России. В 2005 году окончил Академию ФСО России. Является автором более 25 научных публикаций. Область научных интересов — теория управления корпоративными информационно-вычислительными сетями, теория полезности, теория планирования. Эл. адрес: liv@academ.msk.rsnet.ru

**МАНЫЛОВ  
Игорь  
Владимирович**



Аспирант кафедры микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2007 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет экономики и финансов по специальности «Технология приборостроения». Является автором пяти научных публикаций. Область научных интересов — методы дистанционного зондирования, анализ данных аэрофотосъемки, автоматизированное дешифрование снимков. Эл. адрес: igoman1@yandex.ru

**ОРЛОВ  
Алексей  
Руфимович**



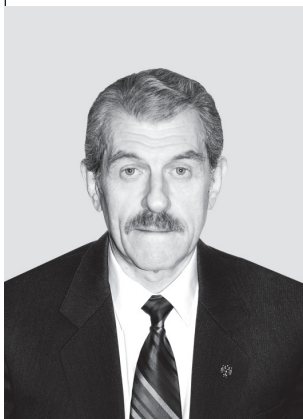
Заведующий лабораторией кафедры информационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1986 году окончил Ленинградский институт аэрокосмического приборостроения по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов». Является автором 15 научных публикаций и четырех запатентованных изобретений. Область научных интересов — математическое моделирование электромеханических и электроэнергетических систем и комплексов, в том числе со сверхпроводниковым оборудованием. Эл. адрес: kaf\_32@aanet.ru

**ПАВЛОВ  
Илья  
Николаевич**



Ведущий инженер отдела ОКБ ОАО «НПО «ЛЭМЗ», г. Москва. В 2002 году окончил Михайловский военный артиллерийский университет по специальности «Радиоэлектронные системы». В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 60 научных публикаций и трех запатентованных изобретений. Область научных интересов — радионавигационные системы, радиотехнические многопозиционные системы. Эл. адрес: pavilnik@rambler.ru

**ПАДЕРНО  
Павел  
Иосифович**



Профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», заслуженный деятель науки РФ, академик Международной академии проблем человеческого фактора. В 1969 году окончил математико-механический факультет Ленинградского государственного университета. В 1998 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 170 научных публикаций. Область научных интересов — методы оценки и оптимизации человеко-машинных систем, экспертиза, эргономическое проектирование. Эл. адрес: pipaderno@list.ru

**ПЕТРОВ  
Павел  
Николаевич**



Профессор, заведующий кафедрой электронных и телевизионных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1971 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения. В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов — акустоэлектроника, пространственно-временная обработка сигналов, локационные системы, ультразвуковые устройства. Эл. адрес: pnp2847@mail.ru

**САЛАНГИН**  
**Алексей**  
**Александрович**



Доцент кафедры физики Псковского государственного политехнического института.

В 1975 году окончил Горьковский государственный университет им. Н. И. Лобачевского по специальности «Физика».

В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 40 научных и учебно-методических публикаций.

Область научных интересов — математические методы моделирования проектируемых технических систем.

Эл. адрес: alsalan@yandex.ru

**САРАФАНОВ**  
**Альберт**  
**Викторович**



Профессор Сибирского федерального университета, почетный работник науки и техники РФ.

В 1986 году окончил Красноярский политехнический институт. В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 250 научных публикаций, в том числе пяти монографий и 30 свидетельств о регистрации ПО.

Область научных интересов — методы комплексного математического моделирования физических процессов, интегрированные компьютерные технологии проектирования бортовых радиоэлектронных средств, автоматизация физических экспериментов, компьютерные измерительные технологии, технологии электронного обучения.

Эл. адрес: sarafanov@i-teco.ru

**САФРОНОВ**  
**Валерий**  
**Васильевич**



Профессор, главный научный сотрудник ОАО «КБ Электроприбор», г. Саратов, действительный член Академии военных наук, заместитель председателя Поволжского отделения Академии военных наук по научной работе. Награжден знаком «Изобретатель СССР».

В 1997 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 180 научных публикаций.

Область научных интересов — системный анализ, теория принятия решений, целочисленное программирование, векторная оптимизация сложных систем.

Эл. адрес: svv@kber.ru

**СОЛОВЬЕВ**  
**Николай**  
**Владимирович**



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ.

