

# Информационные технологии

УДК 57.01+577.4

## СЖАТОЕ СПЕКТРАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОНКАТЕНИРОВАННЫХ ТЕКСТОВ

*Л.С. Бекасов*<sup>1</sup>

Самарский государственный технический университет  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассмотрена возможность формального представления конкатенированных текстов с неопределённой семантикой спектральным методом на базе ортогональных импульсных функций, у которых начало отсчёта параметризовано, а спектральная характеристика сжата и определяется величиной порядка отсчётов. Показано, что данный метод обладает идеальной разрешающей способностью.*

**Ключевые слова:** системы хранения данных, сжатие, импульсные ортогональные функции, модифицированная базисная система функций, ранжирование алфавита

### Введение

Развитые нанотехнологии позволяют получать сверхкомпактную электронную технику, которая проникает практически во все жизненно важные сферы человеческой деятельности. Однако системные стратегии построения сверхминиатюрных устройств и основополагающие теории, на которых базируются (строятся) современные устройства, меняются не столь стремительно. Свидетельством тому являются средства вычислительной техники и все те хозяйственные отрасли, куда эта техника проникла. Все вычисления в них имитируются логическими процедурами двоичной алгебры. Выход из этой ситуации учёные и разработчики пытаются найти, в том числе, через фундаментальные исследования информационных процессов живых систем. Последние же построены на иных принципах, в отличие от «мёртвых» устройств, принципиально не способных к воспроизводству себе подобных. Именно это свойство живых систем (воспроизводить себе подобных) и обуславливает их уникальность.

Известно, что все живые устройства подразделяются на два класса. В простейших организмах (грибах) программа их существования и размножения сформирована в молекулах дезоксирибонуклеиновой кислоты, находящейся вне ядра клетки (ядро как таковое у них отсутствует), тогда как в более сложных организмах (растения, птицы, морские животные, человек) сама клетка организована иначе. Закономерности её развития и эволюции также записаны в молекулах ДНК, но последние находятся внутри ядра клетки. Более того, как утверждают биологи [1, 2], программы со-

---

<sup>1</sup> Бекасов Лев Степанович, кандидат технических наук, доцент.

хранения видов в таких системах хранятся в 46 хромосомах, каждая из которых содержит свой раздел развития организма.

Обобщённая структурная схема клетки (системы, порождающей себе подобных) проста. Она состоит из двух составляющих – системы хранения данных и внутриклеточной среды и реализует принцип «вещь в себе», т.е. замкнутость. Что касается внутриклеточной среды, то она выполняет многие функции, например, является средой обитания различного «инструментария», порождаемого клеткой, и обеспечивает энергией процессы обмена (метаболизм) в целом. Уровень организации следующего шага иерархии также прост: это непосредственно клетка и внеклеточная среда, включая внеклеточную жидкость.

Все программы, обеспечивающие нормальную непрерывную регенерацию многочисленных компонент живого организма, представлены в виде *конкатенированно-го* чередования четырёх элементарных компонент – букв генетического алфавита. Общее количество букв, определяющее полный объём данных, зависит от природы конкретного организма. Так, длина ДНК человека содержит несколько миллиардов сцеплённых нуклеотидов. Одна из особенностей такой упаковки определяется тем, что вся информация, касающаяся конституционных параметров организма, защищена от спонтанных модификаций (мутаций), которые, однако, обуславливают индивидуальные неповторимые особенности целостности всего организма.

Механизм защиты на элементарном уровне прост, а именно каждый элемент одной цепочки ДНК сцеплён своим азотистым основанием с комплементарным элементом. Здесь следует заметить, что «буквы» сцеплены между собой по двум взаимно перпендикулярным координатам. В итоге конструкция такого хранилища данных представляется в виде «верёвочной лестницы». При этом обе нитки «лестницы» в информационном смысле равнозначны, а сами буквы *комплементарны попарно*. Важным является то обстоятельство, что мутации происходят относительно часто и почти не затрагивают конституционную часть системы в целом. Поскольку при этом информация модифицируется, то модифицируется и продукт, созданный в соответствии с этой программой, сохраняя при этом функции и фенотипы всех компонент, создаваемых заново.

Что касается защиты *данных в целом*, то этот механизм очень сложный, и на разных уровнях структурной организации такая защита осуществляется не единым принципом.

Важность динамики внутриклеточных процессов очевидна, и если имеется некоторый формальный аппарат, отражающий сущность статической и динамической организации, то, естественно, этот аппарат (метод) должен обладать идеальной чувствительностью по отношению к элементарным изменениям в системе хранения данных. В данной работе иллюстрируется новый модифицированный метод спектрального анализа сцеплённых букв алфавита, направленного на поиск их семантических признаков. Это – цель настоящего исследования.

## **Методы и инструменты**

Анализ публикаций по биоинформатике показывает, что подавляющее большинство авторов использует статистические принципы [3, 4, 5] для формального представления как самих систем хранения данных, так и их отдельных компонент с целью их идентификации и верификации. Однако эффективность этих методов, как отмечают сами авторы, невысока. Низкая эффективность определяется динамиче-

ской природой зашумлённости самих данных т.е. непрерывными мутациями как в рабочей, так и в дремлющей части какого-либо гена. Если и возможен какой-то статистический метод относительно точной формализации отдельно взятой структуры, то он будет отражать одно из мгновенных состояний системы хранения данных (ДНК) либо её подсистем.

Жёстким требованием, предъявляемым к формальным представлениям генетического тезауруса, является точность преобразования самих данных. Эта задача очень сложна, в первую очередь, из-за их огромной длины и требует, прежде всего, тщательного обсуждения самой стратегии формализации. Иначе сверхдлинные цепочки, созданные из четырёх букв, нужно будет представить в более компактном виде. Это означает, что формализация, по сути, должна преобразовывать данные в более сжатую организацию, и это сжатие данных должно иметь идеальную чувствительность, т.е. смена хотя бы одной буквы в многомиллионной совокупности должно адекватно отражаться в иной форме представления этих данных (что невозможно получить, используя статистические методы). С учетом последних достижений в теории и методах спектрального анализа псевдослучайных сигналов представляется целесообразным рассмотреть основные моменты теории линейных интегральных преобразований и линейных интегральных уравнений.

Линейное интегральное преобразование в общем случае имеет вид [6]

$$f(\xi) = \int K(x, \xi) f(x) dx = F(x). \quad (1)$$

Предполагается, что  $x$  и  $\xi$  изменяются в одном и том же интервале или в одной и той же области. Символическое интегральное преобразование вида

$$\int \delta(x, \xi) f(\xi) d\xi = F(x) \quad (2)$$

представляет единичное преобразование. Далее считается, что ядро  $K(x, \xi)$  вырожденное, т.е. может быть представлено в виде конечной суммы

$$K(x, \xi) = \sum_{i=1}^{\infty} f_i(x) h_i(\xi), \quad (3)$$

что указывает на перспективность спектральных методов с различными базисами. Спектральная теория представления сигналов утверждает, что в общем случае функция времени  $f(t)$  представляется в виде обобщённого ряда Фурье:

$$f(t) = \sum_{k=0}^n S(k) \eta_k(t), \quad (4)$$

где  $\eta_k(t)$  –  $k$ -тая базисная фиксированная система функция;  $S(k)$  – весовой коэффициент при  $k$ -той базисной функции;  $(n + 1)$  – число членов ряда.

Из условия (4) следует, что вся информация о конкретном сигнале  $f(t)$  содержится в спектре  $S(k)$ . Здесь необходимо учесть то обстоятельство, что система базисных функций должна быть полной и ортогональной. Далее следует принимать во внимание особенности сигналов (аналоговые, дискретные) и базисных функций, а также то, с какой целью применяется спектральный метод.

При распознавании, например, структуры большого количества  $N$  ( $N \gg 1$ ) конкатенированных дискретных символов, представленных в форме ранжированных последовательностей, в частности, четырёх простых чисел, упорядоченность которых подвержена спонтанным шумам, необходимо распознавать не только пределы функционально различных подмножеств, но и характер конкатенации, иначе – возмож-

ность пересечения этих подмножеств. Ещё одной, не менее важной, задачей является проблема сжатия данных, поскольку в больших системах хранения данных типа молекулы ДНК число конкатенированных элементов оценивается величинами порядка  $k \times 10^9$ , где  $k = 3 \div 6$ .

В практике спектрального анализа широко используются несколько видов базисных ортогональных функций, в частности синусоидальные (экспоненциальные), вейвлет-функции и некоторые разновидности импульсных функций, например Уолша.

Практическое применение обобщённого ряда Фурье вида

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k u_k(t),$$

где  $u_k(t)$  –  $k$ -тая базисная функция;  $f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k u_k(t)$  – весовой коэффициент, как

правило, базируется на применении базисных функций двух видов: гармонических и импульсных. Частотные свойства сигнала  $f(t)$  выявляются путём применения комплексной экспоненциальной системы базисных функций, а дискретные методы используют единичные импульсы.

Анализ спектральной теории с различными базисными функциями с точки зрения полноты получения данных о спектральных свойствах и временной структуры сигнала представлен в [7]. Поскольку известными методами (аналоговыми и дискретными) невозможно достичь указанной полноты преобразования, авторы предложили модифицированную базисную комплексную систему импульсных функций, с помощью которой можно получить спектр, отвечающий указанным требованиям. Предложенная система функций определяется на дискретном множестве

$$M = \{l : l = 0, 1, 2, \dots, 2^n - 1\} \quad (5)$$

и имеет вид

$$Bah_u^k l = \hat{c}_u^k(l) - i \hat{s}_u^k(l), \quad (6)$$

где  $u = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$ ;  $2^n$  – число подинтервалов, составляющих период некоторого подлежащего анализу дискретного сигнала  $f(l)$ .

Функции  $\hat{c}_u^k(l)$  и  $\hat{s}_u^k(l)$  формируются на основе вспомогательных функций  $c_u^k(l)$  и  $s_u^k(l)$  посредством их сдвигов на  $k$  подинтервалов, где  $k = 0..2^{n-u-1} - 1$ .

Функции  $c_u^k(l)$  и  $s_u^k(l)$  определяются как

$$c_0(l) = 1, s_0(l) = 0, l \in M. \quad (7)$$

В случае  $u \neq 0$  и  $l$ , изменяющегося от 0 до  $2^n - 1$  с шагом  $2^{n-u-1} - 1$ ,

$$c_u(l) = \sum_{m=0}^{2^n-1} (\cos(2^{u-n} \pi m)) e(l-m); \quad (8)$$

$$s_u(l) = \sum_{m=0}^{2^n-1} (\sin(2^{u-n} \pi m)) e(l-m). \quad (9)$$

Если  $l$  принимает другие значения, то  $c_u(l) = s_u(l) = 0$ .  $e(l-m)$  представляет собой единичный импульс, определяемый из следующих условий:

$$e(l-m) = \begin{cases} 1, l = m; \\ 0, l \neq m. \end{cases} \quad (10)$$

Формирование амплитудно-частотного спектра анализируемого сигнала  $f(l)$  осуществляется в соответствии с выражением

$$F_u = \sum_{k=0}^{2^{n-u}-1} F_u^k, \quad (11)$$

где  $u = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$ ;

$$F_u^k = \sqrt{(a^k)^2 - (b^k)^2}; a_u^k = \sum_{m=0}^{2^{u-1}-1} f(l_m) c_u(l); b_u^k = \sum_{m=0}^{2^{u-1}-1} f(l_m) s_u(l); \quad (12)$$

$f(l_m)$  – значение анализируемого сигнала в точке  $l_m$ , где  $l_m = 2^{n-u-1} m$ .

Амплитудно-частотный спектр, полученный в соответствии с выражением (12), является инвариантным к временным сдвигам сигнала  $f(l)$ .

Анализ приведённых выше соотношений показывает, что в этом методе базисные ортогональные функции зависят от двух факторов (подмножеств) – параметров  $u$  и  $k$ . Причём параметр  $u$  зависит от порядка отсчётов ( $u = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$ ), тогда как  $k$  – число подинтервалов – зависит от  $u$ . Иначе этот параметр можно интерпретировать как «движущуюся» систему отсчётов для ортогональных сигналов, которые распределены в исходном дискретном пространстве в соответствии с показателем степени  $n$  и, по сути, определяют число спектральных компонент. Следовательно, стратегия метода преобразует заданное пространство отсчётов в сжатую форму, в частности, общему числу  $M$  отсчётов (5) соответствует  $n$  спектральных составляющих. Отсюда коэффициент  $\beta$  сжатия представляется соотношением

$$\beta = \frac{M}{n} = \frac{2^n}{n}. \quad (13)$$

## Результаты и обсуждения

Следующий шаг решения поставленной задачи – это численное представление букв, например, генетического AGCT-алфавита. Возможны принципиально два различных подхода;

а) представлять каждый из нуклеотидов их физическим параметром, в частности, через энергию водородной связи [8] либо через молекулярную массу [9];

б) представлять каждый из нуклеотидов через двоичную систему счисления в виде последовательности нулей и единиц, т.е. в цифровом виде, расположенных на её собственной координате движения.

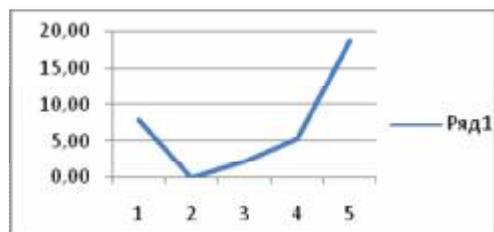
Первый подход даёт возможность использовать аппарат известных линейных преобразований по соотношениям (1)–(4). Его позитивные и негативные стороны описаны в [7].

Второй подход характерен для дискретных математических методов. Например, используя представленные выше соотношения (5) – (12), удастся сжать информацию. Однако в этом случае эффективное сжатие данных можно получить, например, при условии препарирования AGCT-пространства на отдельные подпространства, поскольку представление AGCT-алфавита коэффициентами ранжирования в виде простых чисел 1, 2, 3, 4 позволяет получить лишь качественную оценку множества нуклеотидов. Получение спектров для AGCT-подпространств в препарированном

виде через множества размером в  $2^n$  затруднительно, поскольку вероятность того, что в секвенированном пакете нуклеотидов число его элементов будет равно  $2^n$ , ничтожно мала. Далее возникает задача разделения нулей. Иначе, представив пакет нуклеотидов нулями и единицами (обычным двоичным кодом) общим числом  $M=2^n$ , следует отличать те «нули», которые заменили «выброшенные» из общего пакета три других типа нуклеотидов, от нулей-«заполнителей», добавленных для того, чтобы заполнить множество отсчётов до величины  $2^n$ . Ниже этот вопрос предлагается решить за счёт ввода постоянной составляющей малого уровня (порядка одного процента) по длине, соответствующей длине AGCT-пакета. В итоге цифровое представление  $N$ -подпространства ( $N$  – любой нуклеотид) будет состоять из трёх уровней:  $N$ -уровень единиц; ( $\sim N$ )-уровень постоянной составляющей ( $\sim$  знак инверсии); и 0-уровень, где 0-уровень – «уровень-заполнитель», причём каждый из нуклеотидов ( $\sim N$ ) по своему значению должен отвечать условию ( $\sim N \rightarrow 0$ ).

Пример. Применяя формулы (5)–(12) к гипотетической конкатенации из 32 символов GACAGGACAGACTGTTCGACAGGACAGACTGTC ( $2^5=32$ , здесь  $n=5$ ), которая преобразовывается далее в соответствии с ранжированием по молекулярным весам нуклеотидов (G=4, F=3, T=2, C=1 [9]) в числовую последовательность  $F(l)=43134431343124214313443134312421$ , получим по формулам (5)–(12) характеристику пяти спектральных компонент, отражающих качество пакета (рис. 1).

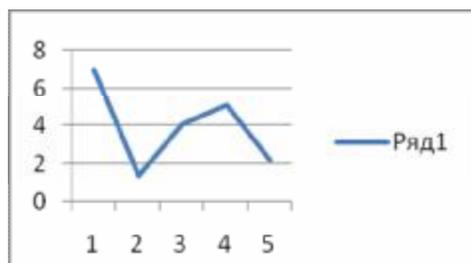
$F_0$	8,00
$F_1$	0,00
$F_2$	2,24
$F_3$	5,39
$F_4$	18,68154



Р и с. 1. График спектральных компонент  $F_i$  для множества  $F(l)$   $F_0=8,00$ ;  $F_1=0,00$ ;  $F_2=2,24$ ;  $F_3=5,39$ ;  $F_4=18,68154$

Возьмём другую модель  $f_0(l)$  из 25 символов с добавленными (до 32) семью нулями.  $F_0(l)=43143431242143443134124210000000$ . Вычисленный спектр по тем же соотношениям даёт следующие результаты (рис. 2).

$F_0$	7,00
$F_1$	1,41
$F_2$	4,12
$F_3$	5,10
$F_4$	2,236068



Р и с. 2. Спектральные характеристики



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фундаментальная и клиническая физиология: Учебник / Под ред. А.Г. Камкина и А.А. Каменского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 1072 с.
2. М. Снгер, П. Берг. Гены и геномы. В 2-х т. – М.: Мир, 1998. – 666 с.
3. J.V. Braun, H-G.Muller. Statistical Methods for DNA Sequence Segmentation // Statistical Science. 1998. – Vol. 13. – №2. – P. 142-162.
4. М.Б. Чалей1, Н.Н. Назипова, В.А. Кутыркин. Совместное использование различных критериев проверки однородности для выявления скрытой периодичности в биологических последовательностях. // Математическая биология и биоинформатика. – 2007. – Т. 2. – №1. – С. 20-35.
5. Ю.Д. Нечипуренко, А.М. Вольф, Г.В. Гурский. Статистические флуктуации в процессах регуляции экспрессии генов: рассмотрение с точки зрения статистической механики // Молекулярная биофизика. – 2003. – Т. 48. – Вып. 6. – 986-997 с.
6. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1970. – С. 401-407.
7. G.I.Bachrushina., A.P. Bachrushin. Development and Investigation of a New Rectangular Orthogonal System Functions for Invariant Object Recognition // Proceedings of the Sixth International Conference «Advanced Computer Systems». Szezecin-Poland. November 1999. – P. 64-67.
8. Полтев В.И. Возможные конфигурации димеров оснований ДНК Гуа-Цит. Расчёты методами молекулярной механики и теории функционала плотности / В.И. Полтев, В.И. Данилов, А. Леш, А. Юркевич, А.С. Дерябина, Э. Гонзалес // Молекулярная биофизика. – 2003. – Т. 48. – Вып. 5. – 821-829 с.
9. Л.С. Бекасов. О стратегиях моделирования генетических структур // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». – Вып. 38. – 158-162 с.

*Статья поступила в редакцию 1 сентября 2008 г.*

UDC 57.01+577.4

## COMPRESSED SPECTRAL REPRESENTATION OF CONCATENATED TEXTS

**L.S. Bekasov<sup>1</sup>**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

*Possibility of formal representation of concatenated texts having uncertain semantics is considered. It uses spectral method based on orthogonal pulse functions which are characterized by parametrised reference points and compressed spectral response defined by degree of count. It is clearly shown that this method has an ideal resolution*

**Key words:** data storage systems, orthogonal pulse functions modified basis of function system, alphabet ranking

---

<sup>1</sup> Lev S. Bekasov, Candidate of Technical Sciences, Associate professor.

## ОПТИМИЗАЦИЯ СКАНИРУЮЩЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЪЕМКИ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

*С.А. Бутырин*<sup>1</sup>, *А.В. Бутко*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт проблем надежности механических систем Самарского государственного технического университета (НИИ ПНМС СамГТУ)  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

<sup>2</sup> Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс»  
443009, Самара, ул. Земяца 18

*Рассматривается задача определения оптимального азимута при объектовой сканирующей съемке Земли из космоса. Приводится численный алгоритм и результаты решения задачи на демонстрационном примере.*

**Ключевые слова:** *космический аппарат, оптико-электронная съемка, движение изображения, минимизация поперечной скорости*

**Введение.** Разрешающая способность оптико-электронного телескопического комплекса (ОЭТК), установленного на борту космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли, зависит от пространственного движения космического аппарата (КА) вокруг его центра масс на маршруте съемки. Для получения высококачественного изображения используется метод расчета маршрутного движения КА с условием выравнивания продольной составляющей скорости движения изображения (СДИ) в фокальной плоскости (ФП) телескопа [1, 2]. При этом необходимо, чтобы поперечная составляющая СДИ  $V_z$  удовлетворяла условию  $V_z \leq V_d$ , где  $V_d$  – некоторая константа. Невыполнение этого условия может привести к смазу изображения, связанному с нарушением процесса накопления зарядов в матрице ПЗС. При объектовой съемке единственным свободным параметром является азимут съемки  $A_0$ , от которого существенно зависят поперечные СДИ на краях линейки оптико-электронных преобразователей (ОЭП).