В 1979 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Автоматизация и комплексная механизация машиностроения».

В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 40 научных публикаций и четырех запатентованных изобретений.

Область научных интересов — распознавание образов, компьютерная обработка и анализ изображений, техническое зрение роботов.

Эл. адрес: famsol@yandex.ru

**СОЛОЖЕНЦЕВ**  
**Евгений**  
**Дмитриевич**



Заведующий лабораторией интегрированных интеллектуальных систем автоматизированного проектирования Института проблем машиноведения РАН.

В 1960 году окончил Харьковский политехнический институт.

В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором около 200 научных публикаций, в том числе восьми книг.

Область научных интересов — моделирование, анализ и управление риском на стадиях проектирования, испытаний и эксплуатации банковских, организационных, экономических и технических систем.

Эл. адрес: karsol@sapr.ipme.ru

**ТИМОФЕЕВ**  
**Сергей**  
**Сергеевич**



Старший преподаватель кафедры информационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2004 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Электромеханика».

Является автором 28 научных публикаций и двух запатентованных изобретений.

Область научных интересов — электромеханика, сверхпроводимость, нанотехнологии, электрические машины.

Эл. адрес: kaf\_32@aanet.ru

**ТИХОНОВ**  
**Эдуард**  
**Прокофьевич**



Доцент кафедры биомедицинской электроники и охраны среды Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», член-корреспондент Метрологической академии.

В 1963 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения.

В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 190 научных публикаций, в том числе более 60 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Область научных интересов — кибернетика, информатика, моделирование, информационно-измерительные системы, биомедицинская инженерия.  
Эл. адрес: edikleti@yandex.ru

**ТУРУБАНОВ**  
**Михаил**  
**Александрович**



Аспирант кафедры информационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2010 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Роботы и робототехнические системы».

Является автором восьми научных публикаций и двух запатентованных изобретений.

Область научных интересов — сверхпроводимость, нанотехнологии, оптимизация процессов, силовая электроника.

Эл. адрес: kaf\_32@aanet.ru

**УЛЬЯНОВ**  
**Геннадий**  
**Николаевич**



Профессор, ведущий инженер отдела ОКБ ОАО «НПО «ЛЭМЗ», г. Москва, заслуженный деятель науки и техники РФ, академик Академии военных наук, член-корреспондент Санкт-Петербургской инженерной академии, почетный профессор Михайловской военной артиллерийской академии.

В 1964 году окончил Военную артиллерийскую академию имени М. И. Калинина.

В 1989 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 200 научных публикаций и 15 запатентованных изобретений.

Область научных интересов — радиолокация, радионавигация.  
Эл. адрес: gulyanov@yandex.ru

**ХАФИЗОВ**  
**Ринат**  
**Гафиятуллович**



Профессор кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Марийского государственного технического университета.

В 1994 году окончил Марийский государственный технический университет по специальности «Радиотехника».

В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов — распознавание образов, анализ изображений, цифровая обработка сигналов.

Эл. адрес: krtmbs@marstu.net

**ЧУБРАЕВА**  
**Лидия**  
**Игоревна**



Член-корреспондент РАН, профессор, заведующая кафедрой информационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, академик Академии электротехнических наук РФ, член международных организаций CIGRE, ISA, IEEE.

В 1970 году окончила Ленинградский институт авиационного приборостроения.

В 1992 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 180 научных публикаций, четырех монографий, 15 изобретений.

Область научных интересов — электромеханика, нетрадиционная электромеханика, прикладная сверхпроводимость.  
Эл. адрес: kaf\_32@aanet.ru

**ШИФРИС**  
**Геннадий**  
**Владимирович**



Ведущий специалист департамента банковских технологий ЗАО «Специализированные корпоративные решения».

В 2007 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

Является автором четырех научных публикаций.

Область научных интересов — цифровая обработка изображений, системы видеонаблюдения.