**Основная часть.** Рассматривается задача определения оптимального азимута  $A_{opt}$  съемки, доставляющая минимум функционалу

$$F = (V_z^-)^2 + (V_z^+)^2 \Rightarrow \min_{A_0}, \quad (1)$$

в диапазоне допустимых значений углов ориентации КА относительно орбитальной системы координат. В (1) обозначено  $V_z^-, V_z^+$  – поперечные СДИ на левом и правом концах линейки ОЭП.

Для решения задачи используются следующие правые ортогональные системы координат (СК): инерциальная экваториальная СК (ИСК)  $Ox_I y_I z_I$  текущей эпохи

---

*Бутырин Сергей Анфимович, кандидат технических наук, с.н.с., заведующий лабораторией*  
*e-mail: [butyrinsa@mail.ru](mailto:butyrinsa@mail.ru)*

*Бутко Александр Владимирович, начальник группы*  
*e-mail: [sandrbut@yandex.ru](mailto:sandrbut@yandex.ru)*

[1]; орбитальная СК (ОСК)  $O_c x_o y_o z_o$ , имеющая начало в центре масс КА  $O_c$ , ось  $O_c y_o$  которой направлена по радиали орбиты, а ось  $O_c z_o$  – по отрицательному направлению нормали орбиты; визирная СК (ВСК)  $O_s x_v y_v z_v$ , связанная с корпусом КА началом в центре проектирования  $S$  и визирной осью  $O_s x_v$ , направленной по оптической оси ОЭТК в сторону наблюдаемого объекта; горизонтная СК (ГорСК) с началом в наблюдаемой точке  $O_h$  на поверхности Земли; ось  $O_h X_h$  направлена по местной вертикали, а оси  $O_h Y_h$  и  $O_h Z_h$  лежат в плоскости, касательной к поверхности общеземного эллипсоида (плоскости местного горизонта) и имеют направление соответственно на местный восток и север. Для простоты принимается, что центр масс КА и центр проектирования совпадают. Начало координат фокальной плоскости ОЭТК  $O_f$ , в которой расположены оптико-электронные преобразователи, сдвинуто от начала ВСК в отрицательном направлении оси  $O_s x_v$  на величину фокусного расстояния  $f$ , две другие её оси совпадают по направлению с одноименными осями ВСК. Линейка ОЭП длиной  $l$  расположена вдоль оси  $O_f z_f$  симметрично относительно точки  $O_f$ . Также вводится связанная система координат (ССК)  $O_s x_s y_s z_s$ , ориентация которой относительно ВСК определяется постоянным кватернионом  $L_v^s$ . Ориентация КА (ССК) относительно ОСК определяется углами Эйлера-Крылова в последовательности поворотов вокруг осей  $z$ - $x$ - $y$  (тангаж, крен, рыскание) связанной СК.

Метод «с выравниванием» продольной составляющей СДИ накладывает на движение изображения в ФП телескопа следующие условия: продольная СДИ  $V_y$  в центральной точке ФП ( $y=z=0$ ) должна быть равна заданному значению  $V_y(y, z) = V_y(0, 0) = V^*$ ; для поперечной СДИ  $V_z$  должны быть выполнены условия:  $V_z(0, 0) = 0$  и  $\partial V_z(y, z) / \partial z = 0$ ; продольная составляющая СДИ по всей линейке ОЭП должна быть постоянной:  $V_y(0, z) = V^*$ ,  $\forall z \in [-l/2, l/2]$ .

Последнее требование не может быть выполнено строго, так как продольная составляющая скорости нелинейно зависит от координат точек фокальной плоскости.

Продольная  $V_y$  и поперечная  $V_z$  скорости бега изображения в заданной точке линейки ОЭП составляют величины

$$V_y = k \cdot (W_y - W_x d_y / d_x); \quad V_z = k \cdot (W_z - W_x d_z / d_x), \quad (2)$$

где  $\mathbf{d} = \{d_i, i = x, y, z\}$  – вектор наклонной дальности, направленный из центра проектирования  $S$  в наблюдаемую точку земной поверхности;  $\mathbf{W} = \{W_i, i = x, y, z\}$  – вектор линейной скорости точки следа линии визирования (оптической оси ОЭТК) относительно поверхности Земли,  $k = -\sqrt{f^2 + z^2} / d$ ,  $z$  – координата фокальной плоскости, определяющая положение точки на линейке ОЭП. Векторы в (2) даны своими проекциями на оси ВСК.

Вектор наклонной дальности в проекциях на оси ВСК

$$\mathbf{d} = \mathbf{M}_I^v \cdot [\mathbf{R}_z^I(\vartheta, \gamma) - \mathbf{R}_s^I], \quad (3)$$

где  $\mathbf{R}_s^I$  – орбитальный радиус-вектор КА в проекции на оси ИСК,  $\mathbf{R}_z^I$  – вектор, направленный из центра Земли в наблюдаемую точку земной поверхности в проекции на оси ИСК, зависящей от углов тангажа  $\vartheta$  и крена  $\gamma$ ,  $\mathbf{M}_I^V$  – матрица перехода из инерциальной в визирную СК.

Вектор  $\mathbf{W}$  рассчитывается из выражения

$$\mathbf{W} = \mathbf{M}_I^V (\mathbf{V}_e^I - \mathbf{V}_s^I) + \mathbf{V}_\omega, \quad (4)$$

где  $\mathbf{V}_e^I = \mathbf{w}_e \times \mathbf{R}_e^I$ ,  $\mathbf{V}_\omega = \mathbf{d} \times \mathbf{w}$ ,  $\mathbf{R}_e^I = \mathbf{R}_s^I + \mathbf{d}^I$ ,  $\mathbf{w}_e$  – вектор угловой скорости вращения Земли,  $\mathbf{w}$  – абсолютная угловая скорость КА на маршрутном движении в проекции на оси ВСК.

Матрица начальной ориентации КА на маршруте съемки  $\mathbf{M}_I^V$  определяется по начальным значениям тангажа  $\vartheta$ , крена  $\gamma$  и азимута  $A_0$ :

$$\mathbf{M}_I^V = \mathbf{M}_s^V \cdot \mathbf{M}_I^S(\vartheta, \gamma, A_0). \quad (5)$$

Требуемая угловая скорость движения КА  $\boldsymbol{\omega}$  определяется как

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & m_{31}/m_{11} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{v}_s - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{V}^*/f \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где вектор  $\mathbf{v}_s = \mathbf{M}_h^V \cdot \mathbf{M}_I^h \cdot (\dot{\mathbf{R}}_s^I - \mathbf{w} \times \mathbf{R}_s^I) / d$ , а  $\mathbf{M}_h^V = \{m_{ij}, i, j = 1:3\}$  – матрица перехода из горизонтной в визирную систему координат.

Метод определения начального кватерниона ориентации  $L_I^V$  и, соответственно, матрицы  $\mathbf{M}_I^V$ , изложенный в [1, 2], использует тригонометрические функции, векторные произведения и решение квадратного уравнения, т.е. имеем нелинейную зависимость компонентов СДИ  $V_y, V_z$  от азимута  $A_0$  (1)-(6), что приводит к необходимости решения нелинейного уравнения  $\partial F / \partial A_0 = 0$ . Поэтому предлагается приближенный численный алгоритм, состоящий в следующем:

1. Цикл по углу тангажа  $\vartheta$  с шагом  $\Delta\vartheta$

2. Цикл по углу крена  $\gamma$  с шагом  $\Delta\gamma$

Вычисление наклонной дальности  $\mathbf{d}$  (3) по углам ориентации  $\vartheta, \gamma$  и орбитальному радиус-вектору КА  $\mathbf{R}_s^I$ .

Вычисление матрицы  $\mathbf{M}_h^V$ .

3. Цикл по углу азимута  $A_0$  с шагом  $\Delta A_0$

Вычисление матрицы  $\mathbf{M}_I^V$  (5) по известным  $\mathbf{M}_h^V, \mathbf{d}$  и азимуту  $A_0$ .

Вычисление угловой скорости  $\mathbf{w}$  (6).

Вычисление  $\mathbf{W}$  и поперечной скорости на левом  $V_z(0, -l/2)$  и правом  $V_z(0, +l/2)$  концах линейки ОЭП.

Вычисление функционала (1). Накопление массива функционалов в функции азимута.

Конец цикла по  $A_0$ .

Численное определение минимумов функционала (1) по азимуту  $A_0$ .

Конец цикла по  $\Delta\gamma$ .

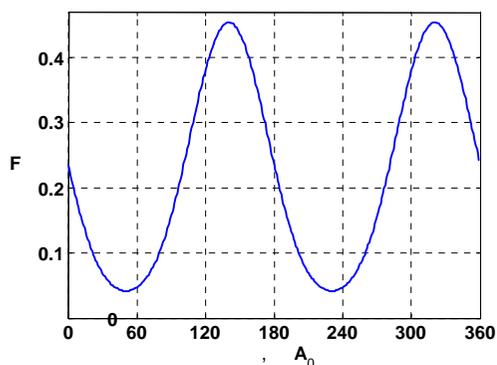
Накопление массива минимумов в функции углов тангажа и крена.

Конец цикла по  $\Delta\vartheta$ .

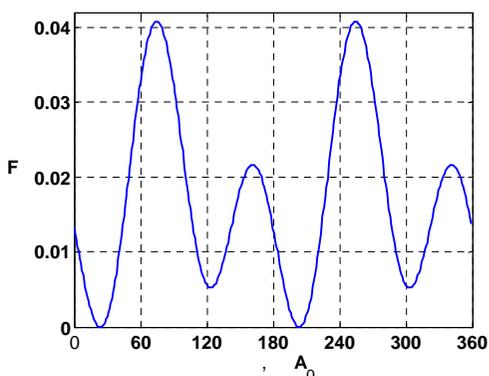
Приведем пример решения задачи для следующих данных: высота круговой орбиты 600 км, наклонение  $60^\circ$ , фокусное расстояние ОЭТК  $F = 10$  м, длина линейки ОЭП  $l = 0.4$  м; заданное значение продольной СДИ  $V^* = 60$  мм/с; диапазон углов тангажа и крена  $\vartheta \in u, \gamma \in u, u = [-30^\circ, 30^\circ]$ .

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы: функционал  $F(A_0)$  имеет 2 или 4 минимума  $A_{opt}^{(i)}$ ; два минимума с наименьшими значениями  $F^{(i)} = F(A_{opt}^i)$  соответствуют значениям  $A_{opt}^{(i)}$ , отличающимся на  $180^\circ$ .

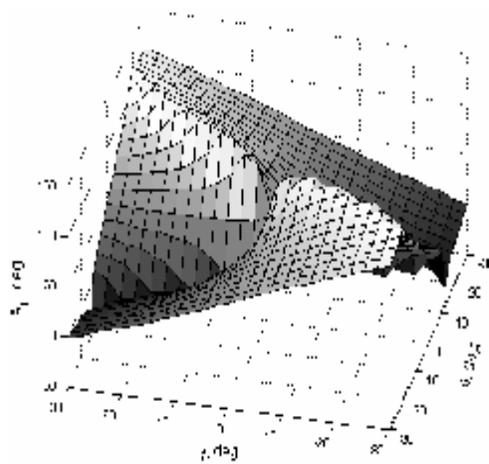
На рис. 1 и 2 показаны зависимости функционала  $F(A_0)$  для углов: на рис. 1  $\vartheta = +5^\circ, \gamma = -5^\circ$ , на рис. 2  $\vartheta = 0^\circ, \gamma = -5^\circ$ .



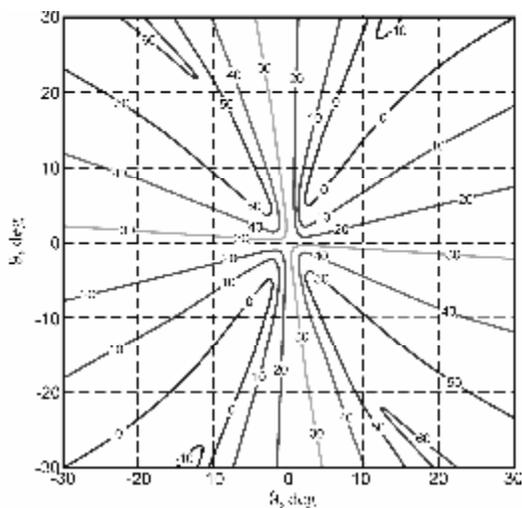
Р и с. 1. Случай двух минимумов



Р и с. 2. Случай 4-х минимумов



Р и с. 3. Поверхность оптимального азимута



Р и с. 4. Линии уровня поверхности оптимального азимута

На рис. 3 показана поверхность оптимального азимута, а на рис. 4 – линии равных уровней оптимальных азимутов, соответствующих первому минимуму функционала для принятого диапазона углов тангажа и крена. Как видно, оптимальные азимуты съемки в первом и третьем квадрантах плоскости изменения углов тангажа и крена находятся в диапазоне  $[-10^{\circ}, 26^{\circ}]$ , а во втором и четвертом – в диапазоне  $[26^{\circ}, 60^{\circ}]$ .

Данные рис. 4 применимы для случаев, когда вектор, направленный в горизонтальной плоскости под углом азимута съемки от плоскости меридиана, имеет положительную проекцию на направление полета. В случае, когда проекция этого вектора на направление полета отрицательна, необходимо использовать второй по значению минимум, соответствующий азимутам, отличающимся на  $180^{\circ}$ .

**Заключение.** Как видно из рис. 1, 2, максимумы и минимумы функционала  $F$  существенно различаются, что позволяет сделать вывод о необходимости съемки с азимутами, близкими к оптимальным. Так, при 32 шагах накопления в ПЗС матрице, что соответствует в рассматриваемом случае допустимой поперечной скорости  $V_d = 0.6$  мм/с и угле тангажа  $\vartheta = 0$ , съемка с произвольным азимутом возможна только при углах крена  $\gamma < 20^{\circ}$ , а при углах тангажа  $\vartheta > 7^{\circ}$  съемка с произвольным азимутом невозможна, т.е. при значениях азимута, соответствующих максимуму функционала  $F$ , не будет выполнено условие  $V_z \leq V_d$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бутырин С.А.* Синтез маршрута космического аппарата наблюдения Земли с выравниванием продольной составляющей скорости движения изображения // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – 2005. – Вып. 37. – С. 128-134.
2. *Бутырин С.А.* Кинематический синтез программного углового движения космического аппарата при оптико-электронной съемке Земли // Известия Самарского научного центра РАН. – 2007. – Т.9. – №3. – С. 664-670.

*Статья поступила в редакцию 2 сентября 2008 г.*

UDK 681.51, 629.78

## OPTIMIZATION OF THE EARTH SCANNING OPTO-ELECTRONIC SURVEY FROM A SPACE

*S.A. Butyrin*<sup>1</sup>, *A.V. Butko*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Mechanical Systems Reliability, Samara State Technical University  
244 Molodogvardyevskaya str., Samara, 443100

<sup>2</sup> State Research and Production Rocket-Space Center "TsSKB-Progress"  
18 Zemets str., Samara, 443009

*The problem of the optimal azimuth defining at the object scanning survey of the Earth from a space, is considered. Numeric algorithm and results on the problem's solution for a demonstrating test, are presented.*

**Key words:** *spacecraft, opto-electronic observation, image motion, cross-velocity minimization*

---

*Sergey A. Butyrin, head of laboratory.  
Alexander V. Butko Head of research group.*

## ЛОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОПОВЕЩЕНИЯ В РАЙОНАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ В УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ

*Т.Г. Габричидзе<sup>1</sup>, И.М. Янников<sup>2</sup>, П.М. Фомин<sup>2</sup>, В.Г. Зозуля<sup>2</sup>, П.А. Морозов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Главное управление МЧС России по Самарской области  
443010, Самара, ул. Красноармейская, 12

<sup>2</sup> Главное управление МЧС России по Удмуртской республике  
426008, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Коммунаров, 325

*Описывается комплекс технических средств и предлагается схема организации локальной системы оповещения в районе размещения потенциально опасных объектов*

**Ключевые слова:** локальная система оповещения, опасные объекты

Локальная система оповещения (далее – ЛСО) представляет собой организационно-техническое объединение сил, средств связи и оповещения, сетей вещания, каналов сети связи общего пользования, обеспечивающих доведение информации и сигналов оповещения до руководящего состава и персонала организации, эксплуатирующей потенциально опасный объект, объектового звена единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (далее – РСЧС), объектовых аварийно-спасательных формирований, в том числе специализированных, руководителей и дежурно-диспетчерских служб организаций, населения, проживающего в зоне действия локальной системы оповещения.

Назначение локальных систем оповещения:

Локальные системы оповещения предназначены для обеспечения доведения сигналов и информации оповещения:

- до руководителей и персонала объекта;
- до объектовых сил и служб гражданской обороны;
- до руководителей (дежурных служб) объектов (организаций), расположенных в зоне действия локальной системы оповещения;
- до оперативных дежурных служб органов управления по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям субъекта Российской Федерации, города, городского района;
- до населения, проживающего в зоне действия локальной системы оповещения.

При авариях, прогнозируемые последствия которых не выходят за пределы потенциально опасного объекта, оповещаются:

- руководители и персонал объекта;
- объектовые силы и службы гражданской обороны.

При авариях, прогнозируемые последствия которых выходят за пределы потенциально опасного объекта, дополнительно оповещаются:

- персонал (руководители, дежурные службы) объектов (организаций), расположенных в зоне действия локальной системы оповещения;

---

*Габричидзе Тамази Георгиевич, кандидат технических наук, генерал-майор, начальник Главного управления МЧС России по Самарской области.*

*Янников Игорь Михайлович, кандидат технических наук, первый заместитель начальника Главного управления МЧС России по Удмуртской республике.*

*Фомин Петр Матвеевич, кандидат технических наук, начальник Главного управления МЧС России по Удмуртской республике.*

- оперативные дежурные службы органов управления по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям субъекта Российской Федерации, города, городского района;
- население, проживающее в зоне действия локальной системы оповещения.

Организации Удмуртской Республики, в ведении которых находятся критически важные и потенциально опасные объекты, проводят работы по реконструкции действующих и созданию новых систем оповещения на базе комплекса технических средств оповещения П-166, предназначенного для использования на проводных линиях связи. При этом при проведении работ по строительству ЛСО в районах со слаборазвитой инфраструктурой связи из-за необходимости строительства новых проводных линий связи значительно (на 50-70%) возрастают затраты и в 2-3 раза увеличиваются сроки работ.

В целях сокращения затрат на строительство новых проводных линий связи по заказу МЧС России ОАО «Владимирский завод «Электроприбор», ОАО «Владимирское КБ «Радиосвязи», ОАО «Ижевский радиозавод» разработали комплекс технических средств оповещения по радиоканалам (далее КТСО-Р), который прошел государственные испытания и рекомендован Межведомственной комиссией к серийному производству.

КТСО-Р предназначен для создания региональных (субъектов Российской Федерации), местных (муниципальных образований) и локальных автоматизированных систем централизованного оповещения в районах со слаборазвитой инфраструктурой связи с целью обеспечения доведения сигналов и информации оповещения до населения с использованием сетей проводного вещания и телевидения, выходных акустических устройств, электросирен и радиовещательных приемников оповещения, а также до должностных лиц с использованием стационарных и носимых приемников персонального радиовызова (пейджеров). КТСО-Р обеспечивает доведение до населения сигналов и информации оповещения по радиоканалам, в том числе:

- формирование, передачу и прием формализованных сигналов оповещения, речевых сообщений и буквенно-цифровых сообщений;
- подготовку и хранение речевых и буквенно-цифровых сообщений;
- автоматический опрос оконечных устройств с целью контроля сохранности и работоспособности;
- управление электросиренами (типа С-40, С-28);
- управление выносным акустическим устройством и передачу через него сигналов оповещения и речевых сообщений;
- переключение (включение) усилителей радиотрансляционных узлов на передачу речевых сообщений и передачу через них речевых сообщений;
- возможность управления КТСО-Р с нескольких пунктов оповещения (в том числе по радиоканалу) одного звена управления с возможностью установки системы приоритетов, а также от аппаратуры П-166;
- формирование, передачу и прием подтверждений о принятых сигналах;
- передачу сигналов и информации оповещения в избирательном, групповом, циркулярном и программном режимах;
- документирование процесса оповещения и действий оперативного дежурного на магнитном диске, печатающем устройстве;
- защиту паролем от несанкционированного запуска оконечных устройств.

Зоны действия локальных систем оповещения в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 1 марта 1993 г. №178 "О создании локальных систем оповещения в районах размещения потенциально опасных объектов" составляют:

- в районах размещения ядерно- и радиационно-опасных объектов – в радиусе 5 км вокруг объектов (включая поселок (пристанционный город) объекта);
- в районах размещения химически опасных объектов – в радиусе до 2,5 км вокруг объектов;
- в районах размещения гидротехнических объектов (в нижнем бьефе, в зонах затопления) – на расстоянии до 6 км от объектов.

### Основные элементы комплекса:



**Радиостанция центральная (ЦС).** Радиостанция центральная состоит из двух независимых приемопередатчиков с усилителями мощности, блока управления и резервирования, источника бесперебойного питания и устройства ввода. Два приемопередатчика с усилителями мощности работают в режиме горячего резервирования. Контроль состояния приемопередатчиков, усилителей мощности, антенно-мачтового устройства, источника бесперебойного питания и управление режимами их работы осуществляется блоком управления и резервирования.



**2. Пульт управления и контроля** предназначен для дистанционного управления комплексом средств оповещения населения по радиоканалам местных и локальных систем оповещения населения.



**4. Устройство запуска электросирен по радиоканалу** предназначено для оповещения населения включением электросирены. Устанавливается на предприятиях, в населенных пунктах, местах массового скопления людей. Устройство запуска электросирен по радиоканалу с квитированием обеспечивает возможность передачи сигналов автоматического подтверждения о выполнении команд оповещения, а также информации о своем техническом состоянии на пульты управления и контроля. В случае пропадания сетевого напряжения происходит автоматический переход на питание от встроенной аккумуляторной батареи.



**7. Приемник персонального оповещения стационарный** предназначен для доведения формализованных сигналов оповещения, текстовых и речевых сообщений до оперативных дежурных органов управления, руководителей муниципальных образований, организаций, предприятий и потенциально опасных объектов. Приемник оснащен ЖК-индикатором и клавиатурой. Возможен просмотр одного из 32-х ранее принятых сообщений, сохраненных в памяти приемника. При пропадании сетевого напряжения приемник автоматически переходит на работу от встроенной аккумуляторной батареи.



**8. Приемник персонального оповещения носимый (радиопейджер)** предназначен для доведения буквенно-цифровых сообщений до должностных лиц. Приемник оснащен ЖК-индикатором и клавиатурой. Возможен просмотр одного из 32-х ранее принятых сообщений, сохраненных в памяти приемника. Питание приемника осуществляется от двух гальванических элементов.



**9. Радиовещательный приемник** предназначен для приема радиовещательных программ диапазонов ФМ-ЧМ с возможностью перехода на прием речевой информации оповещения. Информация оповещения транслируется с установленной постоянно максимальной громкостью, независимо от уровня звучания радиовещательного канала, а также при выключенном вещательном канале.

При задействовании локальных систем оповещения диспетчером ЕДДС подается сигнал «Внимание всем!» путем дистанционного включения электросирен, передается команда дистанционного включения электропитания усилителей проводного вещания и переключения их на передачу информации оповещения, с микрофона или ПЭВМ осуществляется многократная (2-3 раза) передача информации оповещения.

При создании локальных систем оповещения необходимо предусматривать их организационное, техническое и программное сопряжение с территориальной автоматизированной системой централизованного оповещения субъекта Российской Федерации, системами аварийной сигнализации и контроля потенциально опасного объекта.

Для эффективного и рационального использования этих ресурсов необходимы новые современные подходы, позволяющие осуществлять производственно-экологический контроль. В рамках создания общероссийской комплексной системы информирования и оповещения населения требуется создание на потенциально опасных объектах автоматизированной подсистемы радиационного и химического контроля, включающего в себя наблюдение и сбор информации, передачу данных и принятие решений, что обеспечит непрерывный контроль с сигнализацией превышения ПДК вредных химических и радиоактивных веществ в санитарно-защитной зоне и в зоне наблюдения.

Для обеспечения сбора данных о параметрах химической и радиационной обстановки, оперативного обнаружения аварийных ситуаций, отображения прогнозируемой и фактической химической и радиационной обстановки на электронных картах создается система передачи данных. Используемые при этом информационные каналы системы – кабельные и радиоканалы связи (преобразование сигнала со стандартного интерфейса RS485 и Ethernet – дальность передачи данных до 500 метров, модуль передачи данных по радиоканалу SkyLINK, УКВ-передатчик с передающей антенной – до 100 км).

Организация ЛСО (см. рисунок).

Дежурный диспетчер (начальник смены) потенциально опасного объекта отвечает за своевременное задействие локальной системы оповещения, а также информирование о факте аварии и о складывающейся обстановке оперативных дежурных служб органов управления по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям субъекта Российской Федерации, города или городского района.

Оперативные дежурные службы органов управления по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям субъекта Российской Федерации, города или городского района отвечают за своевременное задействование территориальных и местных систем оповещения населения, проживающего в зонах возможного радиоактивного и химического заражения (загрязнения) и катастрофического затопления, в том числе в части дублирования оповещения населения, проживающего в зоне действия локальной системы оповещения.

Управление локальной системой оповещения на потенциально опасном объекте осуществляется с пультов, расположенных на основном и запасном пунктах управления потенциально опасного объекта.

Рабочее место дежурного диспетчера (начальника смены) потенциально опасного объекта оборудуется техническими средствами, обеспечивающими:

- управление локальной системой оповещения;
- прямую телефонную и при необходимости радиосвязь с оперативными дежурными органов управления по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям субъекта Российской Федерации, города или городского района;
- прямую проводную и радиосвязь дежурного диспетчера с оперативным персоналом систем аварийной сигнализации и контроля, а также с дежурными сменами аварийно-спасательных служб потенциально опасного объекта;
- прием сообщений, передаваемых по территориальной системе централизованного оповещения;
- контроль прохождения сигналов и информации, передаваемых по локальной системе оповещения;
- телефонную связь общего пользования.

Технические средства локальных систем оповещения должны находиться в режиме постоянной готовности к передаче сигналов и информации оповещения и обеспечивать автоматизированное включение оконечных средств оповещения по сигналам территориальной автоматизированной системы централизованного оповещения и от дежурного диспетчера (начальника смены) потенциально опасного объекта.

При создании локальных систем оповещения необходимо предусматривать их организационное, техническое и программное сопряжение с территориальной автоматизированной системой централизованного оповещения субъекта Российской Федерации, системами аварийной сигнализации и контроля потенциально опасного объекта.

Выводы.

1. Оборудование, установленное на центральном пульте ДДС потенциально опасного объекта, позволяющее в автоматическом режиме в масштабе реального времени без постоянного участия диспетчера контролировать ситуацию, выдавать соответствующие команды при угрозе возникновения аварийных ситуаций с выдачей световых и звуковых тревожных сигналов для привлечения внимания диспетчера и принятия решения.

2. При построении ЛСО на базе КТСО-Р обеспечивается 100%-ное перекрытие административных границ города (населенного пункта), предусмотрена возможность использования средств УКВ-радиосвязи, отсутствует необходимость строительства новых проводных линий связи.

3. Экономическая целесообразность организации радиоканалов в местах с повышенной сложностью и стоимостью работ по подземной и подводной прокладке кабелей, что позволяет оперативно наращивать низовую часть общей системы оповещения без прокладки проводных линий связи.

4. Нет необходимости охраны канала связи, так как отсутствует возможность его повреждения.



5. Имеется возможность дублирования проводных линий связи радиоканалами с целью повышения надежности оповещения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон от 12 февраля 1998 г. № 28-ФЗ «О гражданской обороне».
2. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 1 марта 1993 г. № 177 «Об утверждении Положения о порядке использования действующих радиовещательных и телевизионных станций для оповещения и информирования населения Российской Федерации в чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени».
4. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2003 г. № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций».
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 1 марта 1993 г. № 178 «О создании локальных систем оповещения в районах размещения потенциально опасных объектов».
6. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 октября 2003 г. № 1544-р.
7. *Габричидзе Т.Г., Фомин П.М.* Совершенствование систем управления и действий дежурно-диспетчерских, аварийно-диспетчерских служб различного подчинения по предупреждению и ликвидации ЧС: Тез. докл. Первой Всероссийской науч.-практ. конф. ВМИИ ГОЧС. – Москва, 1999.
8. *Габричидзе Т.Г.* Опыт работы единой дежурно-диспетчерской службы в городах: Сборник докл. – М.: Ассоциация «АМЕДС», 1999. – С. 95.
9. *Петров В.Г., Десятников А.Т., Колодкин В.М., Габричидзе Т.Г., Башаров Р.А.* Автоматизированная система для оповещения и эвакуации населения при чрезвычайных ситуациях на объектах хранения и уничтожения химического оружия и других объектах повышенной опасности // Третьи публичные слушания по проблеме уничтожения химического оружия. – Курган, 1997. – С. 163-165.
10. Прикладной системный анализ: безопасность и риск / В.К. Буторин и др. – Кемерово; М.: Российские университеты и др., 2005. – 103 с.

*Статья поступила в редакцию 3 октября 2008 г.*

UDC 681.3

## LOCAL NOTIFICATION SYSTEMS IN THE AREAS OF POTENTIALLY DANGEROUS OBJECTS ALLOCATIONS IN UDMURTIA REPUBLIC

*T.G. Gabrichidze<sup>1</sup>, I.M. Yannikov<sup>2</sup>, P.M. Fomin<sup>2</sup>, V.G. Zozulya<sup>2</sup>, P.A. Morozov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Central directorate of Emergency Control Ministry, Samara Region  
443010, Samara, Krasnoarmeyskaya st., 12

<sup>2</sup> Central directorate of Emergency Control Ministry, Udmurtia Region  
426008, Republic of Udmurtia, Izhevsk, Kommunarov st, 325

*The paper describes a set of technical tools and approaches and suggests an organizational scheme of notification in the areas of potentially dangerous objects allocations*

**Key words:** *local notification system, potentially dangerous objects*

---

*Tamazi G. Gabrichidze, Candidate of Technical Science, major-general, Head of Central Directorate of Samara Region.*

*Igor M. Yannikov, Candidate of Technical Science, first deputy of head of Central Directorate of Samara Region.*

*Petr M. Fomin, Candidate of Technical Science, Head of Central Directorate of Udmurtia Region.*

## **МЕТОДОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

***Н.Г. Губанов***<sup>1</sup>

Самарский государственный технический университет  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассмотрены возможности комплексного применения достоверных и правдоподобных моделей для повышения эффективности информационных систем анализа состояния сложных технических объектов.*

***Ключевые слова:** сложные технические системы, принятие решений, базы знаний*

### **Введение**

Оценка состояния сложных технических объектов является методической основой для приложений в областях технической диагностики, контроля, испытаний, управления резервами, технического обслуживания. Состояние объекта определяется множеством сложно взаимосвязанных и взаимозависимых разнородных параметров. Современные тенденции к усложнению технических систем обуславливают увеличение параметров до десятков и сотен тысяч [1], а дефицит информации является одной из принципиальных проблем в исследовании системных закономерностей. Кроме того, данному классу систем присущи следующие характеристики: многокомпонентность; сложные взаимосвязи между компонентами; уникальность и единичность изготовления; невозможность поисковых воздействий на систему, на которых основан целый ряд методов синтеза управляющих воздействий и адаптации.

Указанные свойства обуславливают ряд объективных проблем в вопросах эффективного принятия решений на этапах целевого использования системы. Специалисты считают, что основной причиной неточности анализа состояния в системах данного класса является неточность исходных данных. Неполнота и противоречивость данных о системе обусловлена дороговизной, неэффективностью, а зачастую и невозможностью получения полной информации об объекте и среде его функционирования, разнородностью информации об объекте в виде точечных замеров и значений параметров; допустимых интервалов их изменения; статистических законов распределения для отдельных величин; нечетких критериев и ограничений, полученных от специалистов-экспертов.

### **Особенности логического вывода в информационных системах анализа сложных объектов**

В качестве некоторого обобщения основных источников, формирующих информационное пространство, можно назвать данные на выходе ИИС, известные закономерности, заложенные в технической документации, где данными являются объективные законы реального мира, накопленные в фактографических и документальных системах, и выявленные закономерности, в частности имитационные модели. Каж-

---

<sup>1</sup> Губанов Николай Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент.

дый из источников в настоящее время представляет собой информационную основу для соответствующих направлений системного анализа, моделирования и управления сложными системами. Однако каждый вид ресурса в отдельности обладает рядом принципиальных ограничений, существенно сужающих область его применения; в то же время имеются существенные предпосылки для системной интеграции перечисленных ресурсов, заключающиеся в применении комбинации правдоподобного и достоверного подходов к логическому выводу, позволяющей получать новые нелинейные эффекты при синтезе информационно-аналитических систем.

Формирование схем анализа оценки и контроля состояния сложных объектов можно рассматривать как двухэтапную задачу: на первом этапе осуществляется сбор, формализация и соответствующая обработка исходных данных и условий задачи, на втором этапе – непосредственно синтез схемы анализа.

Практика показала эффективность комбинации различных подходов к логическому выводу в интеллектуальных системах, в частности аппроксимационные методы моделирования систем, по сути, используют дедуктивно-индуктивный подход. В основе построения баз знаний лежит синтез индуктивных и абдуктивных методов логического вывода. Абдукция, как процесс формирования объясняющей гипотезы, служит методологической основой построения алгоритмов правдоподобного вывода. Функционально абдуктивный вывод заключается в принятии решения по выбору оптимального объяснения наблюдения на основе заданной теории. Для данного исследования абдукция интересна как средство решения следующих классов задач: задача распознавания целей и стратегий деятельности субъекта, задача формирования моделей по наблюдениям за объектом, задача накопления и усвоения знаний, описывающих новые явления; тем самым моделируется использование накопленного опыта для обработки новых знаний.

Индуктивный вывод, позволяющий строить в сложных системах обобщенные модели знаний, основан на построении некоторого общего правила на основании анализа конечного множества наблюдаемых фактов. Качество обобщенных моделей зависит от полноты набора фактов, которым он пользуется при формировании гипотез. Процедурно процесс индуктивного вывода сложно формализуем и заключается в машинном построении новых гипотез на основе наблюдаемых фактов. Индуктивный вывод позволяет решать следующие классы задач: задача индуктивного формирования понятий с целью выделения наиболее общих или характерных фрагментов знания и избавления от случайной несистемной информации; задача машинного обучения, где на основе анализа обучающей выборки дается прогноз о новых объектах; задача распознавания, заключающаяся в формировании решающего правила, относящего объект к определенному классу.

В настоящее время существуют конструктивные методы автоматического формирования алгоритмов мониторинга и управления структурной динамикой СТО [2], которые базируются на оперативном формировании операторных цепочек последовательного отображения измерительных и вычислительных параметров СТО для достижения цели анализа или управления. Данные технологии, в частности, базируются на обобщенных вычислительных моделях, являющихся развитием недоопределенных моделей.

На принципах индуктивного логического вывода, статистической обработки информации, а также информационных технологиях DM, OLAP, KDD основан целый класс аналитических систем, которые, по мнению аналитиков рынка программ-

ных продуктов, составляют существенную часть стоимости СТС в целом [3].

В настоящее время существуют конструктивные методы автоматического формирования алгоритмов мониторинга и управления структурной динамикой СТО, которые базируются на оперативном формировании операторных цепочек последовательного отображения измерительных и вычислительных параметров СТО для достижения цели анализа или управления. Реализовать автоматический синтез программ мониторинга позволили методы автоматического доказательства теорем, в частности методология проверки на модели (model checing), метод синтеза атрибутивных грамматик.

### **Категорное представление информационных систем анализа сложных объектов**

При построении систем анализа, как правило, встают вопросы выбора методов формализации информационных ресурсов, формирования правил построения структур, а также анализ и построение на данных структурах алгоритмов генерации и отбора альтернатив решений. Конструктивным подходом к интеграции различных видов моделей объекта является применение методов категорно-функторного анализа. Данный подход позволяет сохранить целостность представления объекта за счёт инвариантности способа полимодельного описания объекта и свести исследования задач одного вида к задачам другого вида, при этом согласование разнородных моделей осуществляется на основе анализа принадлежности к заданной категории. Предложены алгоритмы автоматического формирования категорных структур, основанные, в частности, на основе анализа мер близости. В рамках данного подхода разработаны правила формирования полимодельных структур на основе операций наследования и композиции.

Основу систем анализа состояния СТО составляют полимодельные комплексы. Проблема создания алгоритмов формирования и представления полимодельных структур является одной из ключевых в современном системном моделировании. Структура и функционирование аналитических систем –  $S$  зависит от следующих информационных сущностей: объекта анализа (СТО) –  $Q$ ; цели функционирования аналитической системы –  $G$ , определяемой конкретной задачей принятия решения; полимодельного комплекса, задающего структуру системы, –  $M$ ; среды, определяющей параметры системы, –  $C$ , а также от отношений между данными структурами  $R = (r_{Q,M}, r_{Q,C}, r_{Q,G}, r_{M,C}, r_{Q,M}, r_{Q,C})$ . Соответственно, информация по всем имеющимся в распоряжении субъекта информационным ресурсам  $Z$  определится как  $Z = \mathbf{U}_Q(M, R)$ , тогда формирование новой структуры информационно-аналитической системы можно представить в следующем виде:  $F = (Z, M_G, J)$ , где  $M_G$  – целевая структура системы,  $J = (M_b, p)$  – алгебра формирования структур, где  $M_b$  – множество базовых классов элементов структур  $M$ , а  $p = (N, K)$  – операции формирования структуры системы:  $N$  – операция наследования,  $K$  – операция композиции. Комбинация данных операций формирования структуры системы, в отличие от конкатенации, позволяет сохранять целостность представления системы на различных уровнях иерархии. Алгоритмы формирования базовых классов объектов  $A_b = (Z, G, M_b)$  являются, по сути, проблемно-ориентированной декомпозицией  $Z$ , стратегия по-

строения данных алгоритмов лежит в русле принципа семиотической интроспекции, заключающегося в идентификации различий и обобщении подобий множества объектов.

Модель объекта  $M^i$  описывает его некоторые свойства в соответствующих категориях. Соответственно можно рассматривать  $M^i$  как объект категории  $ObM^i$ , а взаимосвязь между объектами морфизмы  $MorM^i$ . Применительно к задаче таксономии категории формируются на основании [6] признакового пространства  $I^n = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ , множества классов  $Kl(M)$  и самих объектов таксономии  $M$ . Объекты, принадлежащие одному классу, являются изоморфными, другими словами, неразличимыми в признаковом пространстве  $I^n$ , а классы объектов  $Kl(M)$  в данном признаковом пространстве являются гомоморфным, образуя при соответствующих свойствах признакового пространства категорию  $Cat(M)$ .

Полимодельное описание объекта определяется совокупностью моделей различных категорий  $M^{poly} = \bigcup_{i=1}^k M^i$ . Формирование правил отображения модели одного вида в другой требует построения функтора  $F(M^v, M^u)$ , вид которого определяет вид отношений между моделями видов  $\langle v, u \rangle$ . Соответственно, возможно формирование знаний категории  $Cat(M_u)$  при недостаточных условиях формирования категории. При помощи процедуры таксономии  $A$  возможна процедура  $A' : \exists F(M^v) \rightarrow Cat(M^u)$ , которая позволяет строить и обрабатывать гипотезы относительно знаний одной категории, применяя их к знаниям другой категории, что расширяет практические возможности добывания знаний.

Алгоритмы реструктуризации данных полимодельных комплексов заключаются в коррекции отношений между объектами категории. Формирование новых категорий основано на методах наследования новых структур из существующих.

Пусть  $S_b^{pm}$  – базис категории;  $(S_0^{pm}, y)$  – исходный объект;  $y \in Hom(S_0^{pm}, S_b^{pm})$  – отношение между данными объектами;  $(S_i^{pm}, I)$  – производный объект, где  $I \in Hom(S_i^{pm}, S_b^{pm})$ .

Условие сопоставимости заключается в выполнении следующих выражений:

$$\exists w \in Hom(S_0^{pm}, S_i^{pm}) ; \exists (m \in Hom(S_i^{pm}, S_j^{pm})) \rightarrow ((S_i^{pm}, j) N(S_j^{pm}, u)),$$

тогда

$$\exists (m \in Hom(S_i^{pm}, S_j^{pm})) \rightarrow ((S_i^{pm}, j) N(S_j^{pm}, u)),$$

где  $N$  – операция наследования объекта  $(S_i^{pm}, j)$  в  $(S_j^{pm}, u)$ .