Эл. адрес: GShifris@gmail.com

**ШИШЛАКОВ  
Владислав  
Федорович**



Профессор кафедры информационных технологий в электро-механике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1982 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения. В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных и учебно-методических публикаций, в том числе трех монографий. Область научных интересов — синтез нелинейных систем автоматического управления с различными видами модуляции сигнала. Эл. адрес: kaf\_32@aanet.ru

**ЯЦЕНКО  
Светлана  
Геннадьевна**



Магистрант экономического факультета Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2010 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Бизнес и информатика». Является автором одной научной публикации. Область научных интересов — теория и системы для оценки сложных финансово-экономических объектов с использованием системы поддержки принятия решений по нечисловой неполной и неточной экспертной информации. Эл. адрес: sarah\_sky\_inbox.ru

**Уважаемые подписчики!**

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2006 г. г. в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>) и на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>). Печатную версию архивных выпусков журнала за 2003–2009 г. г. Вы можете заказать в редакции по льготной цене.

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

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья), вы можете подписаться на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>).

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогам: «Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс, а также посредством: «Северо-Западное Агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05, эл. почта: [press@crp.spb.ru](mailto:press@crp.spb.ru), [zajavka@crp.spb.ru](mailto:zajavka@crp.spb.ru), сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

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

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47, эл. почта: [export@periodicals.ru](mailto:export@periodicals.ru), сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: [Alfimov@viniti.ru](mailto:Alfimov@viniti.ru), сайт: <http://www.informnauka.com>

«Артос-Гал»

Москва, тел.: (495) 603-27-28, 603-27-33, 603-27-34, сайт: <http://www.artos-gal.mpi.ru/index.html>

«ИНТЕР-ПОЧТА-2003»

Москва, тел.: (495) 500-00-60, 580-95-80, эл. почта: [interpochta@interpochta.ru](mailto:interpochta@interpochta.ru), сайт: <http://www.interpochta.ru>

Краснодар, тел.: (861) 210-90-00, 210-90-01, 210-90-55, 210-90-56, эл. почта: [krasnodar@interpochta.ru](mailto:krasnodar@interpochta.ru)

Новороссийск, тел.: (8617) 670-474

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: [podpiska@delpress.ru](mailto:podpiska@delpress.ru), сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Агентство „Газеты в розницу“»

Екатеринбург, тел.: (343) 228-16-11, 228-16-12, эл. почта: [box@e-rospechat.ru](mailto:box@e-rospechat.ru), сайт: <http://e-rospechat.ru/info.php?kod=000070&topic=000200&pos=40>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: [kazan@komcur.ru](mailto:kazan@komcur.ru), сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«BTL» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html>

и др.

УДК 519: 816

Сравнительная оценка методов «жесткого» ранжирования, справедливого компромисса и равномерной оптимальности в задаче гипервекторного ранжирования систем

*Сафронов В. В.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 2–8.

Поставлена задача гипервекторного ранжирования систем. Показаны общие принципы ее решения, особенности применения метода «жесткого» ранжирования и методов равномерной оптимальности и справедливого компромисса. Приведен численный пример.

*Ключевые слова* — гипервекторное ранжирование, критерии, свертка критериев, методы равномерной оптимальности, методы справедливого компромисса.

Список лит.: 12 назв.

УДК 681.518.+519.724

Вероятностные адаптивные алгоритмы дискретного представления аналоговых сигналов. Часть 2: Сравнительный анализ и численные данные

*Тихонов Э. П.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 9–14.

Приведены результаты определения оптимального интервала дискретизации для вероятностных адаптивных алгоритмов при различных восстанавливающих функциях. Выполнен сравнительный анализ предложенных адаптивных алгоритмов и известного метода дискретизации по Котельникову. Основные соотношения между интервалами дискретизации, полученные для различных методов дискретизации на моделях реальных сигналов, доведены до количественных результатов.

*Ключевые слова* — оптимальный интервал, функция восстановления, адаптивный алгоритм, сравнительный анализ.

Список лит.: 5 назв.

УДК 004.932.4

Улучшение качества сжатых изображений предварительным масштабированием

*Соловьев Н. В., Шифрис Г. В.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 15–23.

Рассматривается метод улучшения качества изображений, сжимаемых по алгоритму JPEG, предварительным масштабированием. Обосновывается выбор количественной оценки качества изображения. Анализируются методы масштабирования с точки зрения скорости обработки и качества восстановленного изображения.

*Ключевые слова* — сжатие изображений, алгоритм JPEG, масштабирование изображений.

Список лит.: 21 назв.

УДК 519: 816

A Comparative Assessment of the «Rigid» Ranking Method, of the Fair Compromise, and the Uniform Optimality Methods in the Hyper-vector Ranking of Systems Tasks

*Safronov V. V.* IUS, 2011. N 3. P. 2–8.