## Выводы

Предложена система, общее функционирование которой заключается в совмещении баз знаний, содержащих исходные данные и машину вывода для формирования схем анализа, а также подсистему обращения, отбора или комбинации конкурирующих схем анализа, построения новых схем на следующем уровне иерархии. Такой подход позволил реализовать в рамках одной системы комплексного подхода, включающего алгоритмы абдукционного вывода для получения гипотез, объясняющих наблюдения за параметрами системы и состоянием среды, индукционные мето-

ды для формирования и оценки правил вывода, и дедукции для прогнозирования перспективного состояния системы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с: ил., ISBN – 5-02-033789-7.
2. *Батищев В.И., Губанов Н.Г.* Категорное представление сложных технических объектов в индуктивных системах логического вывода / Под ред. акад. Е.А. Федосова, акад. Н.А. Кузнецова, проф. В.А. Виттиха // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды IX Международной конференции. – Самара: Самарский научный центр.
3. *Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В.* Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / Под ред. В.Н. Вагина, Д.А. Поспелова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 704 с. – ISBN 5-9221-0474-8.
4. *Батищев В.И., Мелентьев В.С.* Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики. М.: Машиностроение-1, 2007. – 393 с.: ил. – ISBN 978-5-94275-338-2.
5. *Загоруйко Н.Г.* Прикладные методы анализа данных и знаний. – М.: ИМ СО РАН, 1999. – 270 с.

*Статья поступила в редакцию 6 октября 2008 г.*

UDC 681.3

### **THE METHODOLOGY OF THE FORMATION OF THE INFORMATION SYSTEMS OF THE ANALYSIS OF THE STATE OF THE COMPLEX TECHNICAL OBJECTS**

*N.G. Gubanov*<sup>1</sup>

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

*The possibilities of the complex application of reliable and plausible models for increasing the effectiveness of the information systems of the analysis of the state of complex technical objects are examined.*

**Key words:** *complex technical systems, decision making, knowledge bases*

---

<sup>1</sup> *Nikolay G. Gubanov, Candidate of Technical Sciences, Associate professor.*

## **ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ ПОМЕХ НА ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТКАЗОВ ИЛИ ПРЕЖДЕВРЕМЕННЫХ СРАБАТЫВАНИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ БЛИЖНЕГО ДЕЙСТВИЯ**

**Б.М. Климашов<sup>1</sup>**

Самарский государственный технический университет  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Работа посвящена проблеме принятия правильного решения о выдаче команды на приведение в действие исполнительного механизма летательного аппарата бортовым радиолокационным устройством ближнего действия в обстановке воздействия активных помех. Появление на входе исполнительного механизма случайных кратковременных выбросов, образованных влиянием действия радиолокационных помех, вызывает в одних случаях превышение порогового сигнала, а в других – его снижение, в результате чего исполнительный механизм может принять ошибочное решение.*

*По приведенным в работе выражениям может быть оценена степень влияния действия помех на вероятностные характеристики, такие как возможность преждевременного срабатывания исполнительного механизма – «ложной тревоги» и возможность «пропуска цели».*

**Ключевые слова:** радиолокатор, исполнительный механизм, помехи, выбросы сигналов, вероятностные характеристики, решение

Во многих беспилотных летательных аппаратах, например ракетно-космических, используются бортовые устройства ближней радиолокации, решающие проблемы, связанные с заключительными одноразовыми и кратковременными стадиями управления в непосредственной близости от объекта (цели). Такое взаимодействие объектов обусловлено, например, управлением при встрече космических объектов с целью их стыковки; необходимостью аварийной авиационно-космической помощи; в боеприпасах – управлением исполнительным механизмом (ИМ) радиовзрывателей (РВ) для достижения необходимой траекторной эффективности действия и т.п. [1].

При взаимодействии радиолокационных устройств ближнего действия с объектом наблюдения (целью) в результате воздействия различных помех на входе исполнительных механизмов могут появляться случайные сигналы в виде отдельных кратковременных выбросов [2]. В результате этого возникают проблемы принятия правильного решения выдачи команды на приведение в действие исполнительного механизма. Если ошибочное решение будет вызвано превышением абсолютной величины порогового входного уровня сигнала, тогда, например, в следящей системе стыковки космических объектов произойдет срыв слежения [1]. В других случаях, например, при пролете ракеты вблизи цели, для срабатывания исполнительного механизма рабочий сигнал РВ должен превысить определенный уровень [3], и такая ситуация будет благоприятной. В то же время действие активных помех может мешать достичь радиовзрывателем этого порогового уровня, что приведет к несраба-

---

<sup>1</sup> Климашов Борис Михайлович, кандидат технических наук, доцент.

тиванию исполнительного механизма. И наоборот, если действие помех вызовет выброс сигнала до того, как снаряд долетит до цели, РВ выдаст исполнительную команду преждевременно и, соответственно, она будет ложной. Поэтому в теории и практике оценки эффективности действия радиолокационных устройств ближнего и кратковременного взаимодействия в условиях различных помех видное место занимает процесс вероятностного анализа характеристик величин выбросов случайных сигналов [3-5]. Этой проблеме и посвящена данная работа.

Рассмотрим сначала некоторые характеристики выбросов случайной функции  $X(t)$ , выраженные интегралом вида

$$Y(t) = \int_T \varphi(t, \tau, x(\tau)) d\tau. \quad (1)$$

Принимаем, что  $X(t)$  является действительной скалярной случайной функцией времени  $t$ . Определим суммарную длительность выбросов случайной функции  $X(t)$  данного уровня  $U_{nop}$  в течение времени  $t$ . Общая длительность таких выбросов представляет собой случайную функцию  $Y(t)$ , возможными значениями которой являются все числа в интервале  $(0, t)$ . Понятно, что общая длительность выбросов случайной функции  $X(t)$ , превосходящих уровень  $U_{nop}$ , в интервале  $(0, t)$  (рис. 1) определяется формулой

$$Y(t) = \int_0^t 1(x(\tau) - U_{nop}) d\tau. \quad (2)$$

Действительно, по определению ступенчатой единичной функции  $1(X(\tau) - U_{nop}) = 1$  при  $X(\tau) > U_{nop}$ , т. е. в интервалах  $\Delta_1, \Delta_2, \dots$ , в которых случайная функция  $X(\tau)$  превосходит  $U_{nop}$ , и  $1(X(\tau) - U_{nop}) = 0$  при  $X(\tau) < U_{nop}$ . Следовательно, интеграл (2) равен сумме длин интервалов  $\Delta_1, \Delta_2, \dots$ , в которых случайная функция  $X(t)$  превосходит выбранный порог  $U_{nop1}$  (см. рис. 1).

Очевидно, что интеграл (2) представляет собой частный случай интеграла (1) при  $\varphi(t, \tau, x) = 1(x - U_{nop})$ . Подставив это выражение в формулы математического ожидания

$$m_y(t) = \int_T dt \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t, \tau, x) f_1(x; \tau) dx \quad (3)$$

и начального момента второго порядка корреляционной функции

$$G_y(t_1, t_2) = \int_T \int_T d\tau_1 d\tau_2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t_1, \tau_1, x_1) \overline{\varphi(t_2, \tau_2, x_2)} f_2(x_1 x_2; \tau_1 \tau_2) dx, \quad (4)$$

найдем математическое ожидание и момент второго порядка случайной функции  $Y(t)$  – длительности выбросов случайной функции  $X(t)$  за уровень  $U_{nop}$ . Число выбросов случайной функции  $X(t)$ , превосходящих уровень  $U_{nop}$  в интервале времени  $(0, t)$ , представляет собой случайную функцию  $Z(t)$ , зависящую от случайной

функции  $X(t)$ . Число выбросов  $Z(t)$  случайной функции  $X(t)$  в интервале времени  $(0, t)$  определяется формулой

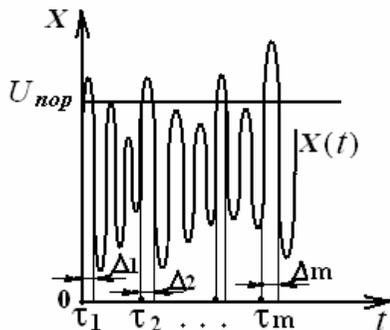
$$Z(t) = \int_0^t \delta(X(\tau) - U_{nop}) X'(\tau) l(X'(\tau)) d\tau. \quad (5)$$

Действительно, подынтегральная функция вследствие свойств дельта-функции и ступенчатой единичной функции равна нулю всюду в интервале интегрирования, кроме точек  $\tau_1, \tau_2, \dots$ , в которых случайная функция  $X(t)$ , возрастая, переходит через уровень  $U_{nop}$  (см. рис. 1). В точках  $\tau_1, \tau_2, \dots$  подынтегральная функция бесконечна, и в каждой из этих точек интеграл скачком возрастает на единицу.

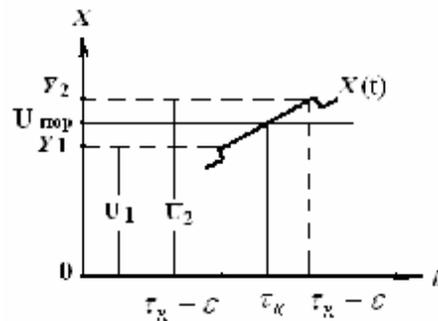
Действительно, возьмем малый интервал  $\tau_k - \varepsilon, \tau_k + \varepsilon$ , в котором случайная функция  $X(t)$  возрастает и переходит через уровень  $U_{nop}$  (рис. 2), и сделаем в интервале

$\int_{\tau_k - \varepsilon}^{\tau_k + \varepsilon} \delta(X(\tau) - U_{nop}) X'(\tau) l(X'(\tau)) d\tau$  замену переменных  $\eta = x(\tau)$ . Тогда получим

$$d\eta = x'(\tau) d\tau, \quad l(x'(\tau)) = 1 \quad \text{и} \quad \int_{\tau_k - \varepsilon}^{\tau_k + \varepsilon} \delta(X(\tau) - U_{nop}) X'(\tau) l(X'(\tau)) d\tau = \int_{y_2}^{y_1} \delta(\eta - U_{nop}) d\eta = 1.$$



Р и с. 1. Типовая форма сигнала на входе исполнительного механизма бортового радиолокационного устройства ближнего действия



Р и с. 2. Выбор интервала, в котором случайная функция сигнала, возрастая, переходит через пороговый уровень

Следовательно, интеграл (5) равен числу точек  $\tau_k$  в интервале времени  $(0, t)$ , в котором случайная функция  $X(t)$  переходит уровень  $U_{nop}$  снизу вверх. Интеграл (5) представляет собой частный случай интеграла (1), тогда  $X(t)$  – случайная векторная функция, составляющими которой являются сама случайная функция  $X(t)$  и ее производная  $X'(t)$ , а функция  $\varphi(t, \tau, x, x)$  определяется формулой

$$\varphi(t, \tau, x, x) = \delta(x - U_{nop}) x l(x).$$

Пользуясь формулой (3), находим моменты числа выбросов путем определения математического ожидания числа выбросов  $Z(t)$  случайной функции  $X(t)$  в интервале времени  $(0, t)$ :

$$U_{nop1} = m_z(t) = \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - U_{nop}) x' l(x') f_1(x, x'; \tau) dx dx',$$

где  $f_1(x, x'; \tau)$  – совместная плотность вероятности значений случайной функции  $X(t)$  и ее производной  $X'(t)$  в момент времени  $t = \tau$ .

В этой формуле учитывается, что  $x$  представляет собой вектор той же размерности, что и векторная случайная функция  $X(t)$ . В соответствии с этим интеграл по  $x$  является кратным интегралом по всем составляющим вектора  $x$ . Выполнив интегрирование по  $x$  и приняв, что подинтегральная функция в оставшемся интеграле по  $x'$  равна нулю при  $x' < 0$ , математическое ожидание числа выбросов  $Z(t)$  представим в виде

$$U_{nop1} = m_z(t) = \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} x' f_1(U_{nop}, x'; \tau) dx'. \quad (6)$$

Аналогично находится момент второго порядка числа выбросов:

$$\begin{aligned} U_{nop2} = \Gamma_z(t, t) &= \int_0^t \int_0^t d\tau_1 d\tau_2 \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x_1 - U_{nop}) x_1' l(x_1') \delta(x_2 - U_{nop}) x_2' l(x_2') \times \\ &\times f_2(x_1, x_1', x_2, x_2'; \tau_1, \tau_2) dx_1 dx_1' dx_2 dx_2', \end{aligned}$$

где  $f_2(x_1, x_1', x_2, x_2'; \tau_1, \tau_2)$  – совместная плотность вероятности значений случайной функции  $X(t)$  и ее производной  $X'(t)$  при двух значениях аргумента  $t = \tau_1$  и  $t = \tau_2$ .

Выполнив здесь интегрирование по  $x_1$  и  $x_2$  и принимая во внимание, что подинтегральная функция равна нулю при  $x_1' < 0$  и при  $x_2' < 0$ , для начального момента второго порядка числа выбросов  $Z(t)$  получим следующую формулу:

$$U_{nop2} = \Gamma_z(t, t) = \int_0^t \int_0^t d\tau_1 d\tau_2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1' x_2' f_2(U_{nop}, x_1', x_2'; \tau_1, \tau_2) dx_1' dx_2'. \quad (7)$$

Определив математическое ожидание  $U_{nop1}$  и момент второго порядка  $U_{nop2}$  числа выбросов, дисперсию числа выбросов найдем с учетом (6) и (7) по формуле

$$K_y(t_1, t_2) = \Gamma_y(t_1, t_2) - \overline{m_y(t_1) m_y(t_2)}, \quad (8)$$

а при равенстве  $t_1 = t_2 = t$  имеем

$$d_z(t) = K_z(t, t) = U_{nop2} - U_{nop1}^2. \quad (9)$$

При вычислении момента второго порядка  $U_{nop_2}$  числа выбросов  $Z(t)$  необходимо учитывать, что подынтегральная функция в (7) превращается в дельта-функцию при  $\tau_1 = \tau_2$ .

С учетом этой особенности для вычисления интеграла в (7) положим для краткости

$$\left. \begin{aligned} g_1(\tau) &= \int_0^{\infty} x' f_1(U_{nop}, x'; \tau) dx', \\ g_2(\tau_1, \tau_2) &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} x_1' x_2' f_2(U_{nop}, x_1', x_2'; \tau_1, \tau_2) dx_1' dx_2'. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Тогда выражения (6) и (7) для математического ожидания и момента второго порядка числа выбросов  $Z(t)$  примут вид

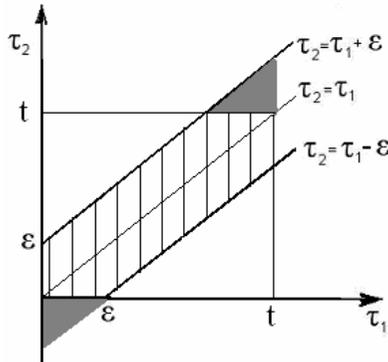
$$U_{nop} = \int_0^t g_1(\tau) d\tau, \quad U_{nop_2} = \int_0^t \int_0^t g_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2. \quad (11)$$

Выделим в области интегрирования во второй формуле (11) бесконечную полоску, ограниченную прямыми  $\tau_2 = \tau_1 - \varepsilon$  и  $\tau_2 = \tau_1 + \varepsilon$  (рис. 3), и в соответствии с этим представим интеграл как сумму интегралов по этой полоске и двум треугольным областям. Заметим только, что функция  $g_2(\tau_1, \tau_2)$  симметрична, т.е. не изменяется при перестановке аргументов:  $g_2(\tau_2, \tau_1) = g_2(\tau_1, \tau_2)$ , так как плотность вероятности случайной функции и ее производной при двух значениях аргумента не зависят от того, в каком порядке берутся значения аргумента.

Следовательно, интегралы по двум треугольным областям на рис. 3 одинаковы, и вместо суммы интегралов по двум треугольным областям можно взять удвоенный интеграл по одной из них. Тогда получим

$$U_{nop_2} = 2 \int_{\varepsilon}^t d\tau_1 \int_0^{\tau_1 - \varepsilon} g_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_2 + \int_0^t d\tau_1 \int_{\tau_1 - \varepsilon}^{\tau_1 + \varepsilon} g_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_2 + \delta, \quad (12)$$

где бесконечно малые высшего порядка  $\delta$  представляют собой взятые с обратным знаком интегралы по малым треугольным областям, зачерченным на рис. 3.



Р и с. 3. К выбору области интегрирования

Для вычисления второго интеграла в (12) заметим, что второй начальный момент числа выбросов случайной функции  $X(t)$  в бесконечно малом интервале  $(t - e, t + e)$ , который мы обозначим  $Z_e(t)$ , согласно второй формуле (11) равен

$$M[Z_e^2(t)] = \int_{t-e}^{t+e} d\tau_1 \int_{t-e}^{t+e} g_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_2.$$

Но вероятность того, что в бесконечно малом интервале времени произойдет больше чем один выброс случайной функции, является бесконечно малой величиной высшего порядка по сравнению с вероятностью одного выброса. Поэтому с точностью до бесконечно малых высших порядков  $\delta$  математическое ожидание квадрата числа выбросов в бесконечно малом интервале времени равно математическому ожиданию числа выбросов:

$$M[Z_e^2(t)] = 1 \cdot P(Z_e(t) = 1) + 0 \cdot P(Z_e(t) = 0) + \delta = M[Z(t)] + \delta.$$

Поэтому двойной интеграл в предыдущей формуле составляет величину

$$\int_{t-e}^{t+e} dt_1 \int_{t-e}^{t+e} g_2(t_1, t_2) dt_2 = M[Z(t)] + d.$$

С другой стороны, согласно первой формуле (11) имеем

$$M[Z(t)] = \int_{t-e}^{t+e} g_1(\tau) d\tau;$$

тогда, подставив это выражение в предыдущую формулу, получим

$$\int_{t-e}^{t+e} d\tau_1 \int_{t-e}^{t+e} g_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_2 = \int_{t-e}^{t+e} g_1(\tau) d\tau + \delta,$$

откуда можно заключить, что при любом  $\tau$  в интервале  $(t - e, t + e)$  имеем

$$\int_{t-e}^{t+e} g_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_2 = g_1(\tau_1) d\tau + \delta.$$

В частности, эта формула справедлива при  $t_1 = t$ :

$$\int_{t-e}^{t+e} g_2(t, t_2) dt_2 = g_1(t) dt + d.$$

Эта формула справедлива при любом  $t$ . Следовательно, она справедлива и при  $t = t_1$ .

Таким образом,

$$\int_{\tau_1-e}^{\tau_1+e} g_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_2 = g_1(\tau_1) d\tau + \delta. \quad (13)$$

Это равенство дает возможность переписать формулу (12) в виде

$$U_{пор_2} = \int_{\varepsilon}^t d\tau_1 \int_0^{\tau_1-\varepsilon} g_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_2 + \int_0^t g_1(\tau_1) d\tau_1 + \delta.$$

Переходя здесь к пределу при  $\epsilon \rightarrow 0$  и принимая во внимание первую формулу (11), получаем

$$U_{nop_2} = 2 \int_{\epsilon}^t dt_1 \int_0^{t_1} g_2(t_1, t_2) dt_2 + U_{nop_1}. \quad (14)$$

Здесь верхний предел  $\tau_1 = 0$  указывает на то, что интегрирование по  $t_2$  производится в интервале  $(0, t_1)$  без учета слагаемого, пропорционального  $d(t_1 - t_2)$ , в выражении функции  $g_2(t_1, t_2)$ .

Рассмотрим закон распределения числа выбросов при числе выбросов  $Z(t)$ . Здесь случайная функция  $X(t)$  представляет собой случайную прерывную величину, возможными значениями которой являются все целые неотрицательные числа. Поэтому для нахождения закона распределения числа выбросов достаточно вычислить вероятности всех возможных значений числа выбросов. При отсутствии точного решения этой задачи ограничимся приближенными методами ее решения [4]. Для нахождения приближенного закона распределения числа выбросов примем во внимание, что при большом  $U_{nop}$  выбросы случайной функции  $X(t)$  за уровень  $U_{nop}$  представляют собой редкое явление. Интервалы времени между двумя последовательными выбросами составят настолько большую величину, что значения случайной функции  $X(t)$ , разделенные такими интервалами, будут практически независимыми. Следовательно, при большом значении  $U_{nop}$  и моменты различных выбросов будут практически независимыми случайными величинами, что позволяет предполагать справедливым выбор пуассоновского закона распределения числа выбросов. В соответствии с этим вероятности различных значений числа выбросов определяют по формуле

$$P(Z(t) = m) = p_m^0 = \frac{U_{nop_1}^m}{m!} e^{-U_{nop_1}} \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (15)$$

где  $U_{nop_1}$  – математическое ожидание числа выбросов случайной функции  $X(t)$  за уровень  $U_{nop}$  в интервале времени  $(0, t)$ , которое определяется приведенной выше формулой (6).

Однако при малом значении  $U_{nop}$  допущение о том, что число выбросов распределено по закону Пуассона, будет приводить к грубым ошибкам. Поэтому к закону Пуассона вводятся соответствующие поправки. Для их нахождения введем полиномы относительно  $m$ :

$$Q_r(m) = \sum_{k=0}^r U_{nop_{rk}} m^k, \quad r = 0, 1, 2, \dots, \quad (16)$$

удовлетворяющие условиям

$$\sum_{m=0}^{\infty} p_m^0 Q_r(m) Q_s(m) = \delta_{rs}, \quad (17)$$

где  $p_m^0$  – вероятность того, что в интервале времени  $(0, t)$  произойдет  $m$  выбросов, вычисленная по закону Пуассона (15), а  $\delta_{rs}$  – как обычно, единица при одинаковых  $r, s$  и нуль при различиях  $r, s$ .