The task of hyper-vector ranking of systems is set forth. The general principles of this task' solution, the application's features of the «rigid» ranking method, the fair compromise, and the uniform optimality methods are presented. Numerical example is given.

*Keywords* — Hypervector Ranking, Criteria, Convolution of Criteria, Fair Compromise Methods, Uniform Optimunness Methods.

Refs: 12 titles.

УДК 681.518.+519.724

Probabilistic Adaptive Algorithms for Discrete Representation of Analog Signals. Part 2: Comparative Analysis

*Tikhonov E. P.* IUS, 2011. N 3. P. 9–14.

This article contains results of determination of optimal sampling interval for probabilistic adaptive algorithms using different renewal functions. A comparative analysis of the introduced adaptive algorithms with a concrete sampling technique is performed. Basic relations of sampling intervals, which were obtained in a variety of ways, are cited explicitly in this work.

*Keywords* — Optimum Interval, Restore Function, Adaptive Algorithm, Benchmark Analysis.

Refs: 5 titles.

УДК 004.932.4

Improving the Quality of Compressed Images Using Pre-Scaling

*Solovyev N. V., Shifris G. V.* IUS, 2011. N 3. P. 15–23.

Considered is a method to improve the quality of images compressed by the JPEG algorithm using pre-scaling. The choice of the quantitative evaluation of the image quality is proven. Scaling methods are analyzed in terms of processing speed and quality of the reconstructed image.

*Keywords* — Compressed Images, Algorithm JPEG, Scaling Images.

Refs: 21 titles.

УДК 004.932, 631.171

Сравнение алгоритмов дешифрации аэрофотоснимков земель сельскохозяйственного назначения

*Манылов И. В.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 24–29.

Проводится сравнение алгоритма расчета евклидова расстояния и алгоритма расчета расстояния Махаланобиса для целей повышения точности дешифрации аэрофотоснимков сельскохозяйственных земель и оценки состояния зеленой растительности. Показано, что для повышения точности классификации изображений, сделанных сверхлегкими аппаратами с высоты 1–3 км и имеющих три канала видимого спектра без использования инфракрасного канала, необходимо учитывать влияние спектральных характеристик соседних точек, окружающих анализируемый пиксель, а также включать в класс более одной обучающей выборки с использованием нескольких эталонных областей.

*Ключевые слова* — аэрофотоснимок, сельское хозяйство, цифровая классификация, дешифрация, анализ изображений, автоматизация.

Список лит.: 7 назв.

УДК 004.932, 631.171

Decoding Algorithms Comparison of Aerial Photographs of Agricultural Areas

*Manylov I. V.* IUS, 2011. N 3. P. 24–29.

A comparison of two algorithms, calculation of Euclidian distance and Mahalanobis distance, is presented.: The purpose of this comparison is to increase the accuracy of decoding of aerial photographs used in evaluation of agricultural area and green vegetation conditions. It is shown that it is necessary to take into account the spectrum influence of neighboring points and also to include into the class more than one learning sample, using several reference fields in order to increase the classification accuracy of images, obtained by super-light flying objects at the height of 1–3 km, and which has three channel of visible spectrum without use of the infrared channel.

*Keywords* — Aerial Photograph, Agriculture, Digital Classification, Decoding, Image Analysis, Automation.

Refs: 7 titles.

УДК 681.32

Эллипсо-гиперболический метод построения многопозиционных систем

*Ульянов Г. Н., Лаврентьев Е. А., Павлов И. Н.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 30–33.

Предлагается последовательность формирования временных соотношений для получения суммы и разности дальностей от источника ответного сигнала до приемных постов для двух- и трехмерного случаев. Приведены зависимости по оценке точности метода.

*Ключевые слова* — многопозиционные системы, методы построения многопозиционных систем, эллипсо-гиперболический метод.

Список лит.: 4 назв.

УДК 681.32

Elliptical-Hyperbolic Method for Constructing Multi-Positioning Systems

*Ulyanov G. N., Lavrentyev E. A., Pavlov I. N.* IUS, 2011. N 3. P. 30–33.

A sequence forming temporal relations for getting sums and differences of distances from the reply signal source to the receiving posts for two-and three-dimensional cases is proposed; formulas for evaluation of the accuracy done this way are given.

*Keywords* — Multi-Station Systems, Methods of Constructing Multi-Position System, the Ellipse-Hyperbolic Method.

Refs: 4 titles.

УДК 621.313.32

Физическое моделирование потерь на трение в режиме холостого хода синхронного ВТСП-двигателя

*Андреев Е. Н., Волков Д. А., Орлов А. Р., Тимофеев С. С., Турубанов М. А., Чубраева Л. И., Шишляков В. Ф.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С.

Рассмотрены вопросы, связанные с экспериментальным определением механических потерь, возникающих в погружных высокотемпературных сверхпроводниках синхронных двигателей. Изготовлена специальная модель для проведения исследований в различных средах: в жидком азоте, воде, газообразном азоте, при вращении на воздухе. Проанализированы потери холостого хода при вращении роторного диска в жидком азоте. Приведены результаты экспериментального определения времени выбега ротора в различных средах.

*Ключевые слова* — дисковая электрическая машина, высокотемпературная сверхпроводимость, постоянные магниты, механические потери, потери холостого хода.

Список лит.: назв.

УДК 621.391.15

Алгебраический пространственно-частотно-временной код

*Гофман М. В.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 39–46.

Представлен алгебраический слоённый пространственно-частотно-временной код, в котором элементы каждого слоя кодового слова передаются по доступным в многоантенной системе частотным подканалам, антеннам и посылкам. Также представлены функциональные зависимости между позицией элемента слоённого пространственно-частотно-временного кодового слова и номерами частотного подканала, передающей антенны и посылки. Представлен алгоритм определения элемента слоённого кодового слова для заданного номера частотного подканала, номера передающей антенны и номера посылки.

*Ключевые слова* — многоантенная система, алгебраический пространственно-частотно-временной код, слоённое пространственно-частотно-временное кодовое слово.

Список лит.: 6 назв.

УДК 621.313.32

Physical Simulation of Friction Loss in Idling Synchronous Generators

*Andreev E. N., Volkov D. A., Orlov A. R., Timofeyev S. S., Turubanov M. A., Chubraeva L. I., Shyshlakov V. F.* IUS, 2011. N 3. P.

The problems concerning experimental determination of the mechanical losses appearing in immersed HTSC synchronous machines are discussed. A special model for experimental testing in different media (LN<sub>2</sub>, water, gaseous nitrogen, and air) has been designed. The friction losses during rotation of a rotor disk in LN<sub>2</sub> are analyzed. The results of experimental determination of the rotor's run-down time in different media are demonstrated.

*Keywords* — Disk-Type Electrical Machine, High-Temperature Superconductivity, Permanent Magnets, Mechanical Loss, No-Load Loss.

Refs: titles.

УДК 621.391.15

Algebraic Space-Time-Frequency Code

*Gofman M. V.* IUS, 2011. N 3. P. 39–46.

The paper presents an algebraic layered space-time-frequency code, in which elements of each layer of the codeword transmitted by available in multi-antenna system, frequency sub-channels, antennas, and parcels. It also presents functional relations between the position of the element layered space-time-frequency codewords and the numbers of frequency sub-channels, the transmitting antenna and parcels. An algorithm for determining the element layered codeword for the given number of frequency sub-channel, the number of the transmitting antenna and the number of the parcel are presented.

*Keywords* — Multi-Antenna System, Algebraic Space-Time-Frequency Code, Layered Space-Time-Frequency Codeword.

Refs: 6 titles.



УДК 681.883:629

Акустоэлектронные устройства обработки сигналов многоэлементных линейных антенных решеток

*Захарова Е. В., Петров П. Н.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 47–51.

Систематизированно изложены с единых методических позиций вопросы пространственной обработки сигналов антенных решеток малоизвестным классом акустоэлектронных устройств с переизлучающей решеткой. Отмечена перспективность, с точки зрения технологичности производства, аналоговых процессоров на поверхностных акустических волнах, использующих анизотропные подложки, которые в то же время являются малоэлементными. Описаны структурные схемы акустоэлектронных устройств, служащие в качестве диаграммообразующих схем для многоэлементных антенных решеток.

*Ключевые слова* — аналоговые процессоры, поверхностные акустические волны, пространственная обработка, многоэлементные антенные решетки, диаграммообразующие схемы.

Список лит.: 9 назв.