Система полиномов (16), удовлетворяющих условиям (17), всегда может быть найдена. Первые три полинома (16), удовлетворяющие условиям (17), определяются формулами

$$\left. \begin{aligned} Q_0(m) &= 1, \\ Q_1(m) &= \frac{m - U_{nop1}}{\sqrt{U_{nop1}}}, \\ Q_2(m) &= \frac{(m - U_{nop1})^2 - m}{U_{nop1}\sqrt{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Выразим теперь неизвестные вероятности  $p_0, p_1, p_2$  различных значений числа выбросов  $Z(t)$  в виде

$$p_m = P(Z(t) = m) = p_m^0 \sum_{r=0}^{\infty} c_r Q_r(m), \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (19)$$

где  $c_0, c_1, c_2, \dots$  – некоторые коэффициенты, которые можно определить так, чтобы моменты числа выбросов имели заданные значения. По аналогии вычисления моментов первого и второго порядков  $U_{nop1}$  и  $U_{nop2}$  рассчитываются моменты и более высоких порядков.

Вычислив моменты изложенным способом до определенного порядка, определяем соответствующее число первых коэффициентов  $c_0, c_1, c_2$  в формуле (19) так, чтобы соответствующие моменты числа выбросов при законе распределения (19) были равны этим вычисленным значениям. В частности, вычислив моменты первого и второго порядков  $U_{nop1}$  и  $U_{nop2}$ , определим коэффициенты  $c_0, c_1$  и  $c_2$ , умножая равенство (19) на полином  $Q_s(m)$  и просуммировав по всем целым неотрицательным значениям  $m$ :

$$\sum_{m=0}^{\infty} p_m Q_s(m) = \sum_{r=0}^{\infty} c_r \sum_{m=0}^{\infty} p_m^0 Q_r(m) Q_s(m).$$

Во всех слагаемых первой суммы правой части этой формулы, кроме слагаемого, соответствующего  $r = s$ , сумма по  $m$  равна нулю вследствие (17). Только для одного слагаемого, соответствующего  $r = s$ , эта сумма равна единице. Следовательно, предыдущее выражение дает

$$C_s = \sum_{m=0}^{\infty} p_m Q_s(m) \quad (s = 0, 1, 2, \dots). \quad (20)$$

Из (20) видно, что поскольку  $Q_s(m)$  – полином степени  $S$  относительно  $m$ , то коэффициент  $C_s$  выражается через моменты числа выбросов  $U_1, \dots, U_s$ . Так как сумма вероятностей всех возможных значений числа выбросов равна единице, то

при  $s = 0$  выражение (20) и первая формула (18) даст  $C_0 = \sum_{m=0}^{\infty} p_m = 1$  вследствие того, что сумма вероятностей всех возможных значений числа выбросов сигнала равна единице.

При  $s = 1$  выражение (20) и вторая формула (18) примут вид

$$U_1 = \sum_{m=0}^{\infty} p_m \frac{m - U_1}{\sqrt{U_1}} = \frac{1}{\sqrt{U_1}} \left( \sum_{m=0}^{\infty} m p_m - U_1 \sum_{m=0}^{\infty} p_m \right).$$

Первая сумма в правой части этой формулы представляет собой математическое ожидание числа выбросов, т.е. равна  $U_1$ , а вторая равна единице.

Поэтому  $c_1 = \frac{1}{\sqrt{\alpha_1}} (U U_{nop1} - U_1) = 0$ . При  $s = 2$  выражение (20) и третья формула

$$(18) \text{ дают } c_2 = \frac{1}{U_1 \sqrt{2}} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} (m - U_1)^2 p_m \sum_{m=0}^{\infty} m p_m \right].$$

В этом выражении, как видно, первая сумма представляет собой дисперсию числа выбросов, а вторая – математическое ожидание числа выбросов.

Поэтому, принимая во внимание формулу (9) для дисперсии числа выбросов, находим  $c_2 = \frac{U_2 - U_1 - U_1^2}{U_1 \sqrt{2}}$ . Подставив найденные значения первых трех коэффициентов  $c_0, c_1$  и  $c_2$  в формулу (19) и ограничиваясь первыми тремя членами ряда,

для вероятностей различных значений числа выбросов случайной функции  $X(t)$  получим следующее приближенное выражение:

$$p_m = P(Z(t) = m) \approx \frac{U_1^m}{m!} e^{-U_1} \left\{ 1 + \frac{U_2 - U_1 - U_1^2}{2U_1^2} [(m - U_1)^2 - m] \right\} \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (21)$$

Эта формула приближенно определяет закон распределения числа выбросов.

В частности, вероятность того, что в интервале времени  $(0, t)$  не будет ни одного выброса случайной функции  $X(t)$  выше уровня  $U_{nop}$ , определяется приближенным выражением

$$p_0 = P(Z(t) = 0) \approx e^{-U_{nop1}} \left( 1 + \frac{U_2 - U_1 - U_1^2}{2} \right), \quad (22)$$

которым удобно пользоваться для определения вероятности срабатывания исполнительных механизмов радиотехнических устройств кратковременного и однократного действия (в т.ч. и радиовзрывателей [1]) – процента отказов вблизи цели и процента преждевременных срабатываний вдали от цели. В приведенном примере радиовзрыватель выдаст правильную команду на срабатывание в том случае, если при пролете вблизи цели принимаемый им сигнал превысит определенный уровень, т.е. произойдет выброс полезного сигнала за определенный уровень. Если выброса не будет, то радиовзрыватель не работает.

Следовательно, выражение (22), определявшее вероятность отсутствия выбросов, позволяет находить вероятность  $P_0$  несрабатывания радиовзрывателя при пролете

снаряда вблизи цели. Вероятность правильного срабатывания радиовзрывателя будет равна  $1 - p_0$ . По выражению (22) можно также вычислять вероятность отсутствия преждевременного срабатывания радиовзрывателя во время движения его вдали от цели.

Таким образом, по формуле (22) можно находить основные тактические характеристики радиовзрывателей – процент отказов вблизи цели и процент преждевременных срабатываний вдали от цели. Вычислив вероятности различных значений числа выбросов случайной функции в заданном интервале времени, можно найти и закон распределения момента первого выброса  $T$ . Имея в виду, что момент первого выброса случайной функции  $X(t)$  представляет собой непрерывную величину, можем выразить функцию распределения этой случайной величины формулой  $F(t) = P(T < t) = 1 - P(T > t)$ . Вероятность  $P(T > t)$  представляет собой вероятность того, что в интервале времени  $(0, t)$  не будет ни одного выброса, так как неравенство  $T > t$  означает, что первый выброс произойдет позже момента  $t$ . Поэтому вероятность  $P(T > t)$  можно вычислять по формуле (22). Тогда, показывая в явной форме зависимость вероятности  $p_0$  и моментов  $U_1$  и  $U_2$  числа выбросов от длины интервала времени  $t$ , получим приближенное выражение для функции распределения момента первого выброса:

$$F(t) = 1 - p_0(t) \approx 1 - e^{-U_1(t)} \left[ 1 + \frac{U_2(t) - U_1(t) - U_1^2(t)}{2} \right].$$

Дифференцируя эту формулу по  $t$ , находим плотность вероятности момента первого выброса  $T$  случайной функции  $X(t)$  за уровень  $U_{\text{пор}}$ .

### **Вывод.**

Воздействие активных помех на радиолокационное устройство ближнего действия может привести к тому, что сигнал на входе его исполнительного механизма в одних случаях превысит заданный пороговый уровень исполнительной команды, а в других – будет ниже этого уровня. В том и в другом случае исполнительный механизм может принять с некоторой вероятностью ошибочное решение типа «ложная тревога» или «пропуск цели».

В работе показано, что исполнительный механизм может принимать правильное решение с достаточно высокой степенью вероятности путем использования им данных статистических характеристик входных выбросов случайных сигналов. Такой самокорректирующийся исполнительный механизм (вместе с радиолокационным устройством) относится к классу «интеллектуальных» [6].

Рассмотренные в работе методы оценки вероятностных характеристик выбросов случайных сигналов могут быть использованы и в других устройствах ближнего взаимодействия объектов, например, в устройствах автономной радиолокационной коррекции траектории движения беспилотных летательных аппаратов, находящихся под воздействием внешних активных радиопомех.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Гуткин С., Борисов Ю.П., Балувев А.А. и др. / Под общ. ред. Л.С. Гуткина. Радиоуправление реактивными снарядами и космическими аппаратами. – М.: Сов. радио, 1968. – 768 с.

2. *Климашов Б.М.* Защита автономных радиолокационных систем от внешних помех. – Самара: Сам-ГТУ, 2005. – 120 с.
3. *Коган И.М.* Ближняя радиолокация. – М.: Сов. радио, 1973. – 356 с.
4. *Динер И.Я.* Математические методы исследований операций. Вып.1. Основы теории вероятностей. Случайные события и случайные величины. – Л.: Военно-морская академия, 1964.
5. Введение в теорию выработки решений. – М.: Воениздат, 1972.
6. *Гудмен И.* Нечеткие множества как классы эквивалентности случайных множеств. В сб.: Нечеткие множества и теория возможностей. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 241-264.

*Статья поступила в редакцию 1 сентября 2008 г.*

UDC 623.454.25

## **INFLUENCE OF THE ACTIVE DISTURBANCES ON THE DENIAL PROBABILISTIC CHARACTERISTIC AND RADIOLOCATING DEVICE ACTUATOR'S PRETRIGGERING**

***B.M. Klimashov***<sup>1</sup>

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, Russia, 443100

*The work is dedicated to the problem of the right choice of aircraft's radiolocating device actuator activation in the terms of interference.*

*The appearance of random peaks on the radiolocating device input influenced by the interference in one case causes threshold signal excess, in another – it's decrease. Both this cases may lead to the wrong decision of the actuator.*

*With the help of stated in the work formulas one can estimate the influence of the interference on the probabilistic characteristics, such as pretriggering probability – «false alarm» and «target accession» probability.*

***Key words:*** *radio-locator, actuator, noise, радиолокатор, исполнительный механизм, помеху, signal spikes, probabilistic characteristics*

---

<sup>1</sup> *Boris M. Klimashov, Doctor of Technical Sciences, Professor.*

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

*П.К. Кузнецов<sup>1</sup>, Б.В. Мартемьянов, В.И. Семавин, Е.Ю. Чекотило*

Самарский государственный технический университет  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Предлагается метод определения вектора скорости движения носителя изобразительной системы относительно подстилающей поверхности, основанный на анализе видеоинформации, содержащейся в двух последовательных кадрах изображения подстилающей поверхности. Метод не накладывает ограничений на число степеней свободы движения носителя изобразительной системы, не использует таких сложных вычислительных процедур, как поиск экстремума многомерных функций или вычисления свертки, и поэтому является перспективным для разработки «быстрых» способов и алгоритмов определения параметров движения для реализации в системах, работающих в реальном времени.*

**Ключевые слова:** *оптический поток, векторное поле скоростей, параметры движения, изображение, метод функционализации*

### Введение

В настоящее время активно развиваются методы обработки изображений, основанные на вычислении поля векторов скорости кажущегося движения изображения (оптического потока (optical flow) по терминологии, принятой в зарубежной литературе [1-3]), создаваемого движущимся объектом. Информация об оптическом потоке используется, например, в компьютерной графике для синтеза деформируемых и движущихся изображений. Последним обстоятельством в особенности вызван значительный интернет-интерес к методу оптического потока в профессиональной среде создателей анимационных изображений [10].

Известные способы построения оптического потока [1-3] основаны на использовании уравнения, которое устанавливает связь изменения освещенности точек изображения с параметрами вектора кажущейся скорости движения изображения. В зарубежных источниках [3] это уравнение называют brightness constancy constraint equation (BCCE). Оно имеет вид

$$\frac{dE(x, y)}{dt} = \frac{\partial E(x, y)}{\partial t} - v_x \frac{\partial E(x, y)}{\partial x} - v_y \frac{\partial E(x, y)}{\partial y}, \quad (1)$$

где  $E(x, y)$  – функция освещенности изображения (ФОИ);  
( $x, y$ ) – координаты точки изображения на картинной плоскости;

<sup>1</sup> Кузнецов Павел Константинович, доктор технических наук, профессор.  
e-mail: [kurnesov@mail.ru](mailto:kurnesov@mail.ru)

Мартемьянов Борис Викторович, кандидат технических наук, доцент.

Семавин Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент.

Чекотило Елена Юрьевна, ассистент.

$u_x$  и  $u_y$  – компоненты вектора кажущейся скорости движения изображения.

Методы определения оптического потока, основанные на использовании данного соотношения, относят к классу градиентных методов.

Градиентные методы имеют существенные ограничения, связанные с необходимостью точного вычисления производных по времени и пространству от функций освещенности изображения, которые в общем случае не являются ни дифференцируемыми, ни даже непрерывными. Это приводит к появлению значительной методической погрешности в определении скорости даже при отсутствии случайных шумов в видеосигнале. В [4] показано, что градиентный метод дает оценки скорости, смещенные в сторону уменьшения модуля измеряемой скорости. Замена производных первыми разностями вводит дополнительные существенные погрешности в измерении.

Кроме того, при решении большого класса задач обработки изображений, для которых требуется знание параметров движения носителя изобразительной системы, одной лишь информации об оптическом потоке недостаточно. Примером может служить задача обеспечения требуемых измерительных свойств аэрокосмических снимков, задача обнаружения и сопровождения движущихся объектов. Дело в том, что вектор оптического потока, хотя и содержит информацию о параметрах движения наблюдаемого объекта, но в общем случае в скрытой, неявной форме, и для того, чтобы получить такую информацию, необходимо проводить дополнительные, достаточно трудоемкие вычисления.

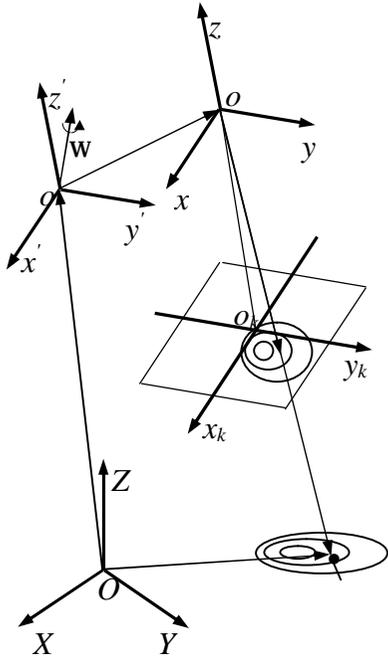
Здесь развивается прямой метод определения параметров движения объекта, наблюдаемого изобразительной системой, который не требует предварительного вычисления оптического потока. Метод, названный в [5-9] методом функционализации оптических параметров изображения (для краткости далее будем называть его методом функционализации), является обобщением градиентного метода, но свободен от его недостатков, перечисленных выше. Метод основан на использовании уравнения функциональной связи типа (1), но такого вида, в котором коэффициентами являются величины, доступные физическому измерению (физически измеримые), именно – облученности ограниченных подобластей изображения ненулевой меры, а искомыми неизвестными – параметры полного вектора скорости относительного движения подстилающей поверхности.

### **1. Метод функционализации в задаче определения параметров движения носителя оптической системы относительно подстилающей поверхности**

Метод функционализации [5-9] отличается от градиентного метода тем, что в нем вместо освещенности отдельных точек изображения используют специального вида функционалы, определенные на подобластях (окнах) изображения. Это придает методу существенно новые свойства и возможности по точности, быстродействию и универсальности. Система ФС-уравнений при определенном выборе основного функционала, используемого в методе, получается линейной относительно компонент искомого вектора скорости движения носителя изобразительной системы (ИС). Ниже излагается метод функционализации в общем виде для случая, когда основной функционал, используемый в методе, имеет мультипликативный вид. Впервые идея метода изложена в [5], а в работе Шалкова (Schalkov) [6] предлагается частный вариант метода, который вытекает из метода функционализации в случае, когда основной функционал имеет вид интегральной освещенности окна анализа.

## 1.1. Модель формирования изображения движущейся подстилающей поверхности

Будем считать, что носитель ИС совершает относительно подстилающей поверхности поступательное движение и движение вращения относительно своего центра масс и что подстилающая поверхность недеформируемая, плоская, обладает диффузной отражательной способностью и равномерно освещена сторонним источником излучения; расстояние между ИС и подстилающей поверхностью значительно больше заднего фокусного расстояния ИС, а ИС изопланатична.



Р и с. 1. Системы координат

носительно системы координат  $OXYZ$  задано вектором  $\mathbf{R}_H = \mathbf{R}_H(t) = [X_H(t), Y_H(t), Z_H(t)]^T$  и матрицей преобразования координат  $\mathbf{A} = \mathbf{A}(t) = [a_{ij}(t)]$  ( $i$  – номер строки,  $j$  – номер столбца,  $i, j = 1, 2, 3$ ).

Матрица  $\mathbf{A}$  – матрица направляющих косинусов. Ее элементы – косинусы углов между осями систем координат  $o'x'y'z'$  и  $OXYZ$ :

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} \cos(o'x', OX) & \cos(o'x', OY) & \cos(o'x', OZ) \\ \cos(o'y', OX) & \cos(o'y', OY) & \cos(o'y', OZ) \\ \cos(o'z', OX) & \cos(o'z', OY) & \cos(o'z', OZ) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Известно, что матрица  $\mathbf{A}$  ортогональна и обладает свойством  $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^T$ .

Каждой точке плоскости  $P$  соответствует ее изображение в плоскости  $P_k$  (например, на рис. 1 точке  $M$  соответствует ее изображение в точке  $m$ ). Положение точки  $M \in P$  в системе координат  $OXYZ$  задано на рис. 1 вектором  $\mathbf{R} = [X, Y, 0]^T$ , а в подвижной

На рис. 1 приведены системы координат, в которых рассматривается модель формирования изображения:

- $OXYZ$ , неподвижна относительно плоскости  $P$  подстилающей поверхности, а её оси  $OX$  и  $OY$  принадлежат  $P$ ;

- система координат  $o'x'y'z'$ , оси которой жестко связаны с носителем ИС, а центр  $o'$  совпадает с центром масс носителя ИС;

- $oxyz$ , оси которой жестко связаны с носителем ИС, параллельны одноименным осям системы координат  $o'x'y'z'$ , центр  $o$  совпадает с передней главной точкой ИС, при этом главная ось ИС совпадает с осью  $oz$ ;

- $o_kx_ky_k$ , оси которой параллельны одноименным осям системы координат  $oxy$ , центр  $o_k$  находится в картинной плоскости ( $P_k$ ) ИС на главной оси ИС на расстоянии  $-f$  от центра  $o$  системы координат  $oxyz$  ( $f$  – заднее фокусное расстояние ИС).

Положение системы координат  $oxyz$  относительно системы координат  $o'x'y'z'$  задано вектором  $r_s = [x_s, y_s, z_s]^T$  (здесь и далее  $^T$  – знак транспонирования).

Положение системы координат  $o'x'y'z'$  относительно системы координат  $OXYZ$  задано вектором  $\mathbf{R}_H = \mathbf{R}_H(t) = [X_H(t), Y_H(t), Z_H(t)]^T$  и матрицей преобразования координат  $\mathbf{A} = \mathbf{A}(t) = [a_{ij}(t)]$  ( $i$  – номер строки,  $j$  – номер столбца,  $i, j = 1, 2, 3$ ).

системе координат  $oxyz$  – вектором  $r_P = r_P(t)[x_P(t), y_P(t), z_P(t)]^T$ . Положение точки  $m \dot{I} P_k$  в системе координат  $oxyz$  на рис. 1 задано вектором  $r = r(t) = [x(t), y(t), -f]^T$ .

Из рис. 1 следует векторное равенство:

$$\mathbf{r} = k_m \mathbf{r}_P = k_m (\mathbf{A}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_H) - \mathbf{r}_S), \quad (3)$$

где  $k_m = k_m(r) = |r|/|r_P| = -f/(A_3(R - R_H) - z_S) = -A_3^T r/(Z_H + A_3^T r_S)$ ;  $|r|$  и  $|r_M|$  – модули векторов  $r$  и  $r_M$ ;

$A_3^T = [a_{31}, a_{32}, a_{33}]$  – матрица-строка.

С учетом свойства ортогональности матрицы  $\mathbf{A}$  соотношение, задающее обратное преобразование координат точки, находящейся в картинной плоскости ИС, в координаты соответствующей ей точки на подстилающей поверхности, имеет вид

$$\mathbf{R} = \mathbf{A}^T \left( \frac{\mathbf{r}}{k_m} + \mathbf{r}_S \right) + \mathbf{R}_H. \quad (4)$$

Освещенность  $E(r, t)$  в точке, заданной вектором  $r$ , связана с яркостью  $B(\dot{\mathbf{R}})$  в точке подстилающей поверхности, заданной вектором  $\mathbf{R}$ , известным соотношением

$$E(\mathbf{r}, t) = \frac{\pi T}{N^2} \cos^4 \beta(\dot{\mathbf{R}}) B(\dot{\mathbf{R}}, t), \quad (5)$$

где  $T$  – коэффициент пропускания ИС;  $1/N$  – относительное отверстие ИС, равное отношению диаметра входного зрачка ИС к заднему фокусному расстоянию;

$\beta(\dot{\mathbf{R}})$  – угол между оптической осью ИС и направлением на точку, заданную вектором  $\mathbf{R}$ , на подстилающей поверхности. В дальнейшем будем считать  $\beta(\dot{\mathbf{R}}) \approx 0$ , а  $\cos^4 \beta(\dot{\mathbf{R}}) \approx 1$ .

## 1.2. Уравнение движения изображения (уравнение оптического потока)

Для получения уравнения движения изображения подстилающей поверхности ИС про дифференцируем соотношение (2) по времени:

$$\dot{\mathbf{r}} = [v_x, v_y, 0]^T = \left( \frac{1}{f} \mathbf{r} \dot{\mathbf{A}}_3^T + \dot{\mathbf{A}}_3^T \right) (\mathbf{r} + k_m \mathbf{r}_S) - k_m \left( \frac{1}{f} \mathbf{r} \mathbf{A}_3 + \mathbf{A} \right) \mathbf{V}_H, \quad (6)$$

где  $\dot{\mathbf{r}} = [v_x, v_y, 0]^T$  – вектор скорости движения изображения в картинной плоскости ИС;

$\mathbf{V}_H = \dot{\mathbf{R}}_H = [V_{xH}, V_{yH}, V_{zH}]^T$  – вектор скорости поступательного движения носителя ИС относительно подстилающей поверхности.

Для матрицы  $\mathbf{A}$  в силу ее ортогональности выполняется:

$$\dot{\mathbf{A}} \mathbf{A}^T = -\mathbf{A} \dot{\mathbf{A}}^T = -\mathbf{\Omega}, \quad (7)$$

$\mathbf{W}$  – кососимметричная матрица вида

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где элементы  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  матрицы  $W$  являются проекциями вектора  $w = w(t) = [w_1(t), w_2(t), w_3(t)]$  угловой скорости носителя ИС на оси системы координат  $o'x'y'z'$  (см. рис. 1), связанной с носителем ИС.

С учетом (7-8) из (6) получим уравнение движения изображения в картинной плоскости ИС в форме, удобной для дальнейшего его применения:

$$\dot{\mathbf{r}} = - \left( \frac{1}{f} \mathbf{r} \Omega_3 + \Omega \right) (\mathbf{r} + k_m \mathbf{r}_s) - k_m \left( \frac{1}{f} \mathbf{r} A_3 + A \right) \mathbf{V}_H. \quad (9)$$

Уравнение (9) позволяет определять вектор кажущейся скорости движения изображения в любой точке картинной плоскости, если известен полный вектор скорости движения носителя ИС, и тем самым вычислять оптический поток, создаваемый в картинной плоскости изображением движущейся подстилающей поверхности. При использовании уравнения движения изображения для вычисления оптического потока центр тяжести задачи смещается на вычисление параметров движения наблюдаемого объекта относительно ИС. Ниже излагается метод функционализации в приложении к задаче определения полного вектора скорости движения носителя ИС относительно подстилающей поверхности.

### 1.3. Уравнение функциональной связи (ФС-уравнение)

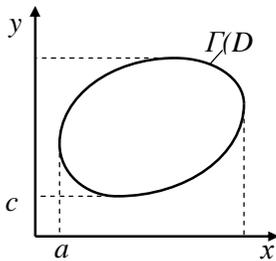
В плоскости  $P_k$  (см. рис. 1) выделим односвязную регулярную область (окно) анализа  $D$  с границей  $\Gamma(D)$  (рис. 2).

Зададим в окне анализа на множестве функций распределения освещенности  $E(r, t)$  функционал  $\Phi(t)$  вида

$$\Phi = \iint_D K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}(t), t) ds; \quad (10)$$

где  $K(\mathbf{r})$  – непрерывная, ограниченная и дифференцируемая почти всюду по всем своим аргументам функция веса;

$E(\mathbf{r}(t), t)$  – равномерно ограниченная и дифференцируемая почти всюду по всем своим аргументам функция распределения освещенности изображения яркостного объекта в картинной плоскости  $P_k$ .



Р и с. 2. Окно анализа

Вычислим полную производную по времени от функционала (10) в силу уравнения движения изображения (9):

$$\dot{\Phi}(t) = \Phi'_t(t) + \iint_D K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}(t), t)'_{\mathbf{r}} \dot{\mathbf{r}} ds, \quad (11)$$

где  $\Phi'_t = \iint_D K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}(t), t)'_t ds$ ;

С использованием формулы связи двойного и криволинейного интегралов (формулу Грина) из (11) получим

$$\dot{\Phi}(t) = \Phi'_t(t) + I_1(t) + I_2(t) + \Phi_1(t) + \Phi_2(t) + \Phi_3(t) + \Phi_4(t), \quad (12)$$

где

$$I_1(t) = - \int_{\Gamma(D)} K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}(t), t) C_\alpha [(\mathbf{r} \Omega_3 / f + \Omega)(\mathbf{r} + k_m \mathbf{r}_s)] dl;$$

$$I_2(t) = - \int_{\Gamma(D)} K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}(t), t) C_{\alpha} k_m (\mathbf{r} A_3 / f + A) \mathbf{V}_H dl;$$

$$\Phi_1(t) = \iint_D [K(\mathbf{r})]_{\mathbf{r}}' E(\mathbf{r}(t), t) [(\mathbf{r} \Omega_3 / f + \Omega)(\mathbf{r} + k_m \mathbf{r}_s)] ds;$$

$$\Phi_2(t) = \iint_D [K(\mathbf{r})]_{\mathbf{r}}' E(\mathbf{r}(t), t) k_m (\mathbf{r} A_3 / f + A) \mathbf{V}_H ds;$$

$$\Phi_3(t) = - \iint_D K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}(t), t) [-3\Omega_3(\mathbf{r} + k_m \mathbf{r}_s) / f + A_{3T} \Omega \mathbf{r}_s / (A_{3T} \mathbf{r}_s + Z_H)] ds;$$

$$\Phi_4(t) = - \iint_D K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}(t), t) [V_{ZH} / (A_{3T} \mathbf{r}_s + Z_H) - 3k_m A_3 \mathbf{V}_H / f] ds;$$

$C_{\alpha} = [\sin \alpha, -\cos \alpha, 0]$  ( $\alpha = \arctg \frac{dy^{\Gamma}(x)}{dx}$ ;  $y^{\Gamma}(x)$  – локальное уравнение границы

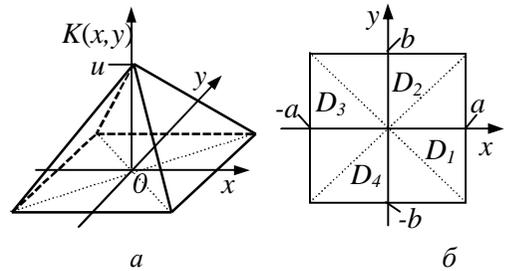
$\Gamma(D)$  окна анализа  $D$ );  $\Omega_3 = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]$ ;  $K(\mathbf{r})'_{\mathbf{r}} = [K(\mathbf{r})'_x, K(\mathbf{r})'_y, 0]$ ,  $A_{3T} = [a_{13}, a_{23}, a_{33}]$ .

В дальнейшем будем считать, что  $\Phi'_i(t) = 0$ , т.е. внешний источник облучения подстилающей поверхности не меняет своей интенсивности во времени.

Полученное уравнение (12) является ФС-уравнением, которое связывает компоненты вектора  $\mathbf{V}_H$  поступательной скорости носителя ИС и вектора  $\omega$  угловой скорости относительно подстилающей поверхности с временными и пространственными характеристиками изображения яркостного объекта в картинной плоскости ИС.

Значения интегралов  $I_1(t)$  и  $I_2(t)$  должны вычисляться на границе окна анализа  $\Gamma(D)$ . Точное измерение аппаратными средствами величин, соответствующих этим интегралам, не представляется возможным, так как они определены на множестве нулевой меры, а аппаратными средствами физически может быть измерена интегральная освещенность только областей ненулевой площади. Поэтому способы определения параметров движения, вытекающие из ФС-уравнения (12), будут корректными лишь при условии, что функция веса  $K(\mathbf{r})$  в функционале имеет нулевое значение на границе  $\Gamma(D)$  окна анализа.

Примером такой функций веса для случая окна анализа прямоугольной формы является «пирамидальная» функция (рис. 3). На рисунке координаты  $(x, y)$  отсчитываются от точки пересечения диагоналей окна анализа:



Р и с. 3. «Пирамидальная» (а) функции веса и области  $D_1 \dots D_4$  (б) в окне анализа

$$\forall (x, y): x \in [a, -a], y \in [-kx, kx] \rightarrow f(x, y) = u(1 - |x|/a);$$

$$\forall (x, y): y \in [b, -b], x \in [-y/k, y/k] \rightarrow f(x, y) = u(1 - |y|/b),$$

где  $u = a/b$ .

Из анализа ФС-уравнения (12) следует, что оно приводится к линейному относительно вхождения компонент вектора скорости движения ИС алгебраическому уравнению вида

$$b_1 V_{XH} + b_2 V_{YH} + b_3 V_{ZH} + b_4 \omega_1 + b_5 \omega_2 + b_6 \omega_3 = h, \quad (13)$$

где  $V_{XH}$ ,  $V_{YH}$ ,  $V_{ZH}$ , и  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $\omega_3$  – компоненты вектора скорости поступательного и углового движений носителя ИС;

$h = d\Phi/dt$  – полная производная по времени от функционала (10);

$b_1 - b_6$  – коэффициенты, определяемые значениями интегралов в (12). Они вычисляются из выражений

$$\begin{aligned} b_1 &= \iint_D k_m \left[ K'_x(\mathbf{r}) \left( \frac{x}{f} a_{31} + a_{11} \right) + K'_y(\mathbf{r}) \left( \frac{y}{f} a_{31} + a_{21} \right) \right] E(\mathbf{r}, t) ds + \\ &+ \iint_D \frac{3}{f} k_m a_{31} K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}, t) ds; \\ b_2 &= \iint_D k_m \left[ K'_x(\mathbf{r}) \left( \frac{x}{f} a_{32} + a_{12} \right) + K'_y(\mathbf{r}) \left( \frac{y}{f} a_{32} + a_{22} \right) \right] E(\mathbf{r}, t) ds + \\ &+ \iint_D \frac{3}{f} k_m a_{32} K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}, t) ds; \\ b_3 &= \iint_D k_m \left[ K'_x(\mathbf{r}) \left( \frac{x}{f} a_{33} + a_{13} \right) + K'_y(\mathbf{r}) \left( \frac{y}{f} a_{33} + a_{23} \right) \right] E(\mathbf{r}, t) ds - \\ &- \iint_D \left( \frac{1}{A_{3T} r_S + Z_H} - \frac{3}{f} k_m a_{33} \right) K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}, t) ds; \\ b_4 &= - \iint_D \left[ K'_x(\mathbf{r}) \left( -\frac{xy}{f} - k_m \frac{xy_S}{f} \right) + K'_y(\mathbf{r}) \left( -\frac{y^2}{f} - k_m \frac{yy_S}{f} - f + k_m z_S \right) \right] E(\mathbf{r}, t) ds - \\ &- \iint_D \left[ -\frac{3}{f} (y + k_m y_S) + \frac{a_{33} y_S - a_{23} z_S}{A_{3T} r_S + Z_H} \right] K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}, t) ds; \\ b_5 &= - \iint_D \left[ K'_x(\mathbf{r}) \left( \frac{x^2}{f} + k_m \frac{xx_S}{f} + f - k_m z_S \right) + K'_y(\mathbf{r}) \left( \frac{xy}{f} + k_m \frac{yx_S}{f} \right) \right] E(\mathbf{r}, t) ds - \\ &- \iint_D \left[ \frac{3}{f} (x + k_m x_S) - \frac{a_{33} x_S - a_{13} z_S}{A_{3T} r_S + Z_H} \right] K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}, t) ds; \\ b_6 &= - \iint_D \left[ K'_x(\mathbf{r}) (y + k_m y_S) - K'_y(\mathbf{r}) (x + k_m x_S) \right] E(\mathbf{r}, t) ds + \\ &+ \iint_D \frac{a_{23} x_S + a_{13} y_S}{A_{3T} r_S + Z_H} K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}, t) ds; \end{aligned} \quad (14)$$

$$h = \frac{d}{dt} \left( \iint_D K(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}, t) ds \right)$$

При использовании функции веса, значения которой равны нулю на границе окна анализа, все коэффициенты в ФС-уравнении (13) оказываются величинами доступными физическому измерению в реальном времени, поскольку они определены на подобластях ненулевой площади (меры). Это является существенным преимуществом метода функционализации в сравнении с градиентным методом.

Система уравнений, необходимая для отыскания компонент вектора скорости движения  $\Lambda = [V_X, V_Y, V_Z, \omega_1, \omega_2, \omega_3]^T$  носителя ИС, получается параметризацией уравнения (11). Роль параметра может выполнять время, расположение, количество и конфигурация окон анализа, вид функции веса  $K(\mathbf{r})$  и т.п.

При такой параметризации получается система уравнений

$$\mathbf{B}\Lambda = \mathbf{H}, \quad (15)$$

где  $\mathbf{B}=[b_{ij}]$  – матрица коэффициентов;  $\mathbf{H}=[h_i]^T$  – вектор-столбец;  $i=1\dots N$  ( $N \geq M$ ),  $j=M$  ( $M=1\dots 6$ ) – количество степеней подвижности носителя ИС.

С целью уменьшения погрешности получаемых оценок вектора скорости система ФС уравнений (15) переопределяется ( $N \gg M$ ), а решение ее находится методом квазиобращений:

$$\Lambda = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{H}. \quad (16)$$

В общем случае метод функциональных преобразований позволяет определять не только вектор скорости  $\Lambda$ , но и, при наличии информации о значениях элементов матрицы  $\mathbf{A}$  в начальный момент времени  $t_0$  ( $\mathbf{A}(t_0)=\mathbf{A}_0$ ), пространственную ориентацию оси оптической системы. Для этого необходимо дополнить уравнение (16) кинематическим уравнением углового движения носителя ИС:

$$\dot{\mathbf{A}}(t) = -\Omega \mathbf{A}(t), \quad \mathbf{A}(t_0)=\mathbf{A}_0. \quad (17)$$

## 2. Влияние случайного аддитивного шума на смещение оценки скорости движения изображения

Исследуем влияние случайного аддитивного шума в изображении на смещение оценок скорости движения, получаемых методом функционализации, для случая двухмерного плоско-параллельного движения носителя ИС относительно подстилающей поверхности при направлении оптической оси ИС в надир.

При этих допущениях функционал (10) будет иметь вид

$$\tilde{\Phi}(t) = \iint_D K(x, y, -f) \tilde{E}(x(t), y(t), -f, t) ds, \quad (18)$$

где  $\tilde{E}(x(t), y(t), -f, t) = E(x(t), y(t), -f, t) + h(x, y, -f, t)$  – доступная измерению функция освещенности изображения (видеосигнал);

$E(x(t), y(t), -f, t)$  – незашумленная составляющая освещенности изображения;

$h(x, y, -f, t)$  – случайная функция (шум).

Будем полагать, что шум  $h(x, y, -f, t)$  и изображение  $E(x(t), y(t), -f, t)$  некоррелированы и выполняются условия дифференцируемости реализаций случайной функции  $h(x, y, -f, t)$  по времени  $t$ .

Возьмем полную производную по времени  $t$  функционала (18):

$$\dot{\Phi} = -v_x \Phi'_x - v_y \Phi'_y + H'_t, \quad (19)$$

где  $v_x = V_{xH} f / Z_H$ ;  $v_y = V_{yH} f / Z_H$ ;

$$\Phi'_x = \iint_D K'_x(x, y, -f) E(x(t), y(t), -f) ds;$$

$$\Phi'_y = \iint_D K'_y(x, y, -f) E(x(t), y(t), -f) ds;$$

$$H'_t = \iint_D K(x, y, -f) \frac{\partial h(x, y, -f, t)}{\partial t} ds.$$

Уравнение (19) невозможно использовать для вычисления компонент вектора  $\mathbf{R} = [u_x, u_y, 0]^T$  потому, что реализация случайной функции  $H'_t$  недоступна измерению.

Алгоритм определения оценок вектора скорости основан на использовании приближенного соотношения, получающегося из (19) отбрасыванием составляющей  $H'_t$  из ее правой части:

$$\dot{\Phi}(t) = -\tilde{u}_x \tilde{\Phi}'_x - \tilde{u}_y \tilde{\Phi}'_y, \quad (20)$$

где  $\tilde{\Phi}'_x = \iint_D K'_x(x, y, -f) \tilde{E}(x(t), y(t), -f, t) ds$ ;

$$\tilde{\Phi}'_y = \iint_D K'_y(x, y, -f) \tilde{E}(x(t), y(t), -f, t) ds$$

$\tilde{u}_x = u_x + \Delta u_x$  и  $\tilde{u}_y = u_y + \Delta u_y$  – оценки компонент вектора скорости движения изображения (здесь и далее  $\Delta u_x$  и  $\Delta u_y$  – погрешности вычисления скорости движения изображения).

Для вычисления оценок компонент  $\tilde{u}_x$  и  $\tilde{u}_y$  вектора скорости и уменьшения влияния шума на погрешность вычислений воспользуемся методом наименьших квадратов с осреднением данных по конечному множеству окон анализа  $D_i$  ( $i \in \{1 \dots n\}$ ) и путем параметризации уравнения (20) сформируем систему уравнений вида

$$\begin{cases} \tilde{v}_x \sum_{i=1}^n (\tilde{\Phi}'_{xi})^2 + \tilde{v}_y \sum_{i=1}^n (\Phi'_{xi} \Phi'_{yi} + \Phi'_{xi} H'_{yi} + H'_{xi} \Phi'_{yi} + H'_{xi} H'_{yi}) = - \sum_{i=1}^n (\dot{\Phi}_i \Phi'_{xi} + \dot{\Phi}_i H'_{xi}); \\ \tilde{v}_x \sum_{i=1}^n (\Phi'_{xi} \Phi'_{yi} + \Phi'_{yi} H'_{xi} + H'_{xi} \Phi'_{yi} + H'_{xi} H'_{yi}) + \tilde{v}_y \sum_{i=1}^n (\tilde{\Phi}'_{yi})^2 = - \sum_{i=1}^n (\dot{\Phi}_i \Phi'_{yi} + \dot{\Phi}_i H'_{yi}). \end{cases} \quad (21)$$

Из (21) следует, что смещения  $(\Delta\bar{v}_x$  и  $\Delta\bar{v}_y)$  оценки математического ожидания значений компонент вектора скорости ограничены, если выполняется условие отделимости от нуля значения определителя этой системы:

$$\left| \sum_{i=1}^n [(\Phi'_{xi})^2 + (H'_{xi})^2] \cdot \sum_{i=1}^n [(\Phi'_{yi})^2 + (H'_{yi})^2] - \sum_{i=1}^n (\Phi'_{xi}\Phi'_{yi})^2 \right| \geq \delta > 0. \quad (22)$$

При отсутствии случайного шума в видеосигнале последнее условие приобретает вид

$$\left| \sum_{i=1}^n [(\Phi'_{xi})^2] \cdot \sum_{i=1}^n [(\Phi'_{yi})^2] - \sum_{i=1}^n (\Phi'_{xi}\Phi'_{yi})^2 \right| \geq \delta > 0. \quad (23)$$

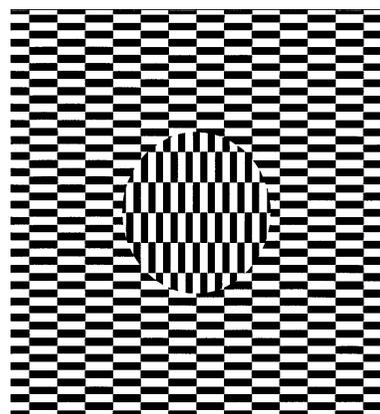
Это соотношение выделяет класс изображений, для которых метод функционализации позволяет определять скорость движения изображений. Выделение таких классов представляет интересную задачу для дальнейших исследований.

Если изображение таково, что все функции  $\Phi'_x$ ,  $\Phi'_y$ ,  $H'_x$ ,  $H'_y$  взаимно некоррелированы, то асимптотическая оценка смещения приобретает вид

$$\begin{cases} \Delta\bar{v}_x = -v_x \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n (\Phi'_{yi})^2 / \sum_{i=1}^n (H'_{yi})^2}, \\ \Delta\bar{v}_y = -v_y \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n (\Phi'_{xi})^2 / \sum_{i=1}^n (H'_{xi})^2}. \end{cases} \quad (24)$$

Из (24) следует, что оценка скорости, получаемая методом функционализации, имеет смещение отрицательного знака, пропорциональное определяемой скорости движения изображения и обратное отношению мощности полезного сигнала к мощности шума. Очевидно, что это отношение увеличивается, а погрешность смещения уменьшается с увеличением полной вариации функции освещенности изображения, которая характеризуется значениями функций  $\sum_{i=1}^n (\Phi'_{xi})^2$  и  $\sum_{i=1}^n (\Phi'_{yi})^2$  и количеством  $n$

окон анализа. Это смещение будем называть «скоростной» погрешностью метода. Наличием скоростной погрешности в оценке скорости можно объяснить некоторые оптические иллюзии, в частности, оптический эффект, открытый в 1977 г. художником-графиком Оучи (H.Ouchi) [10]. Этот вывод аналогичен выводу, полученному в [4] при анализе погрешностей простого градиентного метода. На рис. 4 представлено изображение, вызывающее иллюзию Оучи. Малые передвижения изображения по сетчатке глаза (рисунок заимствован из [4]) приводят к кажущемуся движению внутренней части рисунка относительно внешней его части. Такая ошибка в оценке скорости может объяс-



Р и с. 4. Рисунок, вызывающий иллюзию Оучи

няться различием по осям  $X$  и  $Y$  полной вариации изображения внутри центрального круга и вне его.

Из (24) следует также, что погрешность смещения математического ожидания оценки скорости движения, вызванная наличием случайного шума в видеосигнале, может быть уменьшена до нуля, если измеряемую скорость  $u$  устремить к нулю, а это возможно при использовании компенсационного метода измерений. Реализовать компенсационный метод можно с применением электромеханического или электронного «подслеживания» фотоприемной структурой движущегося изображения. При этом в качестве эталона скорости движения может быть использована прецизионная система стабилизации скорости движения фотоприемной структуры, создание которой в настоящее время не встречает технических трудностей.

### 3. Итерационный способ определения параметров движения изображения подстилающей поверхности

Одним из способов реализации компенсационного метода измерения скорости является способ итерационного совмещения изображений в окнах анализа, выделенных в двух последовательных кадрах изображения.

Для упрощения формулировки задачи совмещения изображений трансформируем ее так. Приемник изображения формирует последовательно, на достаточно малом интервале времени, два кадра изображения подстилающей поверхности. Кадровые изображения (рис. 5) заносятся в память вычислителя.

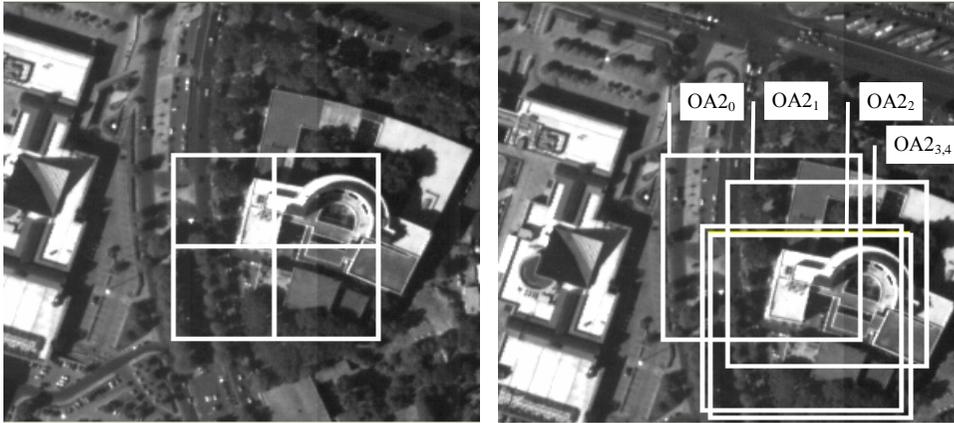
В каждом кадре изображения выделяют по области анализа. В первом кадре – произвольно, а во втором – в месте, положение которого на изображении может быть прогнозировано, например, по априорной информации о скорости движения изображения. Необходимо найти во втором кадре такое положение окна анализа, изображение в котором «максимально совпадает» с изображением в окне анализа, выделенном в первом кадре. Это есть задача о совмещении изображений двух последовательных во времени кадров изображения.

Расположим в первом кадре окно анализа ( $OA1_0$ ), положение которого относительно изображения движущейся подстилающей поверхности в момент времени  $t_0$  показано на рис. 5. Пусть в момент времени  $t_1=t_0+\Delta t$  ( $\Delta t$  – интервал измерения) окно анализа во втором кадре займет некоторое положение  $OA2_0$ . Необходимо переместить окно анализа во втором кадре так, чтобы изображения в окнах анализа в первом и втором кадрах совпадали наилучшим образом.

Предлагается следующая итерационная процедура совмещения изображений. На каждом  $i$ -том шаге по информации, полученной из окон анализа  $OA1_0$  и  $OA2_i$ , согласно методу функционализации формируется система алгебраических уравнений, необходимая для определения оценок составляющих вектора скорости движения изображения  $\tilde{u}_{x1}$  и  $\tilde{u}_{y1}$ . При этом вместо производной по времени функционала  $\Phi$  используется разность значений этих функционалов в окнах анализа  $OA1_0$  и  $OA2_i$ . По ним определяются оценки  $\tilde{s}_{x1} = \tilde{u}_{x1}\Delta t$  и  $\tilde{s}_{y1} = \tilde{u}_{y1}\Delta t$  смещения окна анализа  $OA2_i$  относительно изображения в окне  $OA1_0$ . Переопределенная система ФС-уравнений получается за счет использования дополнительных окон анализа, которые получают разбиением основного окна на подобласти. В качестве примера на рис. 5 показано разбиение окна анализа в первом кадре на четыре дополнительные подобласти. Аналогичное разбиение производится и во втором кадре. При таком разбиении переоп-

ределенная ФС-система содержит пять уравнений. Решение ее получают методом квазиобращений.

На следующем шаге окно анализа  $OA_{2i}$  смещается относительно изображения на величины  $-\tilde{s}_{y1}$  и  $-\tilde{s}_{x1}$ , при этом оно (см. рис. 5) займет положение  $OA_{2i+1}$ . По информации, поступающей из окна анализа  $OA_{10}$  и  $OA_{2i}$ , вновь формируется система алгебраических уравнений, из которых определяются уточненные оценки  $\tilde{s}_{x2}$  и  $\tilde{s}_{y2}$  смещения окон анализа  $OA_{10}$  и  $OA_{2i+1}$ .



Р и с. 5. Процедура совмещения изображений двух последовательных кадров:  
 $OA_i$  – окно анализа после  $i$ -того шага итерации;  $OA_4 \approx OA_3$ ;  
 $128 \times 128$  и  $64 \times 64$  – размеры окон.  
 Фактическое начальное смещение изображения: (26; 48)

Данная процедура повторяется до тех пор, пока смещения  $\tilde{s}_{yn}$  и  $\tilde{s}_{xn}$  на некотором шаге не станут меньше заданной величины (пока  $\tilde{s}_{yn}$  и  $\tilde{s}_{xn}$  не войдут в «трубку достижимости» заданного радиуса  $r$  и далее ее не покинут).

В символической форме эта процедура может быть записана следующим образом:

$$s(k+1) = s(k) + \Delta s(k),$$

где  $s = \{s_x, s_y\}$ ;  $\Delta s = \{\Delta s_x, \Delta s_y\}$ ;  $s(0) = s_0$ ;  $k = 1, 2, \dots$  – номер итерации.

На каждой итерации смещение  $\Delta s(k)$  определяется по информации из окон анализа  $OA_0$  и  $OA_i$  с применением соотношения, полученного методом функционализации:

$$\Delta s(k) = -(\Phi'_x(k))^T \cdot (\Phi'_x(k))^{-1} ((\Phi'_x(k))^T \Delta \Phi(k)),$$

где  $\Delta \Phi(k) = [\Phi 2_i - \Phi 1_i]$ ;  $i = 1, 2, \dots$ ;

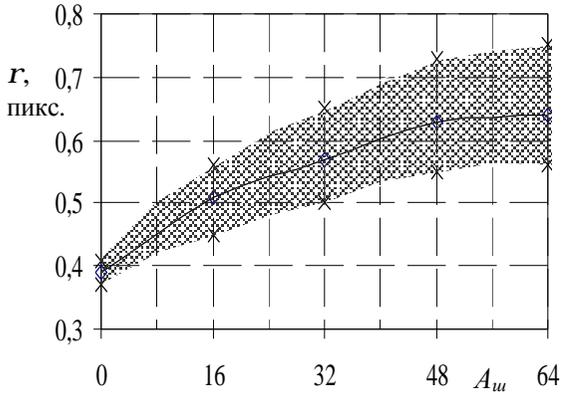
$\Phi 1_i$  и  $\Phi 2_i$  – значения функционалов в окнах анализа  $OA_0$  и  $OA_i$ ;

$$\Phi'_x(k) = \frac{1}{2} [\tilde{\Phi} 1'_x + \tilde{\Phi} 2'_x].$$

Специальным вопросом является нахождение условий сходимости предложенного итерационного процесса совмещения изображений, который здесь не рассматривается.

#### 4. Численный анализ погрешности итерационного способа

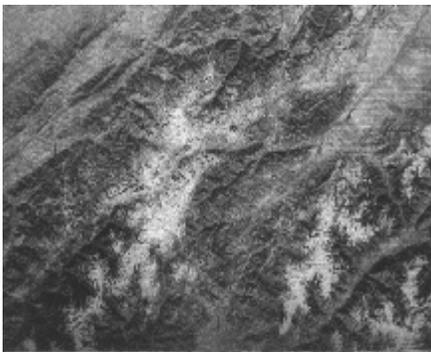
Для получения численных значений оценок погрешностей итерационного способа было применено компьютерное моделирование. Целью моделирования являлась апробация предложенного итерационного способа и исследование влияния случайного шума на



Р и с. 6. Зависимость математического ожидания  $M$  и доверительного интервала  $D_{0,96}$  (серый фон) радиуса трубки достижимости  $r$  (пикс.) от амплитуды случайного шума  $A_{ш}$

его погрешность. Система моделирования содержала три основных блока: блок моделирования видеосигнала, снимаемого с ПЗС преобразователя изображения, блок вычисления оценок смещения изображения в двух последовательных по времени кадрах изображения и блок совмещения изображений в этих кадрах. При моделировании в сигнал, снимаемый с ПЗС-матриц, аддитивно подмешивался шум с равномерной плотностью распределения. Амплитуда сигнала шума задавалась в единицах младшего разряда (емр). Последовательные кадры, снимаемые с ПЗС, оцифровывались и пересылались в ОЗУ, в области которого формировались окна анализа. Для определения параметров движения изображения использовался функционал с «пирамидальной» функцией веса.

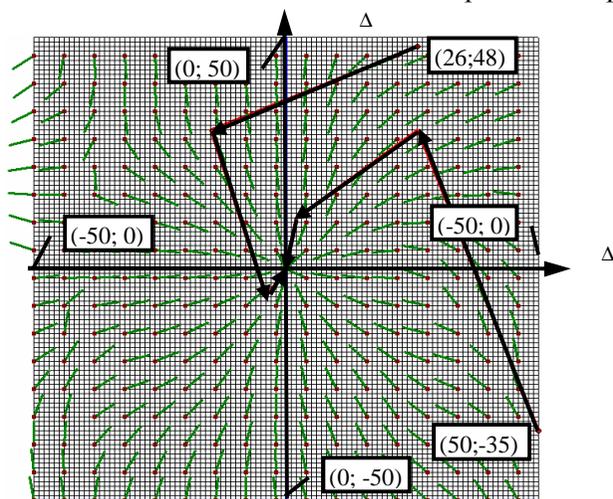
Эксперименты проводились с изображениями (снимками) типа «город», «горы», «море», «облачный покров», полученными при зондировании Земли из космоса. На рис. 6 представлены результаты компьютерных экспериментов по определению зависимости математического ожидания радиуса «трубки достижимости» ( $r$ ) и доверительного интервала от амплитуды случайного шума  $A_{ш}$  при динамическом диапазоне видеосигнала 127 емр для изображения типа «горы» (рис. 7). Начальное рассогласование положения изображений в последовательных кадрах изменялось от 2 до 50 пикселей, а количество итераций при совмещении изображений принималось достаточным для достоверного определения размеров трубки достижимости  $r$ .



Р и с. 7. Изображение типа «горы»

В качестве примера на рис. 8 приведено поле направлений получаемых оценок векторов скоростей. На рисунке в пикселях заданы координаты смещения положения окна анализа во втором кадре относительно положения окна в первом кадре. Поле построено для изображения типа «город», представленного на рис. 4. Размеры окна анализа – (128×128). На рисунке показаны траектории итерационного процесса совмещения изображений для начальных смещений (26, 48) и (50, -35). В таблице приведены значения оценок вектора смещения на отдельных шагах итерационного процесса совмещения для случая начального смещения (26, 48). Положение окон анализа в кадре 2 на рис. 4 соответствует траектории процесса совмещения

изображений с начальным смещением (24, 48) пикселей. Число итераций, требующихся для достижения совмещения изображений с точностью в 1 пиксель, даже при таких достаточно больших начальных смещениях не превышает трех.



Р и с. 8. Поле направлений вектора оценки смещения изображений, представленных на рис. 5

№ шага	Сдвиг на шаге итерации		Суммарный сдвиг		Округленное значение суммарного сдвига	
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Sigma(\Delta x)$	$\Sigma(\Delta y)$	$\approx \Sigma(\Delta x)$	$\approx \Sigma(\Delta y)$
1	-40,57	-17,59	-40,57	-17,59	-41	-18
2	11,07	-35,59	-29,50	-53,19	-30	-53
3	4,26	5,06	-25,24	-48,12	-25	-48
4	-1,00	0,00	-26,24	-48,12	-26	-48

Таким образом, алгоритмы определения вектора скорости движения изображения могут быть реализованы в реальном времени и дают оценки скорости движения с высокой точностью.

### Заключение

В статье развит метод функционализации параметров изображения для решения задачи определения параметров свободного движения носителя изобразительной системы относительно подстилающей поверхности. Метод основан на анализе видеoinформации, содержащейся в двух последовательных кадрах изображения, и отличается от известных сочетанием свойств универсальности и высокой точностью. Метод не накладывает ограничений на число степеней свободы движения носителя ИС, не использует таких сложных вычислительных процедур, как поиск экстремума многомерных функций или вычисления сверток, и поэтому является перспективным для разработки «быстрых» способов и алгоритмов определения параметров движения для реализации в системах, работающих в реальном времени.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Horn B., Schunck B. Determining Optical Flow // Artificial Intelligence 17 (1981). – P. 185-203.
2. Lucas B.D. and Kanade T. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision // IJCAI '81. – P. 674-679.
3. Black M. J. and Anandan P. A framework for the robust estimation of optical flow, ICCV'93. – May, 1993. – P. 231-236.
4. Fermuller C., Shulman D., Aloimonos Y. The Statistics of Optical Flow // Computer Vision and Image Understanding 82. – 2001. – 1-32.
5. Абакумов А.М., Кузнецов П.К., Мишин В.Ю., Семавин В.И. Метод измерения параметров движения объекта // Оптические сканирующие устройства и измерительные приборы на их основе: Тез. докл. всесоюз. совещ., 4-5 июня, 1980. – Ч.1 – Барнаул, 1980. – С. 50-51.
6. Schalkov R.J. Image Motion Analysis Using Concept of Weak Solution to Distributed Parametr Systems //Proc. 1983 IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Conf., Washington, DC. – June 1983. – P. 232-239.
7. Кузнецов П.К., Семавин В.И. Метод определения параметров движения яркостного поля // Изв. вузов. Приборостроение. – 1990. – №6. – С. 26-30.
8. Кузнецов П.К., Семавин В.И., Мишин В.Ю., Владимиров М.В. Метод функциональных преобразований в задаче определения скорости движения яркостных полей // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. – 1994. – №1. – С. 66-76.
9. А.с. №1742729 СССР: МКИ G 01 3 3/36. Устройство для определения составляющей вектора скорости движения объекта / В.Е. Агеев, В.Н. Войтенко, О.А. Анайкин, П.К. Кузнецов, В.И. Семавин. – № 4774743/10. Заявл. 26.12.1989. Опубл. 23.06.1992. Бюл. №23. – 7 с.
10. Spillmann L., Tulunay-Keeseey U. and Olson J. Apparent floating motiob ib bormal and stabilized vision, Investigative Ophthal. Visual Sci. Supple. 34. – 1993. – 1031.
11. <http://ftp.fi.muni.cz/pub/bibliography/Graphics/flow.estimation.bib.gz>.

*Статья поступила в редакцию 16 сентября 2008 г.*

UDC 681.518.3

## METHOD FOR COMPUTING VELOCITY OF MOVING OBJECTS BY IMAGE ANALYSIS

***П.К. Кузнецов<sup>1</sup>, Б.В. Мартемьянов, В.И. Семавин, Е.Ю. Чекотило***

<sup>1</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

*In this paper, we present a very accurate (of image parameters functionalisation ) and optical flow with nonuniform brightness variations. The proposed algorithm is based on a generalized dynamic image model in conjunction with a regularization framework to cope with the problem of non-uniform brightness variations. To alleviate flow constraint errors due to image aliasing and noise, we employ a least-squares method to suppress unreliable flow constraints, thus leading to robust estimation of optical flow.*

***Key words:*** optical flow, vector velocity field, motion parameters, functionalization method

---

<sup>1</sup> Pavel K. Kuznesov, Doctor of Technical Sciences, Professor.  
Boris V. Martemyanov, Candidate of Technical Sciences, Associate professor.  
Vladimir I. Semavin, Candidate of Technical Sciences, Associate professor.  
Elena. Yu. Chekotilo, Assistant.

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

*С.П. Орлов*<sup>1</sup>

Самарский государственный технический университет  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассмотрена концепция построения информационно-управляющей системы для управления проектом обеспечения населения Самарской области питьевой водой. Предложен подход к организации управления региональной системой с использованием единого информационного пространства и применением методологии байесовских интеллектуальных технологий. Приведена структура информационно-управляющей системы для управления водоснабжением населения Самарской области.*

**Ключевые слова:** управление территориальными системами, информационные технологии, водоподготовка, байесовские интеллектуальные технологии

### Введение

Правительством Самарской области реализуется областная целевая программа «Обеспечение населения Самарской области питьевой водой на 2005-2010 годы», далее Программа [1]. Управление Программой поручено министерству строительства и жилищно-коммунального хозяйства Самарской области. Самарский государственный технический университет является одним из исполнителей НИР по разделу «Научно-техническое обеспечение Программы».

Цели и задачи Программы:

- обеспечение населения области питьевой водой нормативного качества и в достаточном количестве;
- улучшение на этой основе состояния здоровья и качества жизни населения;
- восстановление и рациональное использование источников питьевого водоснабжения.

Одной из важнейших задач является разработка системного концептуального подхода к осуществлению инвестиций, проектированию и выполнению строительно-монтажных работ по объектам Программы, а также обеспечению эффективной эксплуатации объектов водоснабжения. Это позволит оптимизировать выделение финансовых средств из областного и местных бюджетов, рационально использовать ресурсы проектных и строительных организаций области, задействованных в Программе.

Решение поставленных задач возможно только при использовании современных информационных технологий при управлении сложным проектом, которым является Программа.

Проведенные исследования существующей организации водоснабжения населения Самарской области показали, что отсутствует цельная картина технического состояния водозаборных сооружений, водопроводных сетей, эффективности управле-

---

<sup>1</sup> Орлов Сергей Павлович, доктор технических наук, профессор.

ния водообеспечением со стороны многих муниципальных образований. Это связано, в первую очередь, с тем, что не налажены механизм постоянного контроля систем водоснабжения, мониторинг реализуемых на местах проектов реконструкции систем водоснабжения, отсутствуют информационные системы на различных уровнях управления системой обеспечения водой населения.

Наличие многочисленных информационных потоков, проходящих через систему управления с присущей им неопределенностью, выдвигает некоторые требования к аппарату принятия решений, способному функционировать в подобных условиях.

## **1. Критерии оценки и принципы отбора объектов водоснабжения для включения в Программу**

Программа является крупным и сложным региональным проектом, выполнение которого требует системного подхода. Особенно большое значение этот подход имеет при формировании оптимального состава объектов Программы на начальном этапе.

Обычно считается, что оптимальным является такое возможное решение, которое наиболее полно удовлетворяет желаниям, интересам или целям лица, принимающего решения (ЛПР). Стремление ЛПР достичь определенной цели нередко удается выразить в виде максимизации (или минимизации) некоторой числовой функции, заданной на множестве  $X$ . Однако в более сложных ситуациях приходится иметь дело не с одной, а сразу с несколькими такими функциями. Если явление рассматривается в динамике, поэтапно и для оценки каждого этапа приходится вводить отдельную функцию, – в этом случае также необходимо учитывать несколько функциональных показателей.

Нижеследующее рассмотрение посвящено ситуации, когда имеется несколько числовых функций  $f = (f_1, f_2, \dots, f_m)$ ,  $m \geq 2$ , определенных на множестве  $X$ .

Задачу выбора, содержащую множество возможных решений  $X$  и векторный критерий  $f$ , обычно называют *многокритериальной задачей* [2]. К классу таких задач относится и рассматриваемая задача выполнения Программы [1].

Разработка мероприятий Программы и отбор объектов проводился с использованием ряда критериев:

$K_1$  – наличие дефицита качественной питьевой воды, отвечающей санитарно-гигиеническим требованиям на основе СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода» и в соответствии с материалами «Качество водопроводной воды в населенных пунктах Самарской области», разработанными открытым акционерным обществом «Институт «Средволгогипроводхоз» в 1997-1998 гг., и данными Центра государственного санитарно-эпидемиологического надзора в Самарской области;

$K_2$  – наличие запасов качественной питьевой воды (подземные и поверхностные водозаборы) с учетом численности населения исходя из норматива 160-230 л/сутки на человека;

$K_3$  – оценка технического состояния существующих водозаборов и разводящих сетей на основе данных водного кадастра Главного управления жилищно-коммунального хозяйства Самарской области;

$K_4$  – износ систем водоснабжения, водоотведения и очистных сооружений:

$K_{41}$  – водозаборные сооружения (производительностью 50-90%);

$K_{42}$  – очистные сооружения (износ более 90%);

$K_{43}$  – водозаборные сети (эксплуатация более 25 лет или износ более 60%);

$K_5$  – наличие проектно-сметной документации на строительство (реконструкцию) водозаборов и разводящих сетей, имеющей положительные заключения государственной вневедомственной и экологической экспертиз. При финансировании объектов за счет средств федерального бюджета – заключение государственной экспертизы;

$K_6$  – возможность привлечения внебюджетных источников финансирования.

Критерии  $K_1 - K_6$  можно разделить на две группы. Первая группа – количественные критерии, которые имеют объективные численные значения. К ним относятся критерии  $K_3$  и  $K_4$ , значения которых могут быть получены при анализе данных о состоянии систем водоснабжения в Самарской области.

Вторая группа – критерии, имеющие качественный характер. Это критерии  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_5$  и  $K_6$ . Для их определения следует использовать методы экспертных оценок [2]. При анализе сложных систем с существенной неопределенностью информации об их состоянии используется современный математический аппарат нечеткой логики [3, 4]. Он позволяет на основе принимаемых гипотез о вероятностном характере показателей получать достоверные оценки искомых критериев.

Одна из основных проблем в многокритериальной задаче – формирование обобщенного (интегрального) критерия  $K_{II}$ , который должен использоваться лицами, принимающими решения (ЛПР), в процессе формирования состава объектов Программы.

Возможно несколько подходов к этой проблеме.

1. Использование линейной свертки критериев:

$$K_{II} = \sum_{m=1}^M a_m^l K_m,$$

где  $a_m^l$  – весовые коэффициенты линейной свертки для каждого из критериев  $K_m$ ,  $M=6$ .

2. Использование мультипликативной свертки критериев:

$$K_{II} = \prod_{m=1}^M a_m^m K_m,$$

где  $a_m^m$  – весовые коэффициенты для каждого из критериев  $K_m$ ,  $M=6$ .

3. Критерии оптимальности решений и оптимальные стратегии на базе теории статистических решений [5]. Здесь используются критерии Байеса, Лапласа, Вальда, Ходжа-Лемана, Гермейгера, Гурвица и максимаксный критерий [6-7].

Выбор наиболее подходящей методики основывается на анализе статистики о состояниях и свойствах системы водоснабжения в Самарской области.

## **2. Информационно-управляющая система территориальной системы водоснабжения**

В процессе системного анализа методов управления было принято решение использовать регуляризирующий байесовский подход (РБП) и байесовские интеллектуальные технологии (БИТ) в качестве концептуального подхода к созданию системы управления проектом водоснабжения [8]. Байесовские интеллектуальные техно-

логии – универсальное средство для снятия неопределенности, верификации и уточнения гипотез по мере поступления новых данных. В их основу положена концепция накопления информационных ресурсов и постепенного наращивания информационных и аналитических возможностей системы управления без принципиального изменения ее структуры и инструментальных средств. При этом информация может быть не только численной, но и лингвистической, что дает возможность учитывать мнение экспертов и различные позиции по рассматриваемым вопросам.

Целью системы управления является выработка управленческих решений

$$\Phi_t = U\varphi_{jt}$$

где  $j = 1, J$  ( $J$  – число этапов проекта), переводящих систему объекта в требуемые промежуточные (соответствующие этапам проекта) и окончательное состояния  $G_T^{(0)}$ . При использовании РБП и БИТ регуляризация решений достигается путем введения системы специальных шкал (шкал с динамическими ограничениями ШДО) для получения устойчивых решений возникающих в проекте задач оценивания, нормирования, контроля, планирования, прогнозирования или выработки управленческих решений.

Мероприятия  $F_t$ , предусмотренные в проекте, представляющие собой воздействия на объект и обеспечивающие целенаправленное преобразование ресурсов  $Z_t$  в условиях  $Y_t$  сложившихся внутренней и внешней ситуаций и инициирующих их управленческих решений  $\Phi_t$ , можно представить в виде последовательности мероприятий этапов  $f_t$ , реализуемых в рамках проекта за период  $T$ :

$$F_t : \{f_{jt} | Z_t; Y_t; \Phi_t\}$$

где  $Z_t = \{z_{it}\}, i = 1, I; Y_t = \{y_{kt}\}, k = 1, K; \Phi_t = \{\varphi_{jt}\}, j = 1, J$ .

Условия реализации проекта  $Y_t$  определяются полнотой априорной информации, наличием ограничений и граничных условий проекта  $O_t$  проектных требований  $M_t$  (в том числе и метрологических) и могут быть представлены в виде кортежа:

$$Y_t = \langle A_t; O_t; M_t \rangle,$$

где  $A_t = \{a_{it}\}, i = 1, I, O_t = \{o_{jt}\}, j = 1, J,$

$$M = \{m_{zt}\}, z = 1, L.$$

В реальной проектной ситуации из-за имеющейся неопределенности информации и рисков последовательность этапов не может быть жестко определена заранее на этапе первоначального планирования, но должна корректироваться управляющим объектом в ходе проекта в зависимости от ситуаций. Свойства объекта проектирования  $G_t^{(OE)}$  и его внешнего окружения  $G_t^{(E)}$ , а также их взаимодействия меняются во времени реализации проекта.

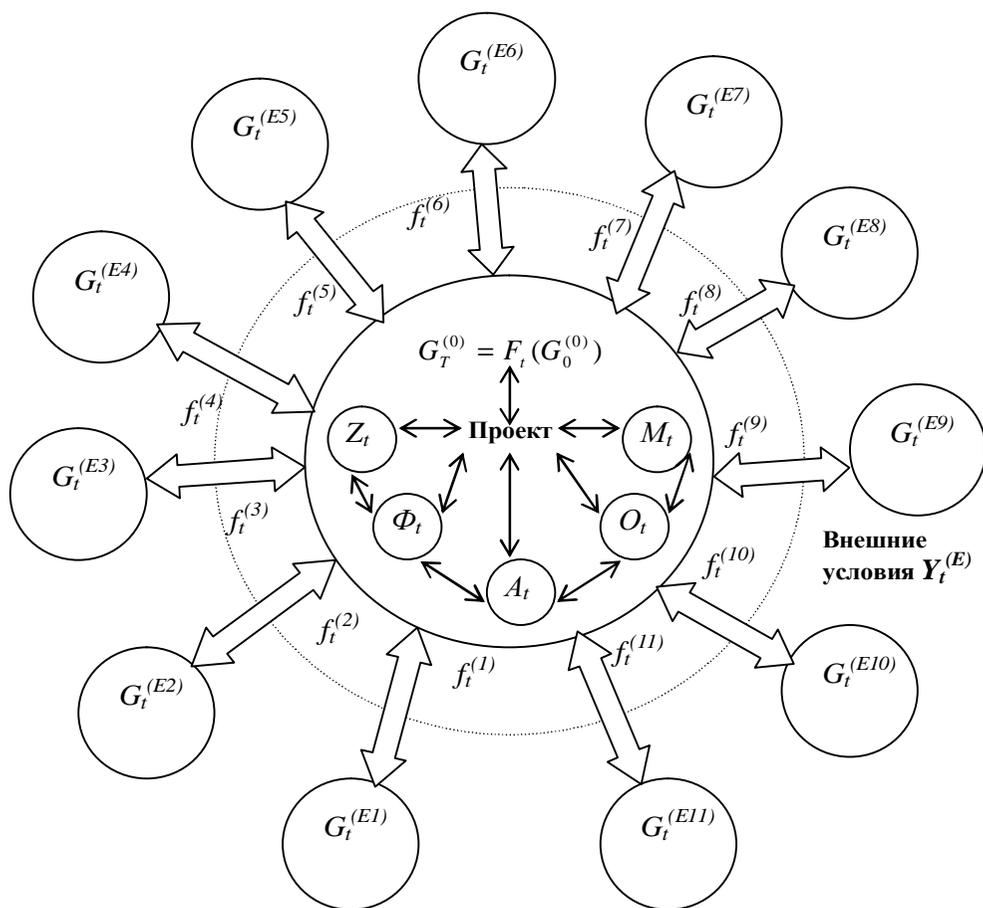
Внешнюю среду составляют субъекты и объекты  $G_{it}, i = 1 \dots I$ , оказывающие влияние на проект и объект проектирования, а также на систему управления проектом (субъект управления), что может быть записано в виде композиции (1), где символом \* обозначено действие байесовской свертки отдельных элементов  $G_j$  в целостную структуру модели внешней среды:

$$G_t^{(E)} = \underset{i=1}{*} G_{0t}^{(E_i)}. \quad (1)$$

Взаимодействие проекта и факторов внешней среды представлено на рис. 1, где

приняты условные обозначения с уточнениями их содержания применительно к Программе:

$G_t^{E1}$  – владельцы проекта – Правительство Самарской области в лице министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Самарской области,  $G_t^{E2}$  – природная среда Самарской области,  $G_t^{E3}$  – экономическое окружение: техногенная и производственная инфраструктура Самарской области, финансово-экономические институты,  $G_t^{E4}$  – социально-культурное окружение (средства массовой информации, общественность),  $G_t^{E5}$  – конкуренты проекта – частные компании, работающие по собственным планам развития,  $G_t^{E6}$  – субподрядчики (поставщики, консультанты),  $G_t^{E7}$  – инвесторы,  $G_t^{E8}$  – партнеры по консорциуму,  $G_t^{E9}$  – заказчики услуг водоснабжения (городские округа и муниципальные районы),  $G_t^{E10}$  – политическое окружение,  $G_t^{E11}$  – техническое окружение (существующие системы и технологии).



Р и с. 1. Взаимодействие проекта с внешней средой

Условия проектирования для модели объекта проектирования во взаимосвязи с внешней средой могут быть представлены в виде

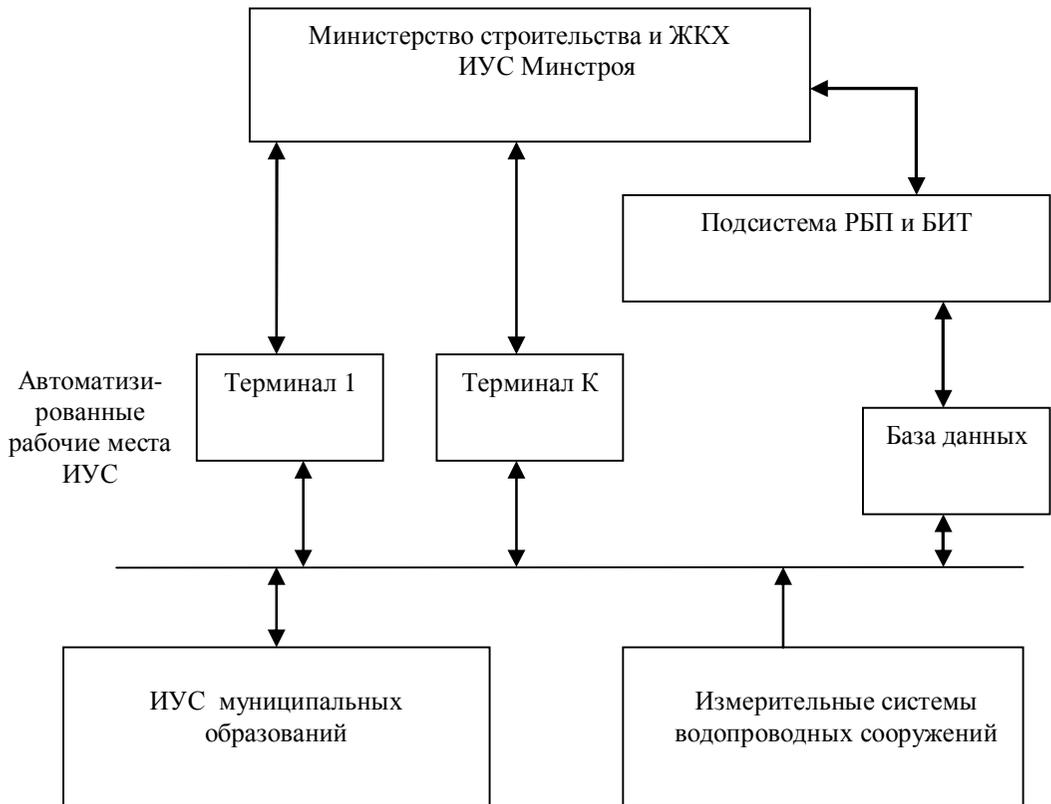
$$Y_t^{(OE)} = Y_t^{(O)} * Y_t^{(E)}.$$

На основе выражения (1) модель объекта проектирования с учетом влияния среды записывается как

$$G_t^{(OE)} = \left\{ \left\{ \begin{matrix} I_t \\ * \\ \prod_{i=1}^{I_t} Q_{it}^{(0)} \end{matrix} \right\} * \left\{ \begin{matrix} L_t \\ * \\ \prod_{l=1}^{L_t} \left[ \begin{matrix} J_t \\ * \\ \prod_{j=1}^{J_t} Q_{ojt}^{(Ei)} \end{matrix} \right] \right\} * Y_t \right\},$$

где  $Q_{it}^{(0)}$  – кортеж свойств компонента внешней среды  $G_{it}$ .

Для всех указанных на рисунке типов компонентов внешней проектной среды проектируются свои подсистемы управления, взаимосвязанные с основной системой управления гиперкубом единообразно построенных и сопряженных шкал типа шкал с динамическими ограничениями (ШДО).



Р и с. 2. Структура информационно-управляющей системы

Методологические основы построения ШДО и их применения для оценивания, измерений, контроля (аудита) процессов и ситуаций, прогнозирования и генерации управленческих решений подробно рассмотрены в [9-11].

В результате реализации БИТ для указанных выше задач на соответствующих им ШДО получаются решения в виде регуляризованных байесовских оценок (РБО)  $\{h_{kt}^{(Q)} / \{MX\}_{kt}^{(Q)}\}$ , представляющих собой совокупность альтернативных решений с определенной апостериорной вероятностью.

Альтернативы определяются в соответствии с оптимизационным уравнением БИТ в виде

$$\{h_{kt}^{(Q)} / \{MX\}_{kt}^{(Q)}\} = \left\{ \arg \text{extr } C \int_j \left( \{X_{it}\} * Y_t^{(OE)} * G_t^{(OE)} \right) \right\},$$

где  $h_k$  –  $k$ -тое регуляризованное значение свойства  $Q^{(O)}$  в момент времени  $t$ ,  $X_{it}$  – поступающая информация для генерации управленческих решений от источников информации в соответствии с выражением (1).

Последовательность мероприятий  $F_t$ , составляющих проект, может быть представлена в виде взаимоувязанных во времени РБО решений последовательности этапов  $f_t$ :

$$\{h_{kt}^{(F_t)}\} = \prod_{j=1}^{J_t} \{h_{kt}^{f_{jt}}\},$$

где  $k = 1, K_b$ ,  $K_t$  – число альтернативных управляющих решений,  $j = 1, J_t$ .

Решение о реализации последующего этапа проекта находится в виде списка упорядоченных по вероятности альтернатив как решение уравнения вида

$$\{h_{kt}^{(f_{jt})} / \{MX\}_{kt}^{(f_{jt})}\} = \left\{ \arg \text{extr } C \int_{j_t} \left( Z_t * Y_t^{(OE)} * G_t^{(OE)} * h_{t-1}^{(f_{jt})} \right) \right\}.$$

Комплекс метрологических характеристик  $\{MX_{kt}^{f_{jt}}\}$  включает показатели РБО по точности, надежности и апостериорной достоверности. Последняя величина может быть вычислена по модифицированной формуле Байеса:

$$P \left( h_{kt}^{(F_t)} \right) \Big|_{G_t^{(OE)}} = \frac{P^a \left( h_{kt-1}^{(F_t)} \Big|_{G_{t-1}^{(OE)}} \right) \bullet P \left( G_t^{(OE)} \Big| h_{kt}^{(F_t)} \right)}{\sum_{j=1}^J P^a \left( h_{jt-1}^{(F_t)} \Big|_{G_{t-1}^{(OE)}} \right) \bullet P \left( G_t^{(OE)} \Big| h_{jt}^{(F_t)} \right)}.$$

Структура информационно-управляющей системы для территориальной системы водоснабжения в Самарской области приведена на рис. 2.

## Заключение

Рассмотренные системные подходы и структура управления и информационного обеспечения для территориальной системы водоснабжения будут реализованы в ходе выполнения областной целевой программы «Обеспечение населения Самарской области питьевой водой».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Областная целевая программа «Обеспечение населения Самарской области питьевой водой» на 2005-2010 годы». Закон Самарской области от 28 декабря 2004 г. № 177-ГД «Об утверждении областной целевой программы «Обеспечение населения Самарской области питьевой водой» на 2005-2010 годы».

2. *Поудиновский В.В., Ногин В.Д.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982.
3. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1997.
4. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин и др. – М.: Наука, 1986.
5. *Шелобаев С.И.* Математические методы и модели. Экономика. Финансы. Бизнес. – М.: ЮНИТИ, 2000. – 356 с.
6. *Дубров А.М., Лагоша Б.А., Хрусталева Е.Ю., Барановская Т.П.* Моделирование рискованных ситуаций в экономике и бизнесе. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 224 с.
7. *Лабскер Л.Г., Бабешко Л.О.* Игровые методы в управлении экономикой и бизнесом. – М.: Дело, 2001. – 464 с.
8. *Прокопчина С.В., Наугольнов О.А.* Байесовские интеллектуальные измерения параметров случайных процессов // Известия ЛЭТИ. – Вып. 442. – С. 73-76.
9. *Прокопчина С.В.* Управление проектами в условиях неопределенности на основе регуляризирующего байесовского подхода // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM 2006, Санкт-Петербург, 27-29 июня. – СПб., 2006. – Т.1. – С. 36-50.
10. *Недосекин Д.Д., Прокопчина С. В., Чернявский Е.А.* Информационные технологии интеллектуализации измерительных процессов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1995.
11. *Прокопчина С.В.* Байесовские интеллектуальные технологии для аудита и управления сложными объектами в условиях значительной неопределенности // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM 2002, Санкт-Петербург, 25-27 июня. – СПб., 2002. – Т.1. – С. 27.

*Статья поступила в редакцию 2 сентября 2008 г.*

UDC 681.32

## **INFORMATIONAL-CONTROL SYSTEM FOR TERRITORIAL WATERSUPPLY**

***S.P. Orlov***<sup>1</sup>

Samara State Technical University  
244, Molodogvardey skaya str., Samara, 443100

*The concept of information project management system to supply potable water for Samara region population is considered. The control for region water supply based on the Unique Information Space and the methodology of Bayesian Intelligent Technologies is suggested. The structure of information control system for water supply is given.*

***Key words:*** control of region systems, information technology, water supply, Bayesian Intelligent Technologies

---

<sup>1</sup> *Sergey P. Orlov, Doctor of Technical Sciences, Professor.*