УДК 62.519

Оптимизация операций управления в многопользовательских распределенных измерительно-управляющих системах

*Комаров В. А., Сарафанов А. В.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 52–56.

Рассмотрен метод, обеспечивающий улучшение эксплуатационных характеристик многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований объектов с большим временем реконfigurирования. Метод основан на минимизации перекрестных дублирующих операций перестройки за счет определения оптимальной последовательности обработки заданий в соответствии с критерием минимума суммарного времени реконfigurирования. Приведены результаты оценки его эффективности средствами имитационного моделирования.

*Ключевые слова* — многопользовательский режим, распределенные измерительно-управляющие системы, дистанционный эксперимент, удаленный доступ, Интернет.

Список лит.: 10 назв.

УДК 681.883:629

Acousto-electronic Devices Processing Signals from Multi-Element Linear Antenna Arrays

*Zakharova E. V., Petrov P. N.* IUS, 2011. N 3. P. 47–51.

In this article, the issues of spatial processing of antenna array's signals by a little-known class of acousto-electronic devices with a reradiating array are systematically reviewed from the uniform methodical standpoint. The promising potentials of the analog processors on the surface acoustic waves, that use anisotropic substrates and are few-elements based at the same time, are pointed out. Block diagrams of acousto-electronic devices used as diagram-forming schematics for multi-element antenna arrays are described.

*Keywords* — Analog Processors, Surface Acoustic Wave, Spatial Processing, Multi-Element Antenna Arrays, Forming a Diagram Schemes.

Refs: 9 titles.

УДК 62.519

Optimization of Process Control in Multi-User Distributed Measuring and Control Systems

*Komarov V. A., Sarafanov A. V.* IUS, 2011. N 3. P. 52–56.

This article presents a method that provides improved performance of multi-user distributed measuring and control systems for the automation of scientific and education experimental research of long time reconfiguration objects. The method is based on the minimization of cross-duplicative operations restructuring by determining the optimal sequence process tasks according to the criterion of minimum total time of reconfiguration. The results of evaluation of its effectiveness by means of simulation are presented.

*Keywords* — Multi-User Mode, Distributed Measuring-Controlling System, Remote Experiment, INTERNET, INTRANET.

Refs: 10 titles.

УДК 519.816

Критерий согласованности парных сравнений

*Падерно П. И., Бурков Е. А., Евграфов В. Г.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 57–60.

Предложен критерий согласованности экспертов, который представляет собой коэффициент значимости противоречивости парных сравнений. Данный критерий позволяет оценить возможность корректного комплексирования экспертных мнений при использовании модифицированного метода анализа иерархий.

*Ключевые слова* — комплексирование мнений, критерий согласованности, метод анализа иерархий.

Список лит.: 6 назв.

УДК 004.75

Организация распределенного автоматизированного рабочего места студента вуза

*Гришаков В. Г., Логинов И. В.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 61–65.

Проводится обзор и отмечаются недостатки современных методов построения автоматизированных рабочих мест студентов высших учебных заведений. Обосновывается система требований к рабочему месту студента. Предлагается для организации рабочего места использовать сервис-ориентированный подход и мобильные хранилища данных.

*Ключевые слова* — автоматизированное рабочее место студента, информационно-вычислительная система вуза, хранилище данных, сервис-ориентированный подход.

Список лит.: 13 назв.

УДК 621.391.266

Система информационной поддержки хирурга при проведении трансуретральной резекции предстательной железы

*Егошин М. А., Хафизов Р. Г., Гарипова Ю. Е.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 66–69.

Представлена система информационной поддержки хирурга при выполнении трансуретральной резекции предстательной железы, основанная на методах обработки сложных биомедицинских изображений. Рассмотрены подходы к обработке изображений предстательной железы методами согласованной и инверсной фильтрации.

*Ключевые слова* — трансуретральная резекция, предстательная железа, биомедицинские изображения, согласованная фильтрация, инверсная фильтрация.

Список лит.: 5 назв.

UDK 519.816

Criterion of the Consistency of Pair-wise Comparisons

*Paderno P. I., Burkov E. A., Evgrafov V. G.* IUS, 2011. N 3. P. 57–60.

A criterion of a consistency of experts which represents coefficient of the importance of discrepancy of pair-wise comparisons is offered. The given criterion allows to estimate a possibility of a correct integration of expert judgments while using the modified analytic hierarchy process.

*Keywords* — Integration of Judgements, Criterion of Consistency, Analytic Hierarchy Process.

Refs: 6 titles.

UDK 004.75

Organization of Distributed University Student Workstation

*Grishakov V. G., Loginov I. V.* IUS, 2011. N 3. P. 61–65.

In this paper we review the state-of-the-art approaches and point out the main drawbacks in the design of automated students' workplaces. The scope of requirements is specified. It is suggested to set up distributed student workplaces using the service-oriented approach and mobile databases.

*Keywords* — Automated Student Workstation, University IT-Infrastructure, Warehouse, Service-Oriented Approach.

Refs: 13 titles.

UDK 621.391.266

Information Support Technology of the Surgeon Performing a Transurethral Prostatectomy

*Egoshin M. A., Khafizov R. G., Garipova Y. E.* IUS, 2011. N 3. P. 66–69.

An information support system of the surgeon performing a transurethral prostatectomy based on processing methods of complex biomedical images is presented. The approaches to the image processing of prostate by the matched and inverse filtering methods are discussed.

*Keywords* — Transurethral Prostatectomy, Biomedical Images, Matched Filtering, Inverse Filtering.

Refs: 5 titles.

УДК 330.101.5

Логико-вероятностные модели риска неуспеха решения трудных экономических проблем

*Соложенцев Е. Д., Яценко С. В.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 70–75.

Предложена структурная модель риска неуспеха решения трудных экономических проблем, в которой субъекты (государство, бизнес, банки, ученые, общественное мнение) и объекты-задачи логически связаны как события. Приведены сценарии, логическая и вероятностная модели риска. Показано, что без ученых, И<sup>3</sup>-технологий и общественного мнения невозможно эффективно решить трудные экономические проблемы России.

*Ключевые слова* — логическая модель, вероятностная модель, риск, неуспех, экономика, событие, государство, бизнес, банки, ученые, общественное мнение, взятки, коррупция.

Список лит.: 10 назв.

УДК 334.723.4

Формирование риск-профиля проектов государственно-частного партнерства

*Дубровский В. Ж., Кузьмин Е. А.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 75–81.

Показана сложная организационная структура для реализации проектов государственно-частного партнерства, определены основные виды проектов. Представлены авторские подход и инструменты оценки рисков проектов государственно-частного партнерства. Введено понятие ключевых показателей риск-эффективности, предложен базовый набор показателей риск-эффективности проектов государственно-частного партнерства, которые могут быть использованы в механизмах принятия управленческих решений на различных уровнях.

*Ключевые слова* — проектный риск-менеджмент, государственно-частное партнерство, оценка рисков, ключевые показатели риск-эффективности.

Список лит.: 4 назв.

УДК 681.51

Оценка вероятности выполнения техническим комплексом своих функций с учетом изменения его свойств

*Салангин А. А.* Информационно-управляющие системы, 2011. № 3. С. 82–84.

Для оценки показателей функционирования в экспериментах с изменяющейся моделью может быть предложен метод аппроксимации траектории успешных испытаний, основанный на гипотезе об экспоненциальном росте вероятности успешной работы технического комплекса. В статье содержание метода доведено до вычислительного эксперимента на примере оценки вероятности выполнения тактической задачи.

*Ключевые слова* — модель, траектория испытаний, вычислительный эксперимент.

Список лит.: 2 назв.

UDK 330.101.5

Logic and Probabilistic Models of Non-Success Risk of Solving Difficult Economic Problems

*Solozhentsev E. D., Yatsenko S. V.* IUS, 2011. N 3. P. 70–75.

We offer a structural non-success risk model of solving difficult economical problems. The model logically connects the subjects (state, banks, scientists, social opinion) and the objects-tasks as events. We make logical and probabilistic models of the risk. It is shown that efficiently solving Russia's difficult problems without employing scientists, new technologies and social opinions is impossible.

*Keywords* — Logical, Probabilistic, Model, Risk, Non-Success, Economics, Problem, Event, Government, Business, Banks, Scientists, Social Opinion, Bribes, Corruption.

Refs: 10 titles.

UDK 334.723.4

Formation of the Risk-Profile of Public-Private Partnership

*Dubrovsky V. Zh., Kuzmin E. A.* IUS, 2011. N 3. P. 76–81.

A complex organizational structure for implementing public-private partnership is shown, and the main types of projects are identified. The author's approach and tools for risk assessment of projects of public-private partnership are presented. The concept of key indicators of risk-effectiveness is introduced, a basic set of indicators of risk-effectiveness of public-private partnerships that can be used in the mechanisms of decision making at various levels is proposed.

*Keywords* — Project Risk Management, Public-Private Partnership, Risk Assessment, Key Indicators of Risk-Benefit.

Refs: 4 titles.

UDK 681.51

Estimating the Probability of a Technical Complex Performing its Functions Considering Changes of its Properties

*Salangin A. A.* IUS, 2011. N 3. P. 82–84.

For the evaluation of the performance indexes in the experiments with the changing pattern there can be offered a method of successful tests trajectory approximation, based on the hypothesis of the exponential increase of the probability of the technological unit successful operation. In this article the core of the method has been developed up to a computational experiment on the example of the probability evaluation of tactical task performance.

*Keywords* — Pattern, Trajectory of Tests, Computational Experiment.

Refs: 2 titles.

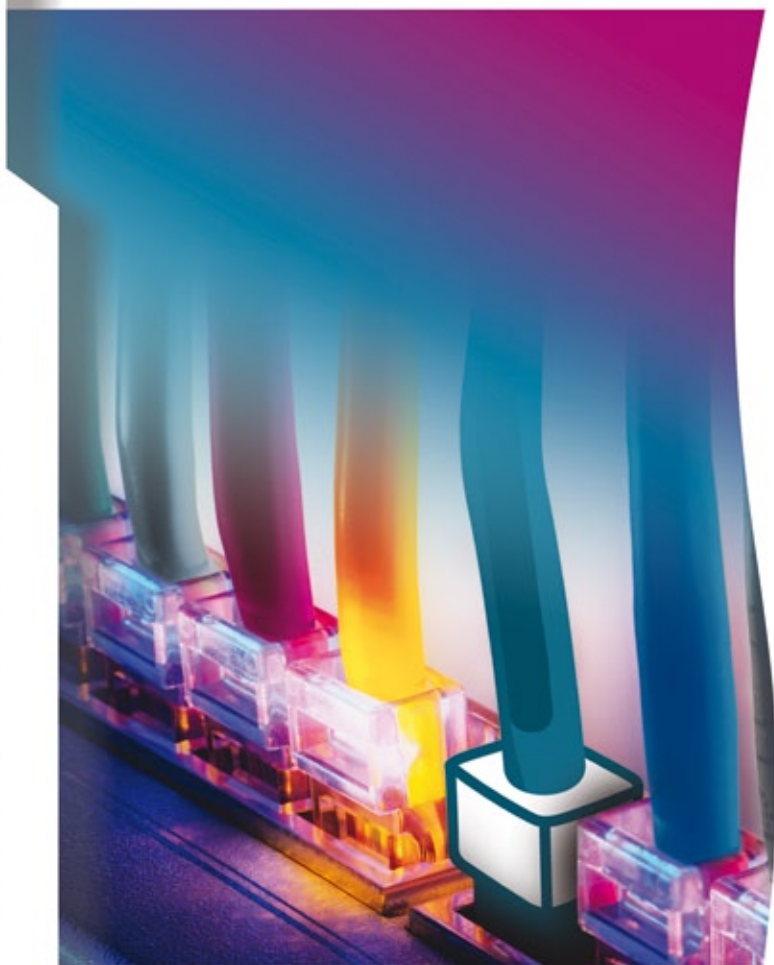
ПРАВИТЕЛЬСТВО УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ  
 АДМИНИСТРАЦИЯ ГОРОДА ИЖЕВСКА  
 УДМУРТСКАЯ ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПАЛАТА  
 КЛУБ ИТ-ДИРЕКТОРОВ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ  
 ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР «УДМУРТИЯ»

**ПРИГЛАШАЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ К УЧАСТИЮ В ВЫСТАВКЕ!**

ВСЕРОССИЙСКАЯ ВЫСТАВКА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

# ИнфоТех-2011

**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
- Мобильные 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



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

3412) 733-585, 733-587, 733-591 (доб. 1194, 1186); e-mail: it@vcudmurtia.ru  
 m.ru, vcudmurtia.pф

Информационные партнеры:



Интернет-спонсоры:

