

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ISSN 0135-1710

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И
ПРИБОРЫ АВТОМАТИКИ**

**Всеукраинский межведомственный
научно-технический сборник**

Основан в 1965 г.

Выпуск 162

Харьков
2013

СОДЕРЖАНИЕ

СТЕНЛИ ГАЙДУК, ВЛАДИМИР ХАХАНОВ СТРУКТУРА ЛОГИЧЕСКОГО АССОЦИАТИВНОГО МУЛЬТИПРОЦЕССОРА....	4
ЛИСИЦКИЙ К.Е., МЕЛЬНИЧУК Е.Д. УТОЧНЁННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛУЧАЙНОЙ ПОДСТАНОВКИ.....	22
ЗИАРМАНД А.Н. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СУТЬ ПРОЕКТА «SMART ROADS».....	28
АКИМОВ Р.И., ХАХАНОВА А.В. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИНФОРМАТИВНОСТИ БИАДИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МЕЖКАДРОВЫХ АПЕРТУР ДЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ Р-КАДРОВ.....	35
БАРАННИК В.В., КРИВОНОС В.Н., ХАХАНОВА А.В. МЕТОД КОМПАКТНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВЕКТОРА ЗНАЧИМЫХ КОМПОНЕНТ ТРАНСФОРМАНТ.....	40
БАСАРАБ О.К. ФОРМУВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ЙМОВІРНІСНОГО ПОКАЗНИКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОПЕРАТИВНО-СЛУЖБОВИХ ДІЙ ДЕРЖАВНОЇ ПРИКОРДОННОЇ СЛУЖБИ УКРАЇНИ ЗАЛЕЖНО ВІД ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	47
БАРАННИК В.В., ВЛАСОВ А.В., ШИРЯЕВ А.В. МЕТОДОЛОГИЯ ДВУХКАСКАДНОГО МАСКИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ИНФОТЕЛЕКОМУНИКАЦИЙ.....	50
КУЛИЦА О.С. МЕТОДОЛОГИЯ УСТРАНЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЯХ КОМПРЕССИИ С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПОТЕРЕЙ КАЧЕСТВА.....	55
КУЗЕМИН А.Я., ШТУКИН М.В., ТКАЧЕНКО Б.К. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ.....	59
АРТАМОНОВ В.В., ПРИТЧИН С.Э. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ МОДУЛЯ ЮНГА И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ОТ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПОДЛОЖЕК GaAs	68
РЕФЕРАТЫ.....	74
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СБОРНИКА.....	78

СТРУКТУРА ЛОГИЧЕСКОГО АССОЦИАТИВНОГО МУЛЬТИПРОЦЕССОРА

Предлагается инфраструктура обеспечения параллельного анализа табличных или матричных форм ассоциативных отношений для поиска, распознавания и принятия решений в n -мерном векторном логическом пространстве на основе использования предложенной архитектуры мультипроцессора. Рассматриваются векторно-логические процесс-модели актуальных прикладных задач, в том числе встроенное диагностирование и восстановление работоспособности компонентов цифровых систем на кристаллах, где качество решения оценивается введенной неарифметической метрикой взаимодействия булевых векторов. Ключевые слова: мультипроцессор, векторно-логический анализ и пространство, критерий качества, диагностирование неисправностей памяти, процесс-модель. Multiprocessor, vector-logical analysis and space, quality criteria, memory fault diagnosis, process model.

1. Введение

Процессы отдельного и несинхронизированного развития двух компонентов: реального мира и киберпространства в настоящее время приобретают векторный формат, направленный на создание структурированных и взаимно интегрированных компонентов КиберГеоСистемы (КГС). Последняя эволюционирует путями создания в киберпространстве облачных сервисов точного мониторинга и оптимального управления несовершенным реальным миром на основе моделей взаимно-однозначного отображения всех земных процессов и явлений. Упрощенно КГС можно представить двумя модулями: «облачного» управления и исполнительного земного механизма. Здесь облако, которое вошло в обиход совсем недавно, вдруг оказывается знаково связанным по исторически существующим сказаниям и легендам с местом, отведенным для Бога – Главного Менеджера Человечества. Как в прошлом, так и в будущем оно не способно, не хочет и/или не может эффективно, оптимально и качественно управлять самим собой. Поэтому в настоящее время, в помощь Высшему разуму, человеческий интеллект небезуспешно пытается создать киберсистему для детального, точного и гуманного управления собой. Поскольку любая система является замкнутой относительно составляющих ее компонентов, то Бог и Человечество, как участники создания замкнутой системы, не могут существовать друг без друга. Оставив глобальный и стратегический менеджмент Богу, человеческий разум направляет свои усилия на помощь Высшему разуму в деталях мониторинга и управления процессами и явлениями, направленными на повышение качества жизни и улучшение среды обитания человечества, устраняя тем самым из данной епархии деструктивные земные и неземные силы.

История человеческого бытия практически не знает примеров справедливого и доверительного управления странами и группами людей со стороны руководителей различного уровня. Всегда находятся люди и организации, которые «страдают» от неправомерных или непрофессиональных управленческих действий, вызванных некомпетентностью или субъективизмом топ-менеджеров. Отсюда у каждого человека возникает потребность в справедливом барине, добром царе, а в пределе – каждому нужен Бог, в компетентность и доброту которого мы верим. Достоинно и корректно управлять человечеством, группой людей или индивидуумом может только КГС – беспристрастный, неподкупный и толерантный ко всем киберменеджер, функционирующий на основе существующих законов юриспруденции, морали, общечеловеческих ценностей и гуманизма.

Таким образом, формально КиберГеоСистема представляется в виде двух компонентов: Cyberity – модуль мониторинга и управления и Humanity – модуль (механизм) исполнения желаний, которые связаны между собой сигналами: Мониторинга, Управления и Иницирования обоих компонентов в целях получения реализации желаний. Аналитическая форма задания системы и ее структурный эквивалент изображены на рис. 1.

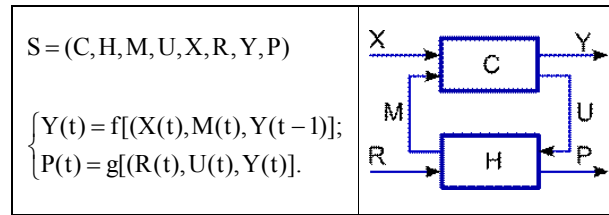


Рис. 1. Аналитическая и структурная формы задания КГС

Здесь представлены (C, H, M, U, X, R, Y, P) соответственно: модули управления и исполнения; сигналы мониторинга, управления, инициирования управляющих идей и исполнительных ресурсов (время – деньги), индикации состояния алгоритма (плана) реализации идеи, а также выпуска продукции или сервиса.

В рамках создания КиберГеоСистемы актуальными и рыночно привлекательными являются следующие направления исследований: 1. Технологии дифференцирования мобильных систем и структурированное киберпространство облачных сервисов. 2. Квантовые параллельные вычисления и специализированные мультипроцессоры. 3. Сенсорные интеллектуальные устройства для реального мира и быстродействующие роботы для киберпространства. 4. Трехмерные мультипроцессоры, 3D-вычислительные процессы и многомерное киберпространство. Здесь речь идет о неминуемом переходе вычислительных устройств, процессов и компонентов в 3D-измерение в связи с появлением трехмерного FinFETs транзистора. 5. Это приведет весь компьютерный мир к реализации совершенно новой парадигмы – параллельного программирования вычислительных структур в трех измерениях. 6. Важным представляется создание 3D-мультипроцессора на объемном кристалле, что станет возможным в ближайшие 5 лет. Здесь следует внедрять треугольную, а также тетраэдрную структуры межкомпонентных соседних связей в качестве базовых элементов для формирования вычислительных объемов микро- и мультипроцессоров, а также киберпространства сервисов. 7. Становится актуальной разработка 3D-принтеров для реализации технологий печатания (изготовления) трехмерных оптимальных специализированных архитектур, функционально заточенных под конкретные алгоритмы решения практических задач.

Идея исследования – убрать из компьютера «тяжеловесную» арифметику и трансформировать освободившиеся ресурсы для создания инфраструктуры векторно-логических вычислений для быстрого поиска, распознавания и принятия решений при анализе информационного пространства с помощью примитивных операций: and, or, not, xor. Специализация компьютерного изделия, ориентированная на использование только логических операций, дает возможность существенно (x100) повысить быстродействие решения неарифметических задач. Исключение арифметических операций, применение параллелизма алгебры векторной логики, мультипроцессорность архитектуры создают эффективную инфраструктуру, которая объединяет математическую и технологическую культуру для решения прикладных задач. Рыночная привлекательность логического ассоциативного мультипроцессора (Logical Associative MultiProcessor – LAMP) определяется тысячами старых и новых логических по своей природе задач, которые в настоящее время решаются неэффективно на избыточных универсальных компьютерах с мощным арифметическим процессором. Вот некоторые актуальные для рынка информационных технологий проблемы: 1. Анализ, синтез и коррекция синтаксических и семантических языковых конструкций (реферирование, исправление ошибок, оценивание качества текстов). 2. Распознавание видео- и аудио-образов на основе их представления векторными моделями существенных параметров в дискретном пространстве. 3. Сервисное обслуживание сложных технических изделий и восстановление работоспособности в процессе их функционирования. 4. Тестирование знаний и экспертное обслуживание объектов или субъектов для определения их валидности. 5. Идентификация объекта или процесса для принятия решения в условиях неопределенности. 6. Точный поиск заданной вектором параметров информации в Internet. 7. Целеуказание в истребителе или в автоматической системе посадки лайнера, работающей в реальном микросекундном диапазоне времени. 8. Разведение объектов во времени и в пространстве для диспетчерской службы аэропорта или оптимизация инфраструктуры

городского транспорта в целях исключения коллизий. Практически все упомянутые задачи решаются в реальном масштабе времени, являются изоморфными по логической структуре процесс-моделей, использующих совокупность взаимосвязанных ассоциативных таблиц. Для их решения необходима специализированная аппаратная платформа (LAMP), ориентированная на параллельное выполнение процедур поиска, распознавания и принятия решений, оцениваемых путем применения неарифметического критерия качества.

Цель исследования – существенное повышение быстродействия процедур поиска, распознавания и принятия решений путем мультипроцессорной и параллельной реализации ассоциативно-логических векторных операций для анализа графовых и табличных структур данных в векторном логическом пространстве без использования арифметических операций.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать: 1) неарифметическую метрику оценивания векторно-логических решений в кибернетическом пространстве; 2) структуры данных и процесс-модели решения актуальных задач; 3) архитектуру логического ассоциативного мультипроцессора и показать пути его практического использования.

Объектом исследования является инфраструктура процессов поиска, распознавания и принятия решений в векторно-логическом пространстве на основе применения алгебры векторной логики, вычислительной архитектуры анализа ассоциативно-логических структур данных и неарифметического интегрального критерия качества.

В процессе исследований использованы источники научно-технической информации: ассоциативно-логические структуры данных для решения информационных задач [1-5]; аппаратная платформа векторно-логического анализа информации [6-9]; модели и методы дискретного анализа и синтеза объектов киберпространства [10-15].

2. Метрика киберпространства для оценивания решения

Дискретное векторно-логическое пространство (киберпространство) – совокупность взаимодействующих по соответствующей метрике информационных процессов и явлений, описываемых векторами (кортежами) логических переменных и использующих в качестве носителя компьютерные системы и сети.

Метрика – способ измерения расстояния в пространстве между компонентами процессов или явлений, описанных векторами логических переменных. Расстояние в киберпространстве – это хог-отношение между парой векторов, обозначающих компоненты процесса или явления, что отличает его от кодового расстояния по Хэммингу. Расстояние, производная (булева), степень изменения, различия или близости есть изоморфные понятия, связанные с определением отношения двух компонентов процесса или явления. Понятие близости (расстояния) компонентов в киберпространстве есть мера их различия. Процедуры сравнения, измерения, оценивания, распознавания, тестирования, диагностирования, идентификации есть способ определения отношения при наличии не менее чем двух объектов.

Компонент пространства представлен k -мерным (двоичным) вектором $a = (a_1, \dots, a_j, \dots, a_k)$, $a_j \in \{0, 1\}$, где каждая его координата определена в двоичном алфавите, 0 – «ложь», 1 – «истина». Нуль-вектор есть k -мерный кортеж, все координаты которого равны нулю: $a_j = 0, j = \overline{1, k}$.

Метрика β кибернетического пространства определяется единственным равенством (1), которое формирует нуль-вектор для хог-суммы расстояний d_i между ненулевым и конечным числом точек (объектов), замкнутых в цикл:

$$\beta = \bigoplus_{i=1}^n d_i = 0, \quad (1)$$

где n – количество (целое число) расстояний между компонентами (векторами) пространства, составляющими цикл $D = (d_1, \dots, d_i, \dots, d_n)$; d_i – вектор расстояния, соответствующий ребру цикла, соединяющему два компонента (вектора) a, b пространства, который

далее обозначается без индекса как $d(a, b)$. Расстояние между двумя объектами (векторами) a и b есть производный вектор: $d(a, b) = (a_j \oplus b_j)_1^k$. Векторному значению расстояния соответствует норма – скалярное расстояние по Хэммингу между двумя векторами – как число единиц вектора $d(a, b)$. Иначе: метрика β векторного логического двоичного пространства есть равная нуль-вектору хог-сумма расстояний между конечным числом точек (вершин) графа, образующих цикл. Сумма n -мерных двоичных векторов, задающих координаты точек циклической фигуры, равна нуль-вектору. Свертка пространства в нуль-вектор представляет интерес для многих практических задач, включая: диагностирование и исправление ошибок при передаче информации по каналам связи; поиск дефектов в цифровых изделиях на основе двузначных и многозначных таблиц неисправностей. Кроме того, на основе введенной метрики можно дать более формальное определение киберпространства, которое является векторно-логическим, нормируемым β -метрикой, где хог-сумма расстояний между конечным числом точек цикла равна нуль-вектору. Определение метрики ставит во главу угла не элементы множества, но отношения, что позволяет сократить систему аксиом (тождественности, симметрии и транзитивного треугольного замыкания) с трех до одной и распространить ее действие на сколь угодно сложные конструкции n -мерного логического пространства. Классическое задание метрики для определения взаимодействия одной, двух и трех точек в векторном логическом пространстве является частным случаем β -метрики при $i = 1, 2, 3$ соответственно:

$$M = \begin{cases} d_1 = 0 \leftrightarrow a = b; \\ d_1 \oplus d_2 = 0 \leftrightarrow d(a, b) = d(b, a); \\ d_1 \oplus d_2 \oplus d_3 = 0 \leftrightarrow d(a, b) \oplus d(b, c) = d(a, c). \end{cases} \quad (2)$$

Векторно-логический транзитивный треугольник (2) имеет полную аналогию численному измерению расстояния в метрическом M -пространстве, которое задается системой аксиом, определяющей взаимодействие одной, двух и трех точек в любом пространстве:

$$M = \begin{cases} d(a, b) = 0 \leftrightarrow a = b; \\ d(a, b) = d(b, a); \\ d(a, b) + d(b, c) \geq d(a, c). \end{cases} \quad (3)$$

Специфика аксиомы треугольника (3) метрического пространства заключается в численном (скалярном) сравнении расстояний трех объектов, когда интервальная неопределенность ответа – две стороны треугольника могут быть больше либо равны третьей – малопригодна для определения точной длины последней стороны. Векторно-логическое пространство устраняет данный недостаток, полностью исключает степень неопределенности в бинарном отношении детерминированных состояний процессов или явлений. В этом случае численная неопределенность третьей стороны треугольника в векторном логическом пространстве приобретает форму точного двоичного вектора, который характеризует расстояние между двумя объектами и вычисляется на основе знания расстояний двух других сторон треугольника: $d(a, b) \oplus d(b, c) = d(a, c) \rightarrow d(a, b) \oplus d(b, c) \oplus d(a, c) = 0$.

Пример. Имеется пять точек в векторном пространстве: (000111, 111000, 101010, 010101, 110011). Замыкание этих точек в цикл дает следующие стороны-расстояния в пятиугольнике: (111111, 010010, 111111, 100110, 110100). Покоординатное сложение всех векторов дает результат (000000). Практическая значимость данного факта заключается в возможности восстановления любого расстояния в замкнутом цикле, если известны $(n-1)$ сторон фигуры. Для треугольника это означает восстановление третьей стороны по известным двум. Если же создать из треугольников замкнутое логическое пространство, то можно сэкономить 66% от объема данных, который формирует все расстояния в логическом пространстве.

Метрика β кибернетического многозначного векторно-логического пространства есть вектор, равный значению \emptyset по всем координатам, полученный путем применения симметрической разности расстояний между конечным числом точек, образующих цикл:

$$\beta = \Delta_{i=1}^n d_i = \emptyset, \quad (4)$$

где каждая координата вектора, соответствующего объекту, определена в алфавите, составляющем булеан на универсуме примитивов мощностью p : $a_j = \{\alpha_1, \dots, \alpha_r, \dots, \alpha_m\}$, $m = 2^p$.

Равенство пустому вектору симметрической разности покоординатного теоретико-множественного взаимодействия (4) подчеркивает равнозначность компонентов (расстояний), участвующих в формировании уравнения, где единственная координатная операция $d_{i,j} \Delta d_{i+1,j}$, используемая, например, в четырехзначной модели Кантора $A = \{0, 1, x, \emptyset\}$, $x = \{0, 1\}$, определяется соответствующей таблицей:

Δ	0	1	x	\emptyset
0	\emptyset	x	1	0
1	x	\emptyset	0	1
x	1	0	\emptyset	x
\emptyset	0	1	x	\emptyset

\cap	0	1	x	\emptyset
0	0	\emptyset	0	\emptyset
1	\emptyset	1	1	\emptyset
x	0	1	x	\emptyset
\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset

\cup	0	1	x	\emptyset
0	0	x	x	0
1	x	1	x	1
x	x	x	x	x
\emptyset	0	1	x	\emptyset

a	0	1	x	\emptyset
\tilde{a}	1	0	\emptyset	x

(5)

Здесь также приведены таблицы истинности для других базовых теоретико-множественных операций (пересечение, объединение, дополнение), далее используемых по тексту. Число примитивных символов, образующих замкнутый относительно теоретико-множественных координатных операций алфавит, может быть увеличено. При этом мощность алфавита (булеана) определяется выражением $m = 2^p$, где p – число примитивов. Для практического использования введенной метрики киберпространства далее предлагается доказательный переход от численной характеристики бинарного отношения объектов, объединяющей три скалярные оценки их взаимодействия, к чисто векторно-логическому критерию качества отношения двух объектов.

Для понимания последующего материала необходимо ввести некоторые допущения и определения. Входной вектор $m = (m_1, \dots, m_j, \dots, m_k)$, $m_j \in \{0, 1, x\}$ и анализируемый объект $A = (A_1, \dots, A_j, \dots, A_k)$, $A_j \in \{0, 1, x\}$, который также представлен вектором, имеют одинаковую размерность k . Степень принадлежности m -вектора к A обозначается как $\mu(m \in A)$. Существует 5 типов координатного теоретико-множественного Δ -взаимодействия двух векторов $m \Delta A$, определенных на рис. 2. Они формируют все примитивные варианты реакции обобщенной системы поиска, распознавания и принятия решения на входной вектор-запрос. В технологической отрасли знаний – технической диагностике – упомянутая последовательность действий изоморфна маршруту: поиск дефектов, их распознавание, принятие решения на восстановление работоспособности. Данные стадии технологического маршрута нуждаются в метрике оценивания решений для выбора оптимального варианта.

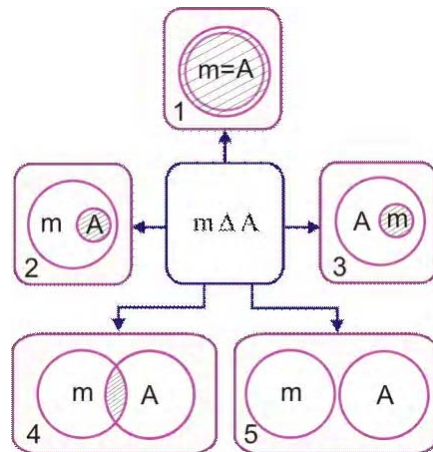


Рис. 2. Результаты взаимодействия двух векторов

Определение. Интегральная теоретико-множественная метрика для оценивания качества запроса есть функция взаимодействия многозначных по координатам векторов $m \Delta A$, которая определяется средней суммой трех параметров: кодовое расстояние $d(m, A)$, функция принадлежности $\mu(m \in A)$ и функция принадлежности $\mu(A \in m)$:

$$Q = \frac{1}{3}[d(m, A) + \mu(m \in A) + \mu(A \in m)],$$

$$d(m, A) = \frac{1}{n}[n - \text{card}[(i : m_i \cap A_i = \emptyset, i = 1, \dots, k)]]; \mu(m \in A) = 2^{c-a}; \mu(A \in m) = 2^{c-b};$$

$$a = \text{card}[(i : A_i = x, i = 1, \dots, k)]; b = \text{card}[(i : m_i = x, i = 1, \dots, k)]; c = \text{card}[(i : m_i \cap A_i = x, i = 1, \dots, k)];$$

Пояснения. Пересечение (объединение) векторов – есть векторная операция, основанная на соответствующих координатных теоретико-множественных операциях. Операции координатного пересечения и объединения (6) определены в алфавите Кантора $A = \{0, 1, x = \{0, 1\}, \emptyset\}$. Нормирование параметров позволяет оценить уровень взаимодействия векторов в численном интервале $[0, 1]$. Если зафиксировано предельное максимальное значение каждого параметра, равное 1, то векторы равны между собой. Минимальная оценка, $Q = 0$, фиксируется в случае полного несовпадения векторов по всем n координатам. Если $m \cap A = m$ и мощность покоординатного пересечения равна половине мощности пространства вектора A , то функции принадлежности и качества равны:

$$\mu(m \in A) = \frac{1}{2}; \mu(A \in m) = 1; d(m, A) = 1; Q(m, A) = \frac{5}{2 \times 3} = \frac{5}{6}.$$

Аналогичное значение будет иметь параметр Q , если $m \cap A = A$ и мощность покоординатного пересечения равна половине мощности пространства вектора m . Здесь пространство вектора есть функция от числа координат ω , равных x : $q = 2^\omega$. Если $\text{card}(m \cap A)$ – мощность покоординатного пересечения равна половине мощностей пространств векторов A и m , то функции принадлежности имеют значения:

$$\mu(m \in A) = \frac{1}{2}; \mu(A \in m) = \frac{1}{2}; d(m, A) = 1; Q(m, A) = \frac{1}{3} \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + 1 \right) = \frac{2}{3}.$$

Например, даны два вектора: $A = (XXX10)$ и $m = (XX0X0)$. Их пересечение равно $(XX010) = \{00010, 01010, 10010, 11010\}$. Иначе, мощность результирующего пространства равна четырем двоичным векторам или половине мощностей исходных двоичных векторов.

Следует заметить, если пересечение двух векторов равно пустому множеству $\exists i(m_i \cap A_i) = \emptyset$, то количество общих точек (двоичных векторов) при пересечении двух пространств, формируемых двумя векторами, равно нулю.

Цель введения векторно-логического критерия качества решения заключается в существенном повышении быстродействия при подсчете оценки Q взаимодействия компонентов (векторов) m и A при анализе ассоциативных структур данных путем использования только векторных операций, выполняемых одновременно (параллельно) над всеми разрядами. С учетом изоморфизма теоретико-множественных и логических операций арифметический критерий (6) без усреднения функций принадлежности и кодового расстояния можно трансформировать к виду:

$$Q = d(m, A) + \mu(m \in A) + \mu(A \in m),$$

$$d(m, A) = \text{card}(\{i : m_i \oplus A_i = U, i = 1, \dots, k\});$$

$$\mu(m \in A) = \text{card}(\{i : A_i = U, i = 1, \dots, k\}) - \text{card}(\{i : m_i \oplus A_i = U, i = 1, \dots, k\});$$

$$\mu(A \in m) = \text{card}(\{i : m_i = U, i = 1, \dots, k\}) - \text{card}(\{i : m_i \oplus A_i = U, i = 1, \dots, k\});$$

$$U = \begin{cases} 1 \leftarrow \{m_i, A_i\} \in \{0, 1\}; \\ x \leftarrow \{m_i, A_i\} \in \{0, 1, x\}. \end{cases} \quad (7)$$

Если векторы m и A – двоичные по всем координатам, то переменная $U=1$ и вычисления проводятся по правилам двоичной \oplus -операции. Если векторы m и A определены в троичном алфавите, то переменная $U=x$ инициирует вычисления на основе использования теоретико-множественной операции симметрической разности Δ (7). Введение переменной U дает возможность уйти от написания двух формул критерия в зависимости от значности алфавита описания координат взаимодействующих векторов. Представленные в (7) векторные логические операции $(\wedge, \vee, \oplus, \neg)$ изоморфны теоретико-множественным $(\cap, \cup, \Delta, \sim)$. При этом теоретико-множественные координатные операции, соответствующие данным логическим, были определены ранее на многозначном алфавите Кантора в выражении (5). Первый компонент (7), составляющий критерий, формирует степень несоответствия k -мерных векторов – кодовое расстояние, путем выполнения операции хог, второй и третий определяют степени непринадлежности результата конъюнкции к числу единиц каждого из двух взаимодействующих векторов. Понятия принадлежности и непринадлежности являются взаимодополняющими, но в данном случае технологичнее вычислять непринадлежность. Следовательно, необходимый критерий качества равен нулю (по всем координатам), когда два вектора равны между собой. Оценка качества взаимодействия двух двоичных векторов ухудшается по мере возрастания критерия от нуля до единицы. Для того чтобы окончательно исключить арифметические операции при подсчете векторно-логического критерия качества, необходимо логически объединить три оценки (7) в одну:

$$\begin{aligned}
 Q &= d(m, A) \vee \mu(m \in A) \vee \mu(A \in m) = \\
 &= (m \oplus A) \vee (A \wedge \overline{m \wedge A}) \vee (m \wedge \overline{m \wedge A}) = \\
 &= (m \oplus A) \vee [A \wedge (\overline{m} \vee \overline{A})] \vee [m \wedge (\overline{m} \vee \overline{A})] = \\
 &= (m \oplus A) \vee [(A \wedge \overline{m}) \vee (A \wedge \overline{A}) \vee (m \wedge \overline{m}) \vee (m \wedge \overline{A})] = \\
 &= [(A \wedge \overline{m}) \vee (m \wedge \overline{A})] \vee [(A \wedge \overline{m}) \vee (A \wedge \overline{A}) \vee (m \wedge \overline{m}) \vee (m \wedge \overline{A})] = \\
 &= (A \wedge \overline{m}) \vee (m \wedge \overline{A}) \vee (A \wedge \overline{m}) \vee (A \wedge \overline{A}) \vee (m \wedge \overline{m}) \vee (m \wedge \overline{A}) = \\
 &= m \oplus A.
 \end{aligned}$$

Процедура вычисления векторного критерия качества зависит от значности алфавита:

$$Q = \begin{cases} m \oplus A \leftarrow \{m_i, A_i\} \in \{0, 1\}; \\ m \Delta A \leftarrow \{m_i, A_i\} \in \{0, 1, x\}. \end{cases} \quad (8)$$

Для двоичного алфавита таблица истинности координатной хог-операции имеет вид:

\oplus	0	1
0	0	1
1	1	0

Во втором случае, когда алфавит описания координат имеет три значения, вычисление симметрической разности осуществляется в соответствии с Δ -операцией, представленной в (5).

Критерий качества Q однозначно определяет три формы взаимодействия двух любых объектов в n -мерном векторном логическом пространстве: расстояние и две функции принадлежности. При ненулевом расстоянии по Хэммингу функции принадлежности равны нулю, поскольку пространства двух векторов в данном случае не пересекаются. В противном случае – кодовое расстояние, равное нулю – взаимодействие объектов оценивается по функциям принадлежности. Увеличение числа нулей повышает критерий качества, а увеличение количества единиц обуславливает ухудшение качества взаимодействия по соответствующим булевым переменным. Критерий качества $Q = m \oplus A$ согласуется с введен-

ной выше метрикой оценивания расстояния или взаимодействия объектов в векторно-логическом пространстве, а также имеет тривиальную вычислительную процедуру для оценивания решений, связанных с анализом и синтезом информационных объектов. В самом деле, векторное логическое пространство не должно иметь метрического расстояния и численных критериев качества, включающих арифметические операции на скалярных величинах.

Для сравнения критериев качества необходимо определять число единиц в каждом векторе без выполнения операций суммирования. Это можно сделать с помощью регистра сдвига [6] (рис. 3), который позволяет за один такт выполнить процедуру slc (shift left crowding) — сдвиг влево с одновременным уплотнением всех единичных координат n -разрядного двоичного вектора.

После процедуры сжатия номер правого единичного бита уплотненной серии единиц формирует значение критерия качества взаимодействия векторов. Но в данном случае такое число есть дань скалярной оценке бинарного отношения, которая нужна лишь человеку как информация для сравнения предлагаемой инфраструктуры относительно существующих технологий. В практических задачах такая оценка теряет свой смысл при выборе (квази-) оптимальной альтернативы, поскольку векторная оценка удобней для вычислителя, который определяет лучшее решение без участия в данном процессе пользователя. Для наборов $m = (110011001100)$, $A = (000011110101)$ определение качества их взаимодействия по формулам (8) представлено в виде следующих процедур (нулевые координаты отмечены точками):

m	1	1	.	.	1	1	.	.	1	1	.	.
A	.	.	.	.	1	1	1	1	1	1	.	1
$Q^* = m \oplus A$	1	1	.	.	.	.	.	1	1	1	.	1
$Q(m,A)$	1	1	1	1	1	1						

Здесь сформирована оценка взаимодействия векторов и, что самое главное, единичные координаты строки $Q^* = d(m, A) \vee \mu(m \in A) \vee \mu(A \in m)$ идентифицируют все существенные переменные, по которым взаимодействие векторов не соответствует критерию качества. Процедура сжатия для получения $Q(m, A)$ не означает потерю информативной векторной оценки $Q^* = m \oplus A$. Результат сжатия позволяет лишь сделать выбор лучшего из двух или более решений путем сравнения суммарного числа единиц, формирующих скалярные оценки критериев. Где их меньше, там решение лучше.

Как выбрать лучшее решение, если их несколько?

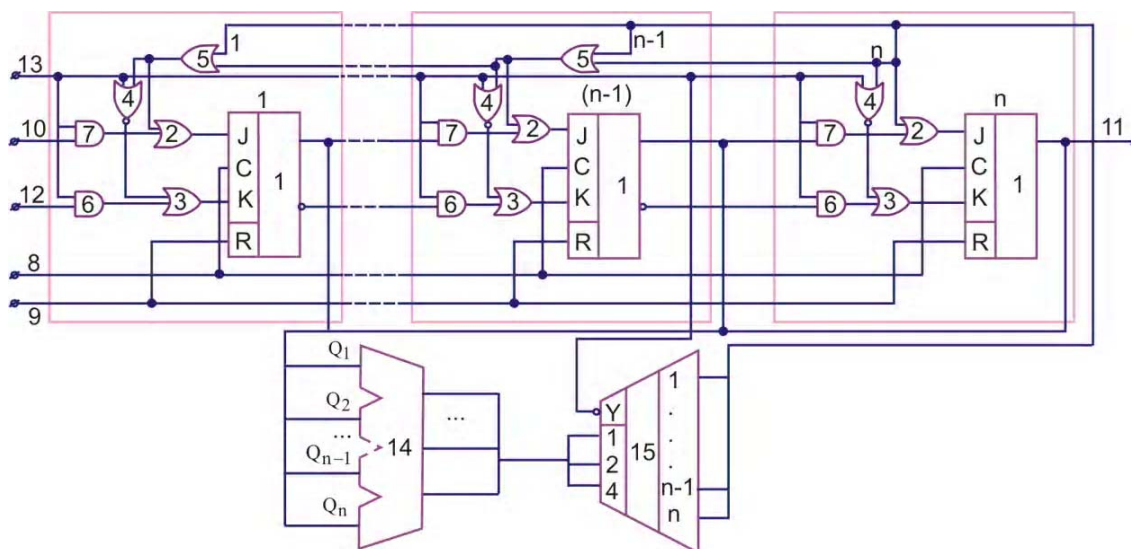


Рис. 3. Регистр сдвига и уплотнения единиц

Здесь выражение, определяющее функциональность, $P(m, A)$, можно представить как аналитическую модель вычислительного процесса в виде высказывания, минимизирующего критерий качества; структуры данных представлены в виде совокупности таблиц $A = (A_1, \dots, A_i, \dots, A_m)$, логически взаимосвязанных между собой; каждая таблица задается упорядоченной совокупностью вектор-строк ассоциативной таблицы $A_i = (A_{i1}, \dots, A_{ij}, \dots, A_{is})$ явных решений, а строка $A_{ij} = (A_{ij1}, \dots, A_{ijr}, \dots, A_{ijsq})$ представляет собой истинное высказывание. Функционал, представленный в виде таблицы, не имеет постоянных во времени входных и выходных переменных. Равнозначность всех переменных в векторе $A_{ij} = (A_{ij1}, \dots, A_{ijr}, \dots, A_{ijsq})$ создает одинаковые условия их существования. Это означает инвариантность решения задач прямой и обратной импликации в пространстве $A_i \in A$. Ассоциативный вектор A_{ij} определяет собой явное решение, где каждая переменная задается в конечном, многозначном и дискретном алфавите $A_{ijr} \in \{\alpha_1, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_k\} = \beta$. Взаимодействие $P(m, A)$, входного вектора-запроса $m = (m_1, \dots, m_r, \dots, m_q)$ с множеством $A = (A_1, \dots, A_i, \dots, A_m)$, формирует решения с выбором лучшего из них по минимальному критерию качества:

$$P(m, A) = \min Q_i [m \wedge (A_1 \vee A_2 \vee \dots \vee A_i \vee \dots \vee A_m)].$$

Конкретное взаимодействие вершин (таблиц) графа между собой создает функциональность $A = (A_1, \dots, A_i, \dots, A_m)$, которая может быть оформлена в следующие структуры: 1) Единственная ассоциативная таблица, содержащая все решения логической задачи в явном виде. Преимущество – максимальное быстродействие параллельного ассоциативного поиска решения по таблице. Недостаток – максимально высокая аппаратная сложность размещения таблицы большой размерности. 2) Древоидная (графовая) структура бинарных отношений между функциональными примитивами, каждый из которых формирует таблицу истинности для незначительного количества переменных. Преимущество – максимально низкая аппаратная сложность решения задачи. Недостаток – минимальное быстродействие последовательного ассоциативного поиска решения по дереву. 3) Компромиссная графовая структура логически понятных для пользователя отношений между примитивами, каждый из которых формирует таблицу истинности для логически сильно взаимосвязанных переменных. Преимущество – высокое быстродействие параллельного ассоциативного поиска решений по минимальному числу таблиц, составляющих граф, а также сравнительно невысокая аппаратная сложность решения задачи. Недостаток – снижение быстродействия из-за последовательной логической обработки графовой структуры явных решений, найденных в таблицах и необходимость введения дополнительной переменной для логического связывания таблиц (вершин) в граф отношений. Разбиение одной таблицы (ассоциативной памяти) на k частей приводит к уменьшению аппаратных затрат, выраженных в компонентах (лутах) (LUT – Look Up Table) программируемой логической матрицы [9, 13]. Каждая ячейка памяти создается с помощью четырех лутов. Учитывая, что ассоциативную матрицу можно представить квадратом со стороной n , то суммарные аппаратные затраты $Z(k)$ памяти для хранения данных и время $T(k)$ анализа логического ассоциативного графа функционально зависят от числа k разбиений таблицы или числа вершин графа:

$$Z(k) = k \times \frac{1}{4} \times \left(\frac{n}{k}\right)^2 + h = \frac{n^2}{4 \times k} + h, \quad (h = \{n, \text{const}\});$$

$$T(k) = \frac{4 \times k}{t_{\text{clk}}} + \frac{4}{t_{\text{clk}}} = \frac{4}{t_{\text{clk}}} (k + 1), \quad (t_{\text{clk}} = \text{const}). \quad (10)$$

Здесь h – затраты на общую схему управления системой ассоциативных памятей. Платой за уменьшение аппаратуры является снижение быстродействия обработки структуры памятей или увеличение времени анализа компонентов графа. Период обработки одной ассоциативной памяти представлен циклом из 4-х синхроимпульсов. Число разбиений k пропорционально увеличивает количество тактов в худшем варианте последовательного соединения памятей. Слагаемое $4/t_{\text{clk}}$ в (10) задает время, необходимое для подготовки данных на входе вычислительной структуры, а также для их декодирования на выходе. Функциональные зависимости аппаратных затрат и времени анализа графа ассоциативных памятей от числа вершин или разбиений представлены на рис. 5.



Рис. 5. Функции аппаратуры и времени от числа разбиений

Обобщенная функция эффективности графовой структуры от числа вершин

$$f[Z(k), T(k)] = Z(k) + T(k) = \left(\frac{n^2}{4 \times k} + h \right) + \left(\frac{4}{t_{\text{clk}}} (k + 1) \right) \quad (11)$$

позволяет определить оптимальное разбиение совокупного и наперед заданного объема ассоциативной памяти [11]. В случае, представленном на рис. 5, лучшее разбиение есть минимум аддитивной функции, который определяется значением k , обращающим производную функции в нуль: $n \times n = 600 \times 600$, $h = 200$, $t_{\text{clk}} = 4$, $k = 4$. Предложенная структура ассоциативных таблиц и введенный критерий качества получаемых решений являются основой для разработки специализированной мультипроцессорной архитектуры, ориентированной на параллельное выполнение векторных логических операций.

4. Архитектура логического ассоциативного мультипроцессора

Для анализа больших информационных объемов логических данных существует несколько практически ориентированных технологий: 1. Использование рабочей станции для последовательного программирования задачи, где стоимость ее решения, а также временные затраты очень высоки. 2. Разработка специализированного параллельного процессора на основе PLD. Высокий параллелизм обработки информации компенсирует сравнительно низкую по сравнению с CPU тактовую частоту. Такое схемотехническое решение с возможностью перепрограммирования является по производительности выигрышным вариантом. Недостаток – отсутствие гибкости, характерной для программных методов решения логических задач, и высокая стоимость реализации системы на кристалле PLD при больших объемах промышленного выпуска изделия. 3. Лучшее решение может быть получено в результате объединения достоинств центрального процессорного устройства, программируемой логической матрицы и заказной СБИС [8,13], таких как гибкость программирования, возможность корректирования исходных кодов; минимальное число команд и простые схемотехнические решения аппаратной реализации мультипроцессора; распараллеливание логических процедур на структуре однобитовых процессоров. Реализация вычислителя в кристалле заказной СБИС дает возможность получать максимальную тактовую частоту, минимальную стоимость микросхемы при больших объемах выпуска изделия, низкое энергопотребление. Объединение преимуществ перечисленных технологий определяет базовую конфигурацию вычислителя, имеющего сферическую структуру (рис. 6), состоящую из 16-ти векторных секвенсоров — устройств последовательного управления (УПУ), каждый из которых, включая граничные элементы, соединен с восемью соседними. Прототипом данного вычислителя является процессор PRUS, описанный в работе [7].

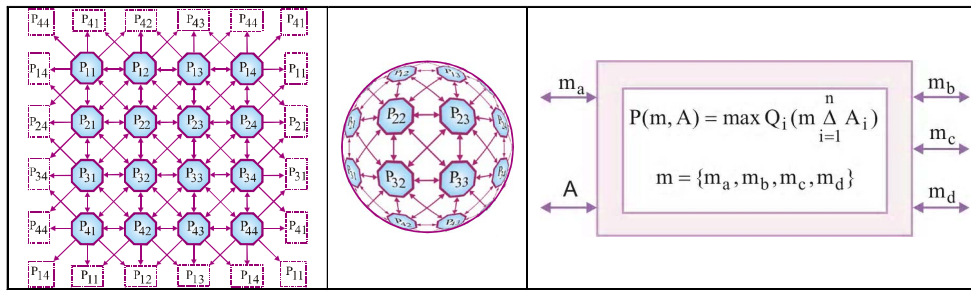


Рис. 6. Макроархитектура мультипроцессора и интерфейс

Занесение информации в процессор выполняется по классической схеме процесса проектирования, за исключением стадии размещения и трассировки, которая заменяется фазой распределения программ и данных между всеми логическими бит-процессорами, работающими параллельно. Компилятор обеспечивает распределение данных по процессорам, задает время формирования решения на выходе каждого из них, а также планирует передачу полученных результатов другому процессору.

Логический ассоциативный мультипроцессор (ЛАМП) — это эффективная сеть процессоров, которая обрабатывает данные и обеспечивает обмен информацией между компонентами сети в процессе их решения. Простая схмотехника каждого процессора позволяет эффективно обрабатывать сверхбольшие массивы, насчитывающие миллионы бит информации, затрачивая на это в сотни раз меньше времени по сравнению с универсальным процессором.

Базовая ячейка — векторный процессор для вычислителя может быть синтезирован на 200-х вентилях, что дает возможность сеть, содержащую 4096 вычислителей, легко реализовать в кристалле заказной СБИС, используя современную кремниевую технологию. Поскольку затраты памяти для хранения данных весьма незначительны, вычислитель может быть использован при проектировании систем управления в таких областях человеческой деятельности, как промышленное производство, защита информации, медицина, искусственный интеллект, космонавтика, геология, метеорология. Особый интерес вычислитель представляет для цифровой обработки данных, распознавания образов и криптоанализа. Однако основное назначение ЛАМП — получение квазиоптимального решения в задаче поиска и (или) распознавания с использованием компонентов архитектуры, ориентированных на выполнение векторных логических операций:

$$P(m, A) = \min Q_i \left(m \Delta_{i=1}^n A_i \right), m = \{m_a, m_b, m_c, m_d\}. \quad (12)$$

Интерфейс системы, соответствующий данному функционалу (12), представлен на рис. 6. Все компоненты $\{A, m_a, m_b, m_c, m_d\}$ могут быть как входными, так и выходными. Двухнаправленная детализация интерфейса связана с инвариантностью отношения всех переменных, векторов, A -матрицы и компонентов к входам и (или) выходам архитектуры. Поэтому структурная модель системы вычислителя может быть использована для решения любых задач прямой и обратной импликации в дискретном логическом пространстве, в чем и заключается ее отличие от концепции автоматной модели вычислительного устройства с выраженными входами и выходами. Компоненты или регистры $m = (m_a, m_b, m_c, m_d)$ используются для получения решения в виде буферных, входных и выходных векторов, а также для идентификации оценки качества удовлетворения входного запроса.

Один из возможных вариантов архитектуры ЛАМП представлен на рис. 7. Основным компонентом является матрица $P = [P_{ij}], (i, j = \overline{1, 4})$, содержащая 16 вектор-процессоров, каждый из которых предназначен для выполнения пяти логических векторных операций над памятью данных, представленной в виде таблицы A , размерностью $(m \times n)$.

В блоке интерфейса происходит обмен данными и загрузка программы обработки данных в соответствующую память команд. Блок управления инициирует выполнение

команд логической обработки данных и синхронизирует функционирование всех компонентов мультипроцессора. Блок *IP* [8] предназначен для сервисного обслуживания всех модулей, диагностирования дефектов и восстановления работоспособности компонентов и устройства в целом. Элементарный логический ассоциативный процессор или УПУ (см. рис. 6), входящий в состав вычислителя, содержит логический процессор *LP*, ассоциативную (память) *A*-матрицу для параллельного выполнения базовых операций, блок векторов *m*, предназначенный для параллельного обслуживания строк и столбцов *A*-матрицы, а также обмена данными в процессе вычислений, память прямого доступа *CM*, сохраняющую команды программы обработки информации, автомат управления *CU* выполнением логических операций, интерфейс *I* связи УПУ с другими элементами и устройствами ЛАМП.



Рис. 7. Архитектура ЛАМП и структура УПУ

LP (рис. 8) выполняет пять операций (*and*, *or*, *not*, *xor*, *slc*), являющихся базовыми для создания алгоритмов и процедур информационного поиска и оценивания решения. Модуль *LP* имеет мультиплексор, коммутирующий один из пяти операндов с выбранным логическим векторным оператором. Сформированный результат через мультиплексор (элемент *or*) заносится в один из четырех операндов, выбираемый соответствующим адресом.

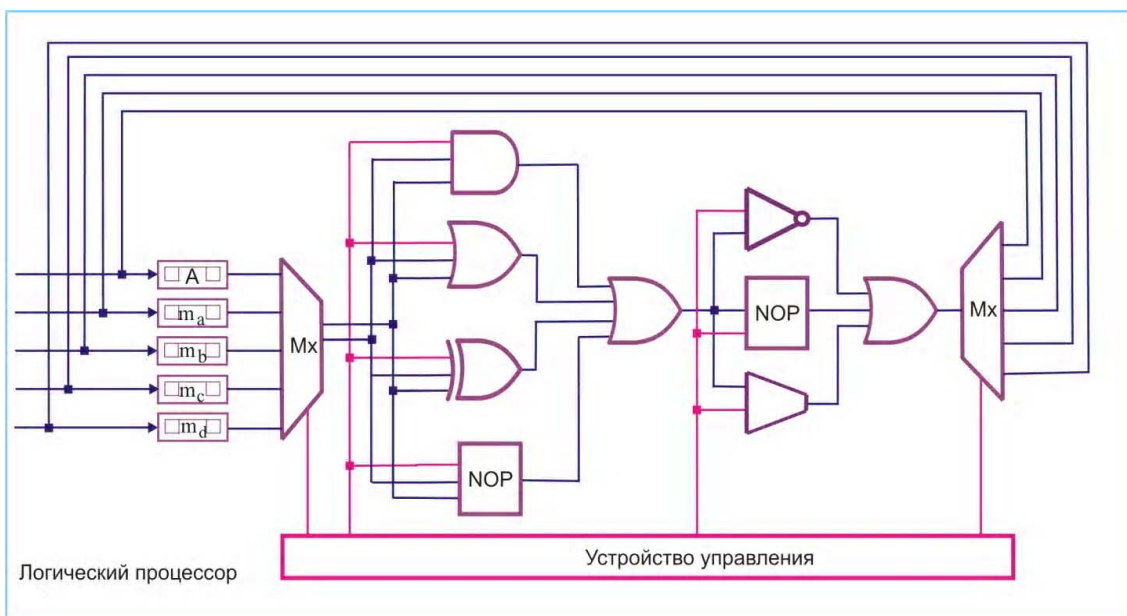


Рис. 8. Структура блока логических вычислений

Особенности реализации логического процессора заключаются в наличии трех бинарных (*and*, *or*, *xor*) и двух унарных (*not*, *slc*) операций. Последние можно присоединять к такту обработки регистровых данных, выбрав одну из трех операций *not*, *slc*, *nor* (нет операции). Для повышения эффективности работы логического устройства вводятся два элемента с пустой операцией. Если необходимо выполнить только унарную операцию, то на уровне

бинарных команд следует выбрать пор, что практически означает передачу данных через повторитель ко второму уровню унарных операций. Все операции в LP регистровые или регистрово-матричные. Последние предназначены для анализа вектор-строк таблицы при использовании входного m -вектора как запроса для точного поиска информации. В блоке логических вычислений допустимо следующее сочетание операций и операндов:

$$C = \begin{cases} \{m_a, m_b, m_c, m_d\} \Delta A_i; \\ \{m_a, m_b, m_c, m_d\} \Delta \{m_a, m_b, m_c, m_d\}; \\ \{\text{not}, \text{nop}, \text{slc}\} \{m_a, m_b, m_c, m_d, A_i\}. \end{cases}$$

$$\Delta = \{\text{and}, \text{or}, \text{xor}\}.$$

Реализация всех векторных операций блока логических вычислений, выполняемых с тактовой частотой 100 МГц, для одного УПУ в среде Verilog с последующей послесинтезной реализацией в кристалле программируемой логики Virtex 4, Xilinx содержит 2400 эквивалентных вентилях.

5. Инфраструктура векторно-логического анализа

Инфраструктура – совокупность моделей, методов и средств описания, анализа и синтеза структур данных для решения функциональных задач. Модель (системная) – совокупность взаимосвязанных, определенных в пространстве и времени компонентов с заданной адекватностью, описывающая процесс или явление и используемая для достижения поставленной цели при наличии ограничений и метрики оценивания качества решения. Здесь ограничения есть аппаратные затраты, время разработки и производства до появления изделия на рынке (time-to-market), подлежащие минимизации. Метрика оценивания решения при использовании модели определена двоичным логическим вектором в дискретном булевом пространстве. Концептуальная модель вычислительного изделия представлена совокупностью управляющего и операционного автоматов. В модели функциональности использована иерархическая технология создания цифровых систем с локальной синхронизацией отдельных модулей и одновременно глобальной асинхронностью функционирования всего устройства [13].

Для детализации структуры векторного процессора и УПУ далее рассмотрены аналитические и структурные процесс-модели, выполняющие анализ A -матрицы по столбцам или строкам. Первая из них представлена на рис. 9 и предназначена для определения множества допустимых решений относительно входного запроса m_b , вторая (рис. 10) осуществляет поиск оптимального решения на множестве строк, найденных с помощью первой модели в результате их анализа.

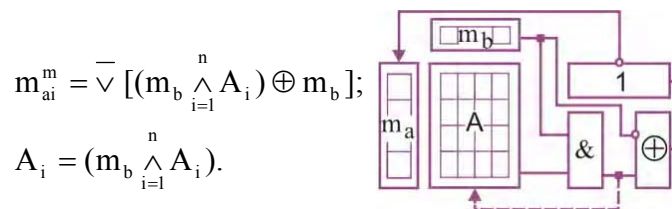


Рис. 9. Поиск всех допустимых решений

Возможно и самостоятельное применение второй модели, ориентированное на определение однозначного и многозначного решения при поиске дефектов в цифровой системе.

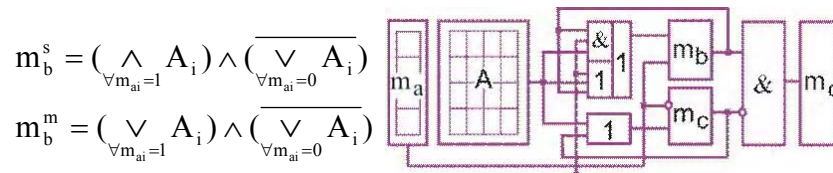


Рис. 10. Выбор оптимального решения

Все операции, выполняемые двумя процесс-моделями, векторные. Модель анализа строк (см. рис. 9) формирует вектор m_a идентификации допустимых $m_{ai} = 1$ или противоречивых $m_{ai} = 0$ решений относительно входного условия m_b за n тактов обработки всех

m -разрядных векторов таблицы $A = \text{card}(m \times n)$. Качество (допустимость) решения определяется для каждого взаимодействия входного вектора m_b и строки $A_i \in A$ на блоке (редукции) дизъюнкции. Матрица A может быть модифицирована ее пересечением с входным вектором на основе использования операции $A_i = (m_b \wedge A_i)$, если необходимо исключить из A -таблицы все незначимые для решения координаты и векторы, отмеченные единичными значениями вектора m_a .

Решение задач диагностирования посредством анализа строк таблицы (см. рис. 10) осуществляется так. После выполнения диагностического эксперимента формируется двоичный вектор экспериментальной проверки m_a , маскирующий A -таблицу неисправностей для поиска одиночных или кратных дефектов. Векторы m_b и m_c используются для накопления результатов выполнения операций конъюнкции и дизъюнкции. Затем выполняется логическое вычитание (xor-операция) из первого регистра m_b содержимого второго вектора m_c с последующей записью результата в регистр m_d . Для реализации второго уравнения, которое формирует множественное решение, элемент and заменяется функцией or. В схеме применяется также переменная выбора режима поиска решения: single или multiple. В качестве входного условия в модели использован вектор m_a , управляющий выбором векторной операции and, or для обработки единичных $A_i(m_{ai} = 1) \in A$ или нулевых $A_i(m_{ai} = 0) \in A$ строк A -таблицы. В результате выполнения n тактов осуществляется накопление единичных и нулевых относительно значений координат вектора m_a решений в регистрах A_1, A_0 . Априори в указанные регистры заносится вектор единиц и нулей: $A_1 = 1, A_0 = 0$. После обработки всех n строк A -таблицы за n тактов выполняется векторная конъюнкция содержимого регистра A_1 с инверсией регистра A_0 , которая формирует результат в виде вектора m_b , где единичные значения координат определяют решение. В таблице неисправностей цифрового изделия единичным координатам вектора m_b соответствуют столбцы, отождествляемые с номерами дефектов или неисправных блоков, подлежащих восстановлению или ремонту.

При сервисном обслуживании функциональных модулей можно на универсальной структуре системы векторного логического анализа решить оптимизационную задачу восстановления работоспособности. С помощью минимального числа ремонтных запасных строк и (или) столбцов, например, памяти необходимо обеспечить квазиоптимальное покрытие всех обнаруженных в ячейках неисправностей. Технологическая и математическая составляющие векторной логики в данном случае обуславливают простое схемотехническое решение для получения квазиоптимального покрытия (рис. 11), преимущества которого заключаются в следующем: 1. Вычислительная сложность процедуры: число векторных операций, равное числу строк таблицы, $Z = n$. 2. Минимум аппаратных затрат: таблица и два вектора (m_b, m_a) для хранения промежуточных покрытий и накопления результата в виде единичных координат, соответствующих строкам таблицы, которые составляют квазиоптимальное покрытие. 3. Отсутствие классического деления задачи покрытия на поиск ядра покрытия и дополнения. 4. Отсутствие сложных процедур манипулирования ячейками строк и столбцов. Получение не всегда оптимального покрытия – недостаток, который компенсируется технологичностью векторной процедуры, представленной на рис. 11.

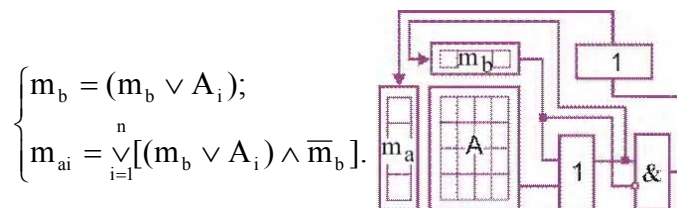


Рис. 11. Процесс-модель поиска квазиоптимального покрытия

Операция редукции, которая на последнем этапе превращает векторный результат в бит m_{ai} вектора m_a по функции $or\ m_{ai} = \vee[(m_b \vee A_i) \wedge \overline{m}_b]$. В общем случае операция редукции в алгебре векторных операций записывается в виде <бинарная операция><вектор>: $\vee A_i, \wedge m, \overline{\wedge}(m \vee A_i)$. Обратная процедура (векторизация) есть конкатенация булевых переменных: $m_a(a, b, c, d, e, f, g, h)$. В процедуре поиска покрытия априори векторы $m_b = 0, m_a = 0$ становятся равными. Квазиоптимальное покрытие накапливается за n тактов в векторе m_a последовательным сдвигом. Биты, заносимые в регистр m_a , формируются схемой or , которая выполняет редукцию после анализа полученного результата $[(m_b \vee A_i) \wedge \overline{m}_b]$ на наличие единиц.

Представляет интерес функциональная законченность цикла диагностирования, когда после получения квазиоптимального покрытия данная информация используется для восстановления работоспособности дефектных ячеек памяти [8]. Размерность модуля памяти (13x15 ячеек) не влияет на вычислительную сложность получения покрытия десяти дефектных ячеек с помощью резервных строк и столбцов (рис. 12).

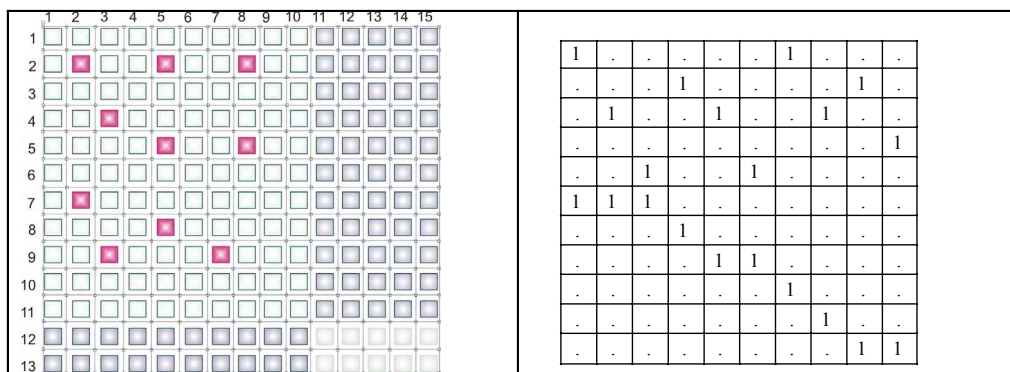


Рис. 12. Модуль памяти с резервом и таблица покрытия

Для решения оптимизационной задачи выполняется построение таблицы покрытия (см. рис. 12) неисправных ячеек, в которой строки – резервные ресурсы для покрытия дефектов ($C_2, C_3, C_5, C_7, C_8, C_2, R_2, R_4, R_5, R_7, R_8, R_9$), а столбцы – дефекты ячеек ($F_{2,2}, F_{2,5}, F_{2,8}, F_{4,3}, F_{5,5}, F_{5,8}, F_{7,2}, F_{8,5}, F_{9,3}, F_{9,7}$), подлежащие ремонту. При этом столбцы соответствуют координатам дефектных ячеек, а строки идентифицируют резервные компоненты (строки и столбцы), которые могут восстановить работоспособность неисправных координат. Модель вычислительного процесса, представленная на рис. 10, дает возможность получить оптимальное решение в виде $m_a = [1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$,

которому соответствует покрытие $R = \{C_2, C_3, C_5, C_7, C_8\}$, как одно из трех возможных минимальных решений

$$R = C_2, C_3, C_5, C_7, C_8 \vee C_2, C_3, C_5, C_8, R_9 \vee C_2, C_5, C_8, R_4, R_9$$

для таблицы неисправностей. Технологическая модель встроенного диагностирования и ремонта памяти (рис. 13) имеет четыре компонента: 1. Тестирование модуля (Unit Under Test (UUT)) с использованием эталонной модели (Model Under Test (MUT)) для формирования вектора экспериментальной проверки m_a , размерность которого соответствует числу тестовых наборов. 2. Поиск дефектов на основе анализа таблицы неисправностей A . 3. Оптимизация покрытия дефектных ячеек ремонтными строками и столбцами на основе анализа таблицы A . 4. Восстановление работоспособности памяти посредством замены адресов (Address Decoder (AD)) неисправных строк и столбцов, представленных вектором m_a , на адреса компонентов из ремонтного запаса (Spare Memory (SM)) [8].

Процесс-модель встроенного сервисного обслуживания работает в реальном масштабе времени и позволяет поддерживать в работоспособном состоянии, без вмешательства человека, цифровую систему на кристалле, что является целесообразным решением в

случае применения технологий, связанных с дистанционной эксплуатацией изделия. Предложенные процесс-модели анализа ассоциативных таблиц, а также введенные критерии качества логических решений позволяют решать задачи квазиоптимального покрытия, диагностирования дефектов программных и (или) аппаратных блоков. Модель векторных вычислений стала основой для разработки специализированной мультипроцессорной архитектуры, ориентированной на поиск, распознавание и принятие решений об использовании структур ассоциативных таблиц.

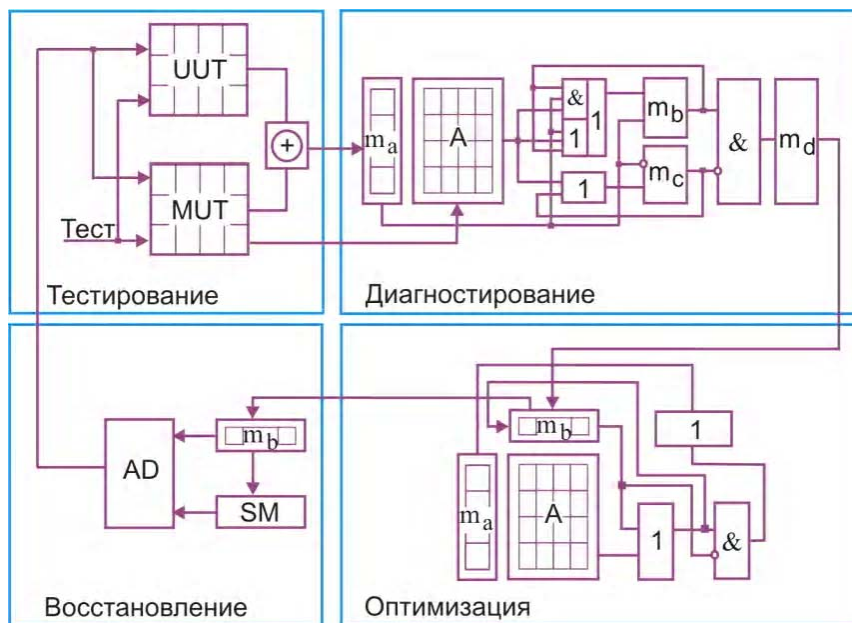


Рис. 13. Модель встроенного тестирования и восстановления памяти

Аналитическая оценка эффективности проектного решения, направленного на выполнение условий специализации S_p и стандартизации S_t (рис. 14) определяется минимумом среднего значения следующих трех взаимно противоречивых относительных и безразмерных параметров: уровень ошибок проекта L , время верификации и (или) тестирования T , программно-аппаратная избыточность, определяемая механизмами ассерций и (или) граничного сканирования H .

$$E = F(L, T, H) = \min\left[\frac{1}{3}(L + T + H)\right],$$

$$Y = (1 - P)^n;$$

$$L = 1 - Y^{(1-k)} = 1 - (1 - P)^{n(1-k)};$$

$$T = \frac{(1 - k) \times H^s}{H^s + H^a}; \quad H = \frac{H^a}{H^s + H^a}.$$

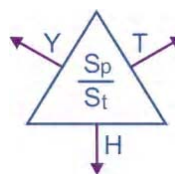


Рис. 14. Оценка эффективности процесс-модели

Параметр L , как дополнение к Y , характеризующему выход годной продукции, зависит от тестопригодности проекта k , вероятности P существования неисправных компонентов и числа необнаруженных ошибок n . Время верификации определяется тестопригодностью проекта k , умноженной на структурную сложность аппаратно-программной функциональности, отнесенной к общей сложности проекта в строках кода или эквивалентных вентилях. Программно-аппаратная избыточность находится в функциональной зависимости от сложности ассерционного кода или механизма граничного сканирования, отнесенной к общей сложности проекта. При этом ассерционная, или сканирующая, избыточность должна обеспечивать заданную глубину диагностирования ошибок функциональности за время выхода изделия на рынок, определенное заказчиком.

6. Выводы

Существующие программные аналоги не предлагают ассоциативно-логических технологий поиска, распознавания и принятия решений в дискретном информационном пространстве [4,5,15]. Практически все они используют универсальную систему команд современного дорогостоящего процессора с математическим сопроцессором. В то же время, аппаратные специализированные средства логического анализа, являющиеся их прототипами [1,6,7], как правило, ориентированы на побитовую или неекторную обработку информации. Предложенный новый подход векторно-логической обработки ассоциативных данных с полным исключением арифметических операций, влияющих на быстродействие и аппаратную сложность, может быть эффективно реализован на основе использования современной микроэлектронной аппаратуры в виде мультипроцессорной цифровой системы на кристалле. Фактическая реализация подхода основана на предложении моделей и методов, использующих общую идею векторно-логической метрики киберпространства:

1. Процесс-модели анализа ассоциативных таблиц, ориентирован на достижение высокого быстродействия анализа информационных объектов и подсчета критериев качества их взаимодействия на основе векторных логических операций для поиска, распознавания образов, принятия и оценивания решений в киберпространстве.

2. Метод параллельного решения ассоциативно-логических задач с минимальным числом векторных логических операций и полным исключением арифметических команд, что обеспечивает высокое быстродействие, минимальную стоимость и незначительное энергопотребление вычислителя, реализованного на кристалле программируемой логики.

3. Новые векторно-логические процесс-модели встроенного диагностирования цифровых систем на кристаллах, поиска квазиоптимального покрытия, использующие средства логического ассоциативного мультипроцессора, параллельные операции вычислительных процессов и векторно-логический критерий качества.

Практическая значимость полученных результатов подтверждена созданием встроенного компонента для диагностирования и восстановления работоспособности памяти в цифровой системе на кристалле. Дальнейшие исследования направлены на разработку прототипа логического ассоциативного мультипроцессора для решения актуальных задач поиска, распознавания и принятия решений с помощью векторного логического анализа.

Список литературы: 1. *Бондаренко М.Ф.* О мозгоподобных ЭВМ / М.Ф. Бондаренко, З.В. Дударь, И.А. Ефимова, В.А. Лещинский, С.Ю. Шабанов–Кушнаренко // Радиоэлектроника и информатика. Харьков: ХНУРЭ. 2004, № 2. С. 89–105. 2. *Cohen A.A.* Addressing architecture for Brain-like Massively Parallel Computers / Euromicro Symposium on Digital System Design (DSD'04). 2004. P. 594-597. 3. *Кузнецов О.П.* Быстрые процессы мозга и обработка образов // Новости искусственного интеллекта. 1998. №2. 4. *Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунев Б.Е.* Интеллектуальное управление динамическими системами. М.: Физико-математическая литература. 2000. 352 с. 5. *Луцаев В.В.* Программная инженерия. Методологические основы. Учебник. М.: Теис. 2006. 608 с. 6. А.С. №1439682. 22.07.88. Регистр сдвига / Какурин Н.Я., Хаханов В.И., Лобода В.Г., Какурина А.Н. 4с. 7. *Гайдук С.М., Хаханов В.И., Обризан В.И., Каменюка Е.А.* Сферический мультипроцессор PRUS для решения булевых уравнений // Радиоэлектроника и информатика. 2004. № 4(29). С.107-116. 8. *Хаханов В.И.* Проектирование и тестирование цифровых систем на кристаллах / В.И. Хаханов, Е.И. Литвинова, О.А. Гузь. Харьков: ХНУРЭ, 2009. 484с. 9. *Хаханов В.И.* Проектирование и верификация цифровых систем на кристаллах / В.И. Хаханов, И.В. Хаханова, Е.И. Литвинова, О.А. Гузь. Харьков: Новое слово. 2010. 528с. 10. *Акритас А.* Основы компьютерной алгебры с приложениями: Пер. с англ. / А. Акритас. М.: Мир. 1994. 544 с. 11. *Аттетков А.В.* Методы оптимизации / А.В. Аттетков, С.В. Галкин, В.С. Зарубин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2003. 440 с. 12. *Abramovici M.* Digital System Testing and Testable Design / M. Abramovici, M.A. Breuer and A.D. Friedman. Comp. Sc. Press, 1998. 652 p. 13. *Densmore D.* A Platform-Based taxonomy for ESL Design / Douglas Densmore, Roberto Passerone, Alberto Sangiovanni–Vincentelli // Design & Test of computers. 2006. P. 359–373. 14. *Автоматизация* диагностирования электронных устройств / Ю.В. Малышенко и др. / Под ред. В.П. Чипулиса. М.: Энергоатомиздат, 1986. 216с. 15. *Трахтенгерц Э.А.* Компьютерные методы реализации экономических и информационных управленческих решений. СИНТЕГ, 2009. 396с.

Поступила в редколлегию 11.01.2013

Гайдук Стенли, президент компании Aldec Inc, США. Научные интересы: проектирование цифровых систем. Адрес: 2260 Corporate Circle, Henderson, NV 89074, USA.

Хаханов Владимир Иванович, д-р техн. наук, декан факультета КИУ, профессор кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых систем, сетей и программных продуктов. Увлечения: баскетбол, футбол, горные лыжи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua.

УТОЧНЁННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛУЧАЙНОЙ ПОДСТАНОВКИ

Осуждаются подходы к отбору случайных подстановок, основанные на применении системы критериев, построенных с использованием оценок близости законов распределения XOR таблиц и смещений таблиц линейных аппроксимаций подстановок теоретическим законам. Отмечается их неконструктивность. Излагается сущность методики определения законов распределения максимумов для больших по объёму выборок независимых одинаково распределённых случайных величин. Методика применяется для определения распределений максимумов XOR таблиц и смещений таблиц линейных аппроксимаций выборки из байтовых подстановок. На основе полученных результатов предлагается уточнённое определение случайной подстановки, строящееся на свойствах выборки случайных подстановок.

1. Введение

Самые современные традиционные ключевые криптосистемы базируются на идее произведения (product) шифров, которые представляют класс криптосистем, многократно повторяющих сложную операцию, отображающую плейнтекст в шифртекст. Каждое такое повторение (итерация) известно как цикл шифра. Сложная (составная) операция, выполняющаяся в каждом цикле, является обычно комбинацией из набора примитивных операций, таких как сдвиг, линейное преобразование, модульное сложение и подстановка. В частности, комбинация перестановочных и подстановочных операций может привести к криптографически сильному нелинейному преобразованию, если оно применяется достаточное количество раз. Подстановочные операции во многих шифрах выступают при этом как основной нелинейный элемент циклового преобразования (нелинейный элемент замены). Поэтому значительные усилия исследователей направлены на изучение подходов к построению подстановок с высокими криптографическими показателями.

Сегодня наиболее разработанным и наиболее популярным математическим аппаратом оценки криптографических свойств нелинейных элементов замены (S-блоков) стал аппарат линейной алгебры и в частности аппарат булевых функций. Его развитию и применению посвящено много публикаций. Предложено и используется множество критериев и показателей оценки свойств как самих булевых (компонентных) функций S-блоков, так и критериев и показателей криптографических свойств S-блоков в целом. В их числе такие как: сбалансированность булевой функции, нелинейность N_f , корреляционный иммунитет, критерий распространения (строгий лавинный критерий) $KP(k)$, алгебраическая степень булевой функции $\deg(f)$, а также соответствующие характеристики S-блоков: критерий битовой независимости (BIC), критерий нелинейности, максимальный порядок строгого лавинного критерия (MOSAC), максимальное значение линейной аппроксимационной таблицы-LAT, δ -гладкость (равномерность) XOR-таблицы S-блока и многие другие.

Следует отметить также предложенный в свое время подход к отбору подстановок [1-3], строящийся на основе оценки показателей их случайности (значений числа циклов, возрастаний и инверсий), дополненных ограничениями на максимально допустимые значения таблиц дифференциальных разностей и линейных аппроксимаций.

Этот подход нашел продолжение в работах [4,5], выполненных, в том числе, и с участием авторов данной работы. Основное внимание в этих публикациях сосредоточилось на разработке дополнительных критериев отбора случайных подстановок, построенных на использовании законов распределения переходов XOR таблиц и смещений таблиц линейных аппроксимаций случайных подстановок. Было предложено два дополнительных (к комбинаторным) критерия отбора, основанных на оценке близости дифференциальных и линейных законов распределения вероятностей подстановок к теоретически полученным законам [5]. Напомним здесь кратко их сущность.

Критерий 1. Подстановка удовлетворяет критерию случайности 4, если закон распределения одноптипных переходов $\Pr(\Lambda_{\pi}(\Delta X, \Delta Y) = 2k)$, $k = 0, 1, \dots, k^*$ её таблицы XOR разностей для входов, приписываемых к ненулевым характеристикам, соответствует по критерию согласия Колмогорова теоретическому закону распределения переходов случайной подстановки, т.е. наибольшее значение модуля разности теоретического и эмпирического законов распределения вероятностей удовлетворяет условию $F_T(x_k) - F(x_k)S \leq b$.

Здесь граничный параметр b подлежит уточнению по результатам экспериментов.

Критерий 2. Подстановка удовлетворяет критерию случайности 5, если закон распределения одноптипных переходов $\Pr(\lambda^*(\alpha, \beta) = 2k)$, $k = 0, 1, \dots, k^*$ её таблицы линейных аппроксимаций соответствует по критерию согласия Колмогорова теоретическому закону распределения переходов случайной подстановки, т.е. наибольшее значение модуля разности теоретического и эмпирического законов распределения вероятностей удовлетворяет условию $F_T(x_k) - F(x_k)S \leq c$.

Здесь параметр c также подлежит уточнению по результатам экспериментов.

В работе [6] были рассмотрены вопросы установления границ при использовании критерия Колмогорова для оценки близости законов распределения переходов дифференциальных и линейных таблиц подстановок теоретическим (мы их назвали Италонными I), на основе результатов которых принимается решение – можно ли отнести проверяемую подстановку к случайной или нет.

Ожидалось, что подстановки, отобранные по предлагаемой системе критериев, окажутся более предпочтительными, чем известные конструкции. Однако, с одной стороны, формируемые в этом случае подстановки, как показал анализ, не имеют заметных преимуществ по сравнению с известными, а с другой - применение представленных выше критериев для практического отбора случайных подстановок встретило определённые затруднения, так как не ясной стала сама стратегия применения этих критериев. Вроде бы мы порождаем случайные подстановки, а потом начинаем их фильтровать. Не ясно, какие же показатели отбора являются предпочтительными.

В этой работе мы хотим изменить позицию к определению показателей случайности. Мы хотим ответить на вопросы, а какими свойствами будет обладать выборка случайно порождаемых подстановок? С какими подстановками в этом случае реально мы имеем дело? Как они соотносятся с приведенными критериями отбора?

Здесь будут изучаться показатели последовательности случайных подстановок, порождаемых случайным генератором. Итогом их изучения станет усовершенствованная модель случайной подстановки, отличающаяся от известных использованием свойств выборки случайных подстановок, что позволило существенно упростить правила отбора случайных подстановок (а практически использовать подстановки, порождаемые генератором случайных подстановок без каких-либо ограничений).

Задача практически сводится к определению законов распределения выборки, составленной из максимумов таблиц XOR разностей и максимумов смещений таблиц линейных аппроксимаций случайных подстановок.

Математические аспекты этой задачи рассмотрены в приложении работы [7]. В ней изучаются случаи, когда все значения выборки имеют одно и то же распределение и их плотности уменьшаются с ростом переменной x экспоненциально. Но это как раз и есть наши случаи.

2. Сущность методики определения законов распределения максимумов для больших по объёму выборок независимых одинаково распределённых случайных величин

Нас интересуют два случая.

1-й случай, когда выборка состоит из случайных значений переходов XOR таблицы случайной подстановки. Как известно [8], в этом случае закон распределения вероятностей переходов подчиняется Пуассоновскому закону:

$$\Pr(\Lambda_{\pi}(\Delta X, \Delta Y) = 2k) = e^{-1/2} \cdot \frac{1}{2^k \cdot k!} \quad (1)$$

Здесь $\Pr(\Lambda_\pi(\Delta X, \Delta Y) = 2k)$ – вероятность, что значение дифференциальной таблицы случайно взятой подстановки p порядка 2^n для перехода входной разности ΔX в соответствующую выходную разность ΔY будет равно $2k$.

2-й случай, когда выборка состоит из случайных значений, являющихся смещениями таблиц линейных аппроксимаций случайных подстановок, подчиняющихся нормальному закону распределения. Как показано в [7], в этом случае справедливо.

Утверждение. Для случайной n -битовой подстановки, с $n \geq 5$ дисбаланс $\text{Imb}(v, u)$ аппроксимации является случайным значением с распределением, которое может быть аппроксимировано в виде

$$\Pr(\text{Imb}(v, u) = z) \approx 2Z\left(\frac{z}{2^{(n-2)/2}}\right) \quad (2)$$

для z четного и ноль для z нечетного.

В наших обозначениях дисбаланс $\text{Imb}(v, u) = z$ при $z = 2k$ как раз соответствует значению смещения таблицы линейных аппроксимаций.

В работе [7] отмечается, что распределение максимумов больших по объёму выборок независимых одинаково распределённых случайных величин хорошо изучено в теории вероятностей и описывается распределением экстремальных значений Фишера-Типпета или log-Вейбула в виде:

$$D_{\max}(X) \approx e^{-e^{-\frac{a-X}{b}}}$$

Это распределение имеет математическое ожидание $\mu(X) = a + b\gamma$ с $\gamma \approx 0,58$ и среднеквадратическое отклонение $\frac{\pi}{\sqrt{6}}b \approx 1,3b$. Параметр a является решением уравнения

$$\ln(2)Y = f(x), \quad (3)$$

a и b – единицей, делённой на производную функции $f(x)$ в точке a (здесь используется линейная аппроксимация функции $f(x)$ в точке a).

В работе [7] также показано, что решение уравнения (3) для выборки из 2^Y случайных значений, распределённых по Пуассоновскому закону, имеет вид

$$i = \frac{\ln(2)y - \frac{1}{2}\ln(2\pi) - \lambda}{\ln\left(\frac{i}{\lambda}\right) - 1} \quad (4)$$

Это уравнение может быть решено итеративно. Производная $f(i)$ вычисляется по формуле:

$$\ln\left(\frac{i}{\lambda}\right) + \frac{1}{2i} \quad (5)$$

Определяя a и используя условие $a \gg \lambda$, имеем: $b = \frac{1}{\ln\left(\frac{a}{\lambda}\right)}$.

Для нормального распределения (2) параметр, a_s (подстрочный индекс s для стандарта) является решением уравнения

$$a_s = \sqrt{2\ln(2)y - \ln(2\pi) - 2\ln(a_s)}, \quad (6)$$

которое может быть найдено итеративным путём, не обращая внимания на правый член в первой итерации. Производная $f(x)$ определяется по формуле:

$$x + \frac{1}{x} \quad (7)$$

и, следовательно,

$$b_s = \frac{a_s}{a_s^2 + 1} \approx \frac{1}{a_s} \quad (8)$$

Грубо говоря, максимум имеет распределение со средним значением $1,17\sqrt{y}$ и стандартным отклонением $1,11/\sqrt{y}$. Авторы работы [7] отмечают, что можно найти значения a и b для любого нормального распределения со средним значением $\mu(X)$ и стандартным отклонением σ , заменив x на $\frac{X - \mu(X)}{\sigma}$. Это дает:

$$a = \sigma a_s + \mu(X), \quad b = \sigma b_s \quad (9)$$

3. Распределение максимумов XOR таблиц и смещений таблиц линейных аппроксимаций выборки из байтовых подстановок

Будем рассматривать выборку размера 2^n , $n = 8$. Для $n = 8$ из (4) имеем (табл.1).

Таблица 1

i	$\frac{\ln(2) \cdot 16 - \frac{1}{2} \ln(2\pi i) - \frac{1}{2}}{\ln(2i) - 1}$
5	6,8
5,5	6,3
5,9	5,98
6	5,9
7	5,3

И, следовательно, решением уравнения (4) является значение $i = a$, близкое к числу 6.

Соответственно $b = \frac{1}{\ln(12)} = 0,4$. Но заметим, что формула (4), по которой мы определяли

значение a , работает с половинным значением перехода дифференциальной таблицы. Поэтому при подсчёте действительного среднего значения мы должны полученный результат удвоить.

И тогда $\mu(X) = 2 \cdot 6 + 2 \cdot 0,4 \cdot 0,58 = 12,4$.

Если ориентироваться на результаты реального эксперимента, то среднее значение максимума должно быть близким к 11,55. Поэтому скорректируем наше значение до $a = 5$.

Это значение хорошо согласуется с результатами расчётов и экспериментов, представленных в работе [9].

Выше отмечалось, что поскольку распределение максимумов дискретное, то малая величина стандартного отклонения $b = \frac{1}{\ln(12)} = 0,4$ приводит к тому, что распределение

сосредоточено в двух целочисленных значениях вблизи $\mu(X) \approx 2a$. В наших экспериментах с байтовыми подстановками это два значения: 10 и 12.

Далее расчёт предлагается вести по распределению

$$D_{\max}(X) \approx e^{-e^{\frac{10-2 \cdot X}{0,87}}}, \quad (10)$$

в котором использовано значение $a = 5$ (формула записана с учётом реального удвоения значений переходов XOR таблицы).

В табл. 2 приводим распределение значений максимумов для 256 битовых подстановок, рассчитанных по выражению (10), и результаты эксперимента.

Таблица 2

$k^* (X_1, X_2)$	$Pr(k^*)$	Расчётное значение	Эксперимент
8	0,00004	0,01	0
10 (10,8)	$0,368 - 0,00004 = 0,368$	94	92
12 (12,10)	$0,905 - 0,368 = 0,537$	137	147
14 (14, 12)	$0,9901 - 0,905 = 0,008$	22	14
16 (16,14)	$0,9967 - 0,9901 = 0,0066$	1,71	3
18 (18,16)	$0,9999 - 0,9967 = 0,0032$	0,819	0

В табл. 3 представлены результаты решения уравнения (5) способом подбора. Для ориентировочного выбора начальных значений, используемых в переборе, вполне можно опираться на результаты расчётов и экспериментов, приведенных в работе [9].

Таблица 3

a_s	$\sqrt{\ln(2)32 - \ln(2\pi) - 2 \ln(a_s)}$
4	4,19
5	4,13
6	4,09
8	4

Мы и в этом случае сделали небольшую коррекцию результата, ориентируясь на данные экспериментов. В качестве значения a_s рассматривалось значение $a_s = 4$ и соответственно

$$b_s = \frac{a_s}{a_s^2 + 1} \approx \frac{1}{a_s} = \frac{1}{4} = 0,25 \quad (11)$$

(здесь уже учитываем результаты выполненных экспериментов, представленных в табл.

3). Для подстановок степени 2^8 имеем $\sigma = 2^{\frac{8-4}{2}} = 2^2$ и тогда $a = \sigma a_s + \mu(X) = 4 \cdot 4 + 0 = 16$ и в соответствии с (9) $b = 4 \cdot 0,25 = 1$. Приходим к интегральному закону распределения максимумов полных дифференциалов уменьшенной 16-битной модели шифра в виде:

$$D_{\max}(X) \approx e^{-e^{\frac{16-X}{1}}}, \quad (12)$$

или с учётом реального удвоения результатов смещений таблицы линейных аппроксимаций

$$D_{\max}(X) \approx e^{-e^{\frac{32-X}{2}}}. \quad (13)$$

В табл. 4 представлены результаты расчётов по определению распределения значений максимумов линейных корпусов на основе интегрального закона распределения вероятностей (13).

Заметим, что по результатам ранее выполненной теоретической и экспериментальной оценки значения максимума смещения линейной аппроксимационной таблицы случайной подстановки степени 2^8 равно 32 (расчёт) и 34 (эксперимент) [10].

Видно, что и в этом случае результаты экспериментов практически повторяют результаты расчётов.

Самое интересное, как показали эксперименты, именно случайные подстановки, полученные без всяких ограничений, с очень большой вероятностью оказались подходящими с точки зрения криптографических приложений. Они позволили обеспечить динамические показатели выхода шифров с сильным линейным преобразованием к асимптотическим

показателям случайных подстановок, не уступающие считающимся лучшими (отобранными по специальным методикам) S-блокам практически всех современных шифров [11].

Таблица 4

$k^* (X_1, X_2)$	$Pr(k^*)$	Число значений	Эксперимент
< 26	$3.41 \cdot 10^{-7}$	0	0
28 (28,26)	$5,6 \cdot 10^{-4} - 3,41 \cdot 10^{-7} = 5,6 \cdot 10^{-4}$	0,14	0
30 (30,28)	$0,064 - 5,6 \cdot 10^{-4} = 0,0638$	16	10
32 (32,30)	$0,368 - 0,064 = 0,304$	78	86
34 (34,32)	$0,692 - 0,304 = 0,388$	99	98
36 (36,34)	$0,874 - 0,692 = 0,181$	46	46
38(38,36)	$0,9518 - 0,874 = 0,078$	19	10
40 (40,38)	$0,9821 - 0,9518 = 0,03$	8	6
42 (42,40)	$0,9933 - 0,9821 = 0,011$	3	0
44 (44,42)	$0,9975 - 0,9973 = 0,00028$	0,07	0

Подводя итог приведенным соображениям, можно теперь в соответствии с представленными результатами ввести и более практичное определение случайной подстановки.

В частности, байтовая подстановка является случайной, если:

1) значение максимума её XOR таблицы равняется 10,12;

2) значения максимумов смещений её таблицы линейных аппроксимаций находятся в диапазоне 32-38.

Этими определениями мы уточняем критерии 4 и 5, введенные ранее. Уточнение касается наложения (выполнение) ограничений лишь на максимальные значения переходов XOR таблиц и смещений таблиц линейных аппроксимаций.

Выводы

Результатом выполненных исследований является уточнённое определение случайной подстановки (уточнённая математическая модель случайной подстановки), строящееся на свойствах выборки из случайных подстановок. Теперь появилось полное понимание того, с какими подстановками мы имеем дело при их случайном формировании. Как оказалось, с очень большой вероятностью мы будем получать подстановки, для которых значения максимумов дифференциальных таблиц и значения максимумов смещений таблиц линейных аппроксимаций принимают существенно ограниченное число возможных значений. Все они концентрируются вокруг теоретических значений максимумов случайных подстановок соответствующей степени.

Как показывают эксперименты [11], случайные подстановки, взятые с выхода генератора случайных подстановок без всяких ограничений, вполне могут конкурировать с лучшими известными конструкциями S-блоков, используемыми в современных шифрах.

Список литературы: 1. Лисицкая И.В. К вопросу построения долговременных ключей для алгоритма ГОСТ 28147-89 // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 1997. № 3. С. 54-57. 2. Lysytska I.V., Koriak A.S., Golovashich S.A., Oleshko O.I., Oleinik R.V. The selection criteria of random substitution tables for symmetric enciphering algorithms // Abstracts of XXVIth General Assembly. Toronto, Ontario Canada, August 13-21, 1999. P. 204. 3. Горбенко И.Д., Лисицкая И.В. Критерии отбора случайных таблиц подстановок для алгоритма шифрования по ГОСТ 28147-89 // Радиотехника. 1997. Вып 103. С. 121-130. 4. Лисицкая И.В. Оценка числа случайных подстановок с заданным распределением парных разностей XOR таблиц и смещений таблиц линейных аппроксимаций. / И.В. Лисицкая, А.В. Широков, Е.Д. Мельничук, К.Е. Лисицкий // Прикладная радиоэлектроника. Харьков: ХНУРЭ. 2010. Т. 9, № 3. С. 341-345. 5. Долгов В.И. Случайные подстановки в криптографии. / В.И. Долгов, И.В. Лисицкая, К.Е. Лисицкий // Радиоэлектронні та комп'ютерні системи. 2010. № 5 (46). С. 79-85. 6. Лисицкая И.В. Экспериментальная проверка работоспособности новых критериев отбора случайных подстановок / И.В. Лисицкая, К.Е. Лисицкий, А.В. Широков, Е.Д. Мельничук // Радиоэлектронні та комп'ютерні системи, 2010. № 6 (47). С. 87-93. 7. Joan Daemen, Vincent Rijmen. Probability distributions of Correlation and Differentials in Block Ciphers. / Joan Daemen, Vincent Rijmen // April 13, 2006. P. 1-38. 8. Лисицкая И.В. Свойства законов распределения XOR таблиц и таблиц линейных аппроксимаций случайных подстано-

вок // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. 2011. №960. Вип. 16. С. 196-206. **9.** Олейников Р.В. Дифференциальные свойства подстановок / Р.В. Олейников, О.И. Олешко, К.Е. Лисицкий, А.Д. Тевяшев. // Прикладная радиоэлектроника. 2010. Т.9, № 3. С. 326-333. **10.** Долгов В.И. Свойства таблиц линейных аппроксимаций случайных подстановок. / В.И. Долгов, И.В. Лисицкая, О.И. Олешко. // Прикладная радиоэлектроника. Харьков: ХНУРЭ. 2010. Т. 9, № 3. С. 334-340. **11.** Долгов В.И. S-блоки для современных шифров. / В.И. Долгов, Е.В. Мельничук // Радиотехника. 2012. Вып.171. С. 121-133.

Поступила в редколлегию 16.01.2013

Лисицкий Константин Евгеньевич, студент группы БИКС-10-1 ХНУРЭ, Научные интересы: технологии блочного симметричного шифрования, методы криптоанализа. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Тобольская, 37, кв. 5, тел. 0633201270, e-mail: konstantin.lisickiy@mail.ru

Мельничук Евгений Дмитриевич, аспирант кафедры БИТ ХНУРЕ. Научные интересы: технологии блочного симметричного шифрования, методы криптоанализа. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. 23 Августа, 6, кв. 44, телефон. 0673005605. E-mail: goabove1970@gmail.com.

УДК 519.713

А.Н. ЗИАРМАНД

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СУТЬ ПРОЕКТА «SMART ROADS»

Идеей создания такого проекта послужило то, что в Украине, а также во многих других странах мира существующая система управления дорожным движением явно не соответствует темпу роста количества автомобилей и пешеходов. Анализируется ситуация, предлагаются возможные пути решения указанной проблемы. Применение современных IT-технологий и программно-аппаратных средств для улучшения и создания новой инфраструктуры дорожного движения ставится как приоритетная задача проекта.

1. Введение

Актуальность исследования. В настоящее время в мире насчитывается более 150-ти проектов по автоматизации дорожного движения. Основной недостаток их в том, что эти проекты имеют разрозненный характер. Существуют отдельные варианты реализаций с ограниченными возможностями. Отсутствует система, объединяющая несколько технологий и способная решать сразу несколько глобальных задач. Новая идея, заложенная в данном проекте, способна не только решать описанные выше существующие проблемы в системе управления движением, но и предоставит уникальные возможности для всех участников дорожного движения, открыв перспективу в разработке программно-аппаратных комплексов для развития инфраструктуры мегаполисов. Интерес представляет использование кардинально новых способов управления и внедрение инноваций в процесс контроля движения. Реализация решения рассматриваемой проблемы высоко востребована, так как наблюдается острая необходимость в изменении системы мониторинга и управления дорожным движением, а также есть растущий спрос на IT-технологии в бортовых устройствах машин. Уникальностью проекта есть сочетание современных IT-технологий, математических моделей и аппаратно-технических средств в единой целостной системе.

Цель исследования. Приоритетной задачей на этапе создания системы является поиск близкого к идеальному способу перенаправления трафика в целях оптимизации пропускной способности современных дорог. Ключевым аспектом становится развертка инфраструктуры интеллектуального взаимодействия всех узлов системы «Smart Roads». Стремления разработчиков системы направлены в первую очередь на улучшение загруженности дорог, повышение безопасности дорожного движения, а также предоставление дополнительных сервисов, которые облегчат и повысят удобство пользования автомобилем. Стимулом ставится возможность экономии затрат на ГСМ при внедрении системы, экономии на ресурсах по техническому обслуживанию транспортных средств, сокращение времени

вок // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. 2011. №960. Вип. 16. С. 196-206. **9.** Олейников Р.В. Дифференциальные свойства подстановок / Р.В. Олейников, О.И. Олешко, К.Е. Лисицкий, А.Д. Тевяшев. // Прикладная радиоэлектроника. 2010. Т.9, № 3. С. 326-333. **10.** Долгов В.И. Свойства таблиц линейных аппроксимаций случайных подстановок. / В.И. Долгов, И.В. Лисицкая, О.И. Олешко. // Прикладная радиоэлектроника. Харьков: ХНУРЭ. 2010. Т. 9, № 3. С. 334-340. **11.** Долгов В.И. S-блоки для современных шифров. / В.И. Долгов, Е.В. Мельничук // Радиотехника. 2012. Вып.171. С. 121-133.

Поступила в редколлегию 16.01.2013

Лисицкий Константин Евгеньевич, студент группы БИКС-10-1 ХНУРЭ, Научные интересы: технологии блочного симметричного шифрования, методы криптоанализа. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Тобольская, 37, кв. 5, тел. 0633201270, e-mail: konstantin.lisickiy@mail.ru

Мельничук Евгений Дмитриевич, аспирант кафедры БИТ ХНУРЕ. Научные интересы: технологии блочного симметричного шифрования, методы криптоанализа. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. 23 Августа, 6, кв. 44, телефон. 0673005605. E-mail: goabove1970@gmail.com.

УДК 519.713

А.Н. ЗИАРМАНД

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СУТЬ ПРОЕКТА «SMART ROADS»

Идеей создания такого проекта послужило то, что в Украине, а также во многих других странах мира существующая система управления дорожным движением явно не соответствует темпу роста количества автомобилей и пешеходов. Анализируется ситуация, предлагаются возможные пути решения указанной проблемы. Применение современных IT-технологий и программно-аппаратных средств для улучшения и создания новой инфраструктуры дорожного движения ставится как приоритетная задача проекта.

1. Введение

Актуальность исследования. В настоящее время в мире насчитывается более 150-ти проектов по автоматизации дорожного движения. Основной недостаток их в том, что эти проекты имеют разрозненный характер. Существуют отдельные варианты реализаций с ограниченными возможностями. Отсутствует система, объединяющая несколько технологий и способная решать сразу несколько глобальных задач. Новая идея, заложенная в данном проекте, способна не только решать описанные выше существующие проблемы в системе управления движением, но и предоставит уникальные возможности для всех участников дорожного движения, открыв перспективу в разработке программно-аппаратных комплексов для развития инфраструктуры мегаполисов. Интерес представляет использование кардинально новых способов управления и внедрение инноваций в процесс контроля движения. Реализация решения рассматриваемой проблемы высоко востребована, так как наблюдается острая необходимость в изменении системы мониторинга и управления дорожным движением, а также есть растущий спрос на IT-технологии в бортовых устройствах машин. Уникальностью проекта есть сочетание современных IT-технологий, математических моделей и аппаратно-технических средств в единой целостной системе.

Цель исследования. Приоритетной задачей на этапе создания системы является поиск близкого к идеальному способу перенаправления трафика в целях оптимизации пропускной способности современных дорог. Ключевым аспектом становится развертка инфраструктуры интеллектуального взаимодействия всех узлов системы «Smart Roads». Стремления разработчиков системы направлены в первую очередь на улучшение загруженности дорог, повышение безопасности дорожного движения, а также предоставление дополнительных сервисов, которые облегчат и повысят удобство пользования автомобилем. Стимулом ставится возможность экономии затрат на ГСМ при внедрении системы, экономии на ресурсах по техническому обслуживанию транспортных средств, сокращение времени

простоя в пробках, повышение оперативности доставки грузов и предоставление экстренных услуг.

Задачи исследования. Для определения круга задач и поиска конкурентных реализаций по проблематике исследования проводится аналитический обзор существующих моделей мониторинга транспорта в разных странах. Требуется проанализировать методы и технологии на основе литературных/интернет источников в целях выявления преимуществ или недостатков в различных системах. Поиск и сравнение практических применений IT-технологий в сфере управления трафиком помогут определить задачу проекта. Сформулировав требования, которые нужны для достижения поставленной цели, и базируясь на теоретических алгоритмах, можно создать схему работы системы и начать программную реализацию. Доведение до стадии прототипа будет означать успешное выполнение планируемой задачи.

2. Основная часть

Для описания реализации поставленных задач нужно определить составляющие системы и её устройство, а также необходимые средства для внедрения. Предлагаемый проект состоит из системы взаимодействия между бортовым устройством автомобиля, точками контроля трафика (они же «умные светофоры») и облачным сервисом в глобальной сети Интернет.

Модель функционирования системы. Глобально систему «SMART ROADS» можно представить следующим образом.

– Все автомобили, проезжающие на территории работы системы (область, страна, регион), снабжаются меткой определённого образца, которая является электронным паспортом транспортного средства.

– Участки дороги, где расположены светофоры и электронные табло со стрелками, предлагается снабдить дополнительным оборудованием, входящим в комплекс решения «Умный светофор», которое включает в себя датчики, сканирующие в режиме реального времени метки проезжающих автомобилей, а также антенны для мультисканальной передачи данных облачному сервису.

– Центральный сервер сбора и обработки данных получает данные от облачного сервиса, анализируя информацию, предоставляет её в онлайн режиме картографической системе в глобальной сети Интернет, а также ведёт обратную связь с точками контроля дорожного движения системы «Умный светофор». Таких серверов будет большое количество, они будут представлять собой массив рассредоточенной системы обработки данных. Таким образом, предполагается, что вычислительная нагрузка распределяется равномерно между серверами.

Инновации:

1. Умный светофор переключается в зависимости от трафика, а не по таймингу как в существующих системах дорожного движения.

2. Карты для устройств работают в режиме реального времени и отображают онлайн ситуацию.

3. Используется мультисканальный способ передачи данных.

Рассмотрим более подробно каждую из технологий.

Решение «Умный светофор» («Smart light»). Основным регулятором дорожного движения в актуальной системе Украины является управление посредством светофоров, знаков и разметки согласно ПДД. Если исключить статические формы контроля, то светофор остается единственным регулятором потока автомобилей и пешеходов, который динамически способен изменять показания световых приборов. Однако такой способ имеет ряд серьезных проблем и является устаревающим.

Согласно наблюдениям, интенсивность движения автомобилей может меняться в зависимости от времени суток, времени года, разных участков дороги, праздничных или выходных дней, изменяющегося состояния дорожного покрытия, погодных условий в населенном пункте, наличия ДТП на участках дорог, разница есть даже в зависимости от города (столица, регион, приграничный город, курорт).

Классическая схема работы светофора обычного типа может быть описана следующим образом: есть световое устройство, содержащее микроконтроллер, который имеет

жестко запрограммированную логику переключения состояний предупреждающего, запрещающего или разрешающего индикаторов света. Насчитываются разные конфигурации, иногда бывает включено т.н. «ручное» управление, также могут иметь место дополнительные индикаторы, однако в целом смысл один и тот же.

Как правило, математическая схема работы обычного светофора основана на переключении состояний по заранее заданному временному интервалу. Но всегда ли хорошо иметь константные «тайминги» в системе? Вопрос философский. Мы живём в эпоху динамического мира, где изменения на бирже в одной стране могут послужить резким скачком курса валюты другой страны и даже чередой финансово-кадровых манипуляций в третьей стране. Успешное и правильное выполнение проекта архитектором поможет быстрее внедрить его начальником и получить больше прибыли. «Баги» в коде программиста создают сбои во времени в связи с внезапной необходимостью в отладке и задержке в выходе на рынок программного продукта. Всего одна ошибка диспетчера «MacDrive» в McDonald's способна создать очередь из 5-ти автомобилей и затруднить движение на парковке. Очевидным является переход от константного управления к более рациональному и жизнеспособному динамическому решению в сфере управления потоком трафика.

Обоснование эффективности. Преимущества применения системы «Умного светофора» наглядно продемонстрируем на примерах в условиях реальной жизни.

В таком большом городе, как Москва, есть не один перекрёсток, где время работы зеленого света светофора не превышает 12 секунд. Обычные люди, не говоря уже о пожилых и детях, не успевают переходить дорогу за столь короткое время. При этом в мегаполисе по типу Лондона водители жалуются на чрезмерно большой интервал запрещающего сигнала светофора на участках, где приоритет для пешеходов выше требуемого. В городах Италии, Франции, Греции, где исторически улицы очень тесные и запутанные, необходим подход, противоположный тому, что есть в США, где авеню в кварталах зачастую под прямыми углами друг к другу. В Украине, в том числе Харькове и Киеве, к примеру, почти нет подземных паркингов, поэтому оставленные на обочине автомобили, особенно в дневное время, сокращают эффективное место проезжей части, осложняя движение в городах, и без того усугублённое нерациональной и слабо согласованной работой светофоров.

При этом везде практически не учитывается ширина проезжей части, общая длина зебры вместе с островками безопасности, наличие больниц или школ вблизи, наличие наземных и подземных пешеходных переходов и мостиков и ряд других факторов.

Переосмысление ситуации подталкивает к изменениям, в результате чего потребность в использовании разных способов переключения светофора неумолимо возрастает. Научно-технический прогресс XXI века уже способен решить и устранить некоторые проблемы.

Решение «Умный светофор» в комплексе с системами, входящими в инфраструктуру «Smart Roads», позволит обеспечить многое из перечисленного выше, в том числе следующее:

- повышение безопасности пешеходов путем более корректного функционирования светофора (избавление от проблемы перехода людьми дороги на красный свет, снижение человеческих жертв);
- повышение удобства для водителей путем грамотно спроектированного централизованного управления светофорами и сокращения времени простаивания машин;
- улучшение эффективности работы математического аппарата микроконтроллера светофора (применением изменяемой логики переключения световых индикаторов);
- применение эвристического анализа загруженности дорог и перераспределение потоков машин для сокращения пробок в городах;
- увеличение пропускной способности автомобилей при использовании интеллектуального управления через систему «Smart Roads»;
- постоянный мониторинг трафика для предоставления актуальной информации картографическому сервису и пользователям мобильных устройств в целях онлайн отображения ситуации дорожного трафика посредством облачного сервиса системы.

Слежение за трафиком («RFID Mark»). Оснащение автомобилей или других транспортных средств (маршрутных автобусов, фур) устройством радиометки позволит на

точках контроля трафика определять их как движущиеся объекты, следить за пропускной способностью дорог.

Именно такое решение вопроса обнаружения автомобилей способно максимально быстро обеспечить связь с «Умным светофором» в сравнении с другими способами, а также является наименее затратным в реализации изделия для владельцев автомобилей. На примерах ниже можно увидеть применение данных радиометок в работе систем управления шлагбаумами и на въездах в паркинги (рис.1,2).

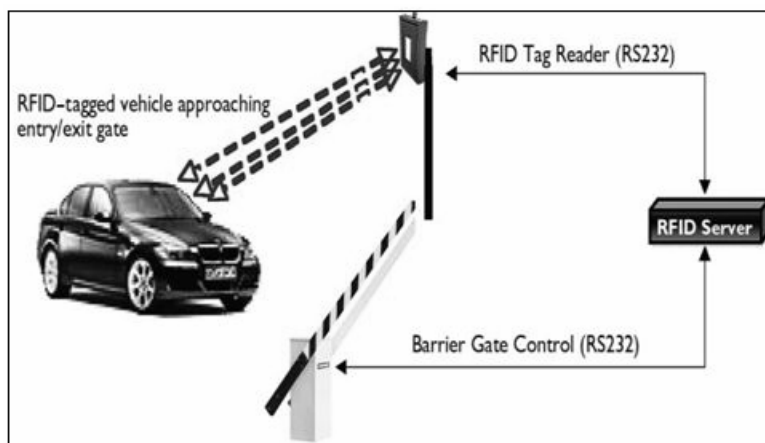


Рис. 1. Метки идентификации перед шлагбаумом

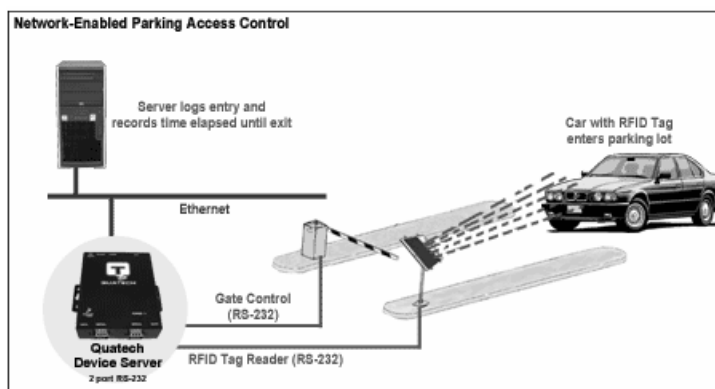


Рис. 2 . Управление RFID на парковке

Система связи («Multi-Link»). Обеспечить связь и передачу данных от точки контроля трафика до облачного сервиса «Smart Roads Cloud» - это первоочередная задача при построении системы интеллектуального и полностью автоматизированного управления «Smart Roads».

Разрабатываемая система «Multi-Link» базируется на 3 опорных факторах:

1. Скорость.
2. Стабильность.
3. Стоимость.

Один из главных критериев в условиях городов – это скорость обмена информацией. Другим важным фактором, особенно на трассах за пределами города есть стабильность и надежность канала связи. Конечная стоимость эксплуатации должна быть максимально низкой. Совмещение трех критериев – цель системы «Multi-Link».

Проанализируем пункт «стабильность». Что может быть надёжнее швейцарского банка? Только система связи, используемая в банкоматах Швейцарии. Автор статьи предлагает не тратить время на изобретение велосипеда, а, модифицировав, внедрить такую схему связи в комплекс «Smart Roads».

- В схеме задействовано 3 канала, а именно:
- проводной (как более надежный);
 - Wi-Fi / WiMAX (как самый быстрый);
 - беспроводной сотовый (для доступности в зоне покрытия).

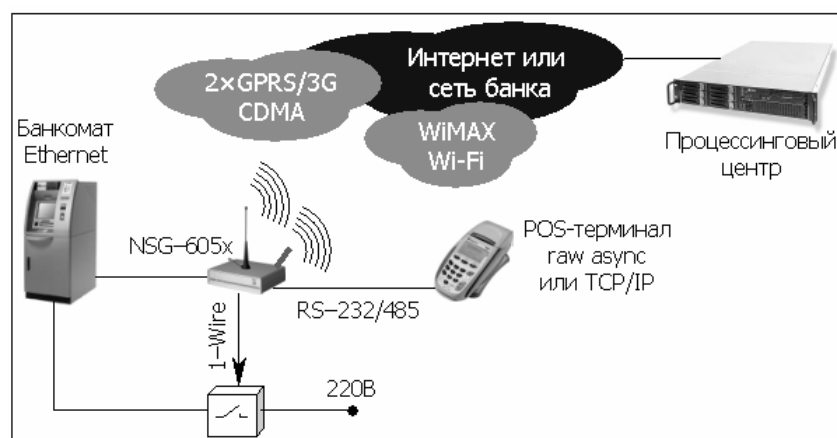


Рис. 3. Применение многоканальной связи в банкомате

В итоге, запрограммировав систему на выбор оптимального канала, можно практически везде и всюду иметь постоянную линию связи.

Введем некоторые определения, описывающие функционал системы Smart Roads.

Критерий эффективности системы (КЭС) – Criteria of system efficiency (C_{SE}).

КЭС (C_{SE}) – это отношение количества маршрутов с оптимальной загруженностью ко всем маршрутам в указанном промежутке дороги. В идеальном случае КЭС стремится к 1 или 100%:

$$C_{SE} = \frac{Q(R_{optimal})}{Q(R_{all})} \quad (1)$$

Оптимальный маршрут ($R_{optimal}$) – это такой маршрут, на котором нет автомобилей, либо загруженность не превышает заданный лимит ($< 50\%$).

Критический маршрут ($R_{critical}$) – это такой маршрут, на котором наблюдается полная загруженность автомобилями (100%), либо превышает заданный лимит ($> 50\%$).

(R_{all}) – общее число маршрутов на промежутке дороги.

Наличие альтернативных способов проезда от точки «А» до точки «В» говорит о том, что указанный промежуток содержит более 1-го оптимального маршрута ($R_{optimal}$), что в свою очередь повышает КЭС.

Пропускная способность маршрута (C_R) – это количество автомобилей, проезжающих через точку контроля трафика в единицу времени:

$$C_R = \frac{Q(A)}{T} \quad (2)$$

где А – автомобиль; Т – единица времени.

Данный параметр системы тесно связан с $R_{optimal}$ и используется для того, чтобы балансировать потоки автомобилей, тем самым снижая загруженность дорог. Чем выше пропускная способность – тем лучше.

Скорость передачи данных есть критичным значением, поэтому система состоит не из 1-го, а из 3-х различных линий связи. Это даёт преимущество в стабильности и практически покрывает все возможные сбой связи: V_{ch1} – wireless channel, V_{ch2} – CDMA/GPRS/3G channel, V_{ch3} – Ethernet channel.

Ниже представлен пример сбоя линии связи одного из каналов (рис 4).

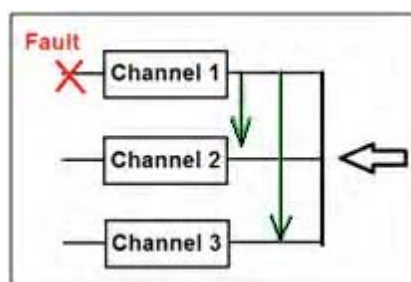


Рис. 4. Переключение каналов при сбое связи

Показатель стабильности связи зависит от наличия свободных каналов передачи данных и от максимально поддерживаемой ими скорости передачи данных.

Загруженность системы Smart Roads определяется как зависимость между серверами, выполняющими процедуры мониторинга, передачи и обработки данных и общим числом серверов, работающих в системе в текущий момент времени.

Для балансировки загруженности серверов все информационные задачи перераспределяются между узлами системы, благодаря чему достигается лучшая эффективность использования программно-аппаратных ресурсов.

3. Выводы

Преимущества данной системы заключаются в следующем.

1. *Соответствие нормам.* Управление дорожным движением по новой схеме не нарушит существующие правила дорожного движения, а гармонично впишется в лимиты скоростного режима и других критериев контроля с соблюдением всех норм, предписанных законодательной базой страны. Система «SMART ROADS» усовершенствует и дополняет всё имеющееся более удобным сервисом с современным функционалом.

2. *Простота реализации.* Инфраструктура для системы будет использовать существующие точки контроля движения, а значит, она уже наполовину готова (в плане электропитания также). Можно задействовать стационарные пункты видеофиксации с использованием радаров «Гарпун» и «Витязь», которые уже устанавливаются на дорогах общего пользования Украины. Остаётся лишь дооснастить новым компактным оборудованием для передачи данных и подключить к сети. Развертка серверной части возможна в каждом городском пункте ГАИ и облачном сервисе.

3. *Выгоды для пользователей.* В основу системы заложены принципы доступности сервисов. Стоимость и установка радиометок будут низкими. Функции их выдачи и обслуживания доверяются органам, ранее занимавшимся талонами технического осмотра, либо сторонней компании. Предоставление картографического сервиса пользователям мобильных систем, а также владельцам автомобильных навигаторов осуществляется на конкурентной платной основе либо с ежемесячным абонементом. Возможности не стоять в пробках, а также удобство своевременного приезда работников такси будет принято положительно. Отзывы собираются также и в сети Интернет для соцопроса.

4. *Мотивация для госструктур.* Модернизация управления системой и доведение её до международного уровня стандартов. Рекомендовано создание организации, проводящей централизованное обслуживание «SMART ROADS». Разгрузка работы служб ГАИ и перераспределение кадрового состава для повышения эффективности мониторинга.

Привлечение прибыли с использованием новых возможностей, описанных выше (монетизация картографического сервиса, простота при оплате парковок и платных дорог).

Безопасность системы. Ключевым аргументом «против» в вопросе применения фото-видео идентификации автомобилей или присвоение каждому из них персонального идентификатора было то, что потенциальные пользователи не желают быть определенными как таковые. Многих людей волнует то, что информация об их машине может быть передана или использована не по назначению. Также возможны взломы при хакерских атаках на базу данных идентификаторов машин и кражи. Вопрос угона в данном случае не решается, так как переставить с одной машины на другую персональный ID можно в обход системы.

Использование радиочастотных меток в предлагаемой системе «Smart Roads» избавит от суеты по поводу конфиденциальности и не нарушит ни одного закона страны касательно вторжения в частную жизнь человека.

Перспективы исследования. При успешном внедрении системы «Smart Roads» планируется также развертывание комплекса взаимодействия со службами экстренной помощи для обеспечения своевременного определения и локализации дорожно-транспортных происшествий, для оказания оперативной помощи пострадавшим и в случаях чрезвычайных ситуаций. В целях усовершенствования устройств управления дорожным движением предлагается создание инновационного прибора-монитора, имеющего интерактивный интерфейс. Также следует отметить способность создаваемой инфраструктуры к масштабированию в зависимости от изменяющихся условий городов и роста количества автомобилей, к территориальному расширению и добавлению новых «узлов» облачной системы.

Список литературы: 1. *Бондаренко М.Ф., Хаханов В.И., Чумаченко С.В., Литвинова Е.И.* Зеленая волна – облако мониторинга и управления дорожным движением. Green Wave Traffic. // АСУ и ПА. 2012. С. 33. 2. *Pandit A.A., Talreja J., Mundra A.K.* RFID Tracking System for Vehicles (RTSV) // First International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks. 2009. P.160-165. 3. *Дудников С., Боечко И.* Бесконтактная идентификация транспорта, основанная на RFID // Компоненты и технологии. №1. 2007. http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2007_01_140.pdf 4. *Fritz Esker.* RFID in Vehicles // NetWorld Alliance LLC. 2012. <http://www.KioskMarketplace.com>. 5. *Lawrence Y. Deng, Nick C. Tang, Dong-liang Lee, Chin Thin Wang and Ming Chih Lu.* Department of CSIE, IM, HEC, EE St. John's & Mary's Institute of Technology Department of CSIE, Tamkang University, Taipei, Taiwan. Vision Based Adaptive Traffic Signal Control System development // Proc. of the 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'05). 2005. 6. *Hong-Jiao Ma, Yong-Hui Hu, Hai-Bo Yuan, Wei Guo.* Design and Analysis of Embedded GPS/DR Vehicle Integrated Navigation System // The 2008 International Conference on Embedded Software and Systems Symposia.– 2008. 7. *Takahiro Miyamoto, Michiaki Hayashi, Kosuke Nishimura.* Sustainable Network Resource Management System for Virtual Private Clouds // 2nd IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science. 2010.

Поступила в редколлегию 22.03.2013

Зиарманд Артур Нисарович, аспирант кафедры Автоматизации проектирования вычислительной техники ХНУРЭ. Научные интересы: системы мониторинга автомобилей, облачные сервисы, программно-аппаратные технологии Apple. Увлечения: электронные устройства автомобиля, green technologies, системы «Умный дом», занятия настольным теннисом. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14. Тел.: +380937712804. E-mail: artziarmand@gmail.com.

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИНФОРМАТИВНОСТИ БИАДИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МЕЖКАДРОВЫХ АПЕРТУР ДЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ Р-КАДРОВ

Обосновывается необходимость совершенствования технологий компрессии в направлении сохранения информационного содержания изображений и снижения технической сложности реализации. Излагаются этапы разработки математической модели для оценки информативности апертурного описания изображений, аппроксимируемых одномерными двухосновными позиционными числами с ограниченным фиксированным приращением между элементами. Показываются потенциальные характеристики создаваемого подхода относительно сокращения избыточности изображений.

1. Введение

Постановка проблемы и анализ литературы. Снижение качества предоставления видеoinформационных услуг с использованием инфокоммуникационных технологий обусловлено превышением интенсивности видеотрафика относительно пропускной способности сети [1]. Использование технологий компрессии уменьшает интенсивность видеопотока. Здесь применяются технологии компрессии на MPEG платформах [2 – 4]. Однако такая обработка сопряжена с внесением искажений и дополнительными временными задержками на обработку. Интегрирование в ИТ системы базовых технологий сжатия неоднозначно влияет на эффективность их функционирования. Особенно это проявляется при передаче видеотрафика: на значительные расстояния по низкоскоростным беспроводным каналам связи; на ограниченные расстояния с использованием относительно высокоскоростных технологий, но в условиях повышенных требований по качеству кадров изображений. Значит, актуальным требованием является создание систем сжатия, способных обеспечить сокращение интенсивности видеопотока в режимах сохранения необходимого информационного содержания и минимизации сложности реализации кодеков. Данное направление является сутью *научно-прикладной задачи*.

Для ее решения необходимо построение технологий компрессии видеопотока с использованием методов апертурной аппроксимации с последующим устранением структурно-комбинаторной избыточности [5]. Для MPEG-ориентированных технологий компрессии видеопотока одним из ключевых механизмов обработки является кодирование Р-кадров, полученных в результате предсказания [4]. Поэтому *цель исследований статьи* заключается в создании математической модели для оценки информативности и обоснования подхода относительно обработки Р-кадров с использованием апертурной аппроксимации.

2. Разработка модели оценки информативности биадического представления межкадровых апертур для последовательности Р-кадров

Предлагается описывать последовательность предсказанных кадров на основе выявления межкадровых апертур [5]. Под межкадровой апертурой понимается последовательность со следующими свойствами: элементы расположены в пакете Р-кадров на одинаковых позициях; значения элементов находятся в пределах ограниченного динамического диапазона. Характеристиками межкадровой апертуры являются:

– высота $D_{\xi,\gamma}$ апертуры для $(\xi;\gamma)$ -й последовательности, определяемая как разница между верхним $\ell_{\xi,\gamma}^{(\max)}$ и нижним $\ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}$ значениями динамического диапазона в последовательности элементов предсказанных кадров $D_{\xi,\gamma} = \ell_{\xi,\gamma}^{(\max)} - \ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}$, где $\ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}$, $\ell_{\xi,\gamma}^{(\max)}$ – значения соответственно нижней и верхней границ диаметра $(\xi;\gamma)$ -й апертуры; длина $\Gamma_{\xi,\gamma}$ апертуры, вычисляемая как количество подряд расположенных элементов, для которых

выполняется условие $a(\tau)_{\xi,\gamma} \in [\ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}; \ell_{\xi,\gamma}^{(\max)}]$, $\tau = \overline{0, r_{\xi,\gamma} - 1}$; начальный элемент $a_{\xi,\gamma}$ межкадровой апертуры, относительно которой осуществляется определение величин $\ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}$ и $\ell_{\xi,\gamma}^{(\max)}$, т.е. $\ell_{\xi,\gamma}^{(\max)} = a_{\xi,\gamma} + D_{\xi,\gamma} / 2$; $\ell_{\xi,\gamma}^{(\min)} = a_{\xi,\gamma} - D_{\xi,\gamma} / 2$.

Построение генерирующей апертурной функции предлагается организовывать на базе использования позиционных систем. В этом случае функция $f_a(A^{(\xi,\gamma)})$ создается для следующих условий: $D_{\xi,\gamma} \geq 1$ и $x(\tau)_{\xi,\gamma} \neq x(\tau+1)_{\xi,\gamma}$, $a(\tau)_{\xi,\gamma} \in [\ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}; \ell_{\xi,\gamma}^{(\max)}]$, $\tau = \overline{0, r_{\xi,\gamma} - 1}$; $h \geq h_{\text{тр}}$.

Такой подход обеспечивает сокращение структурной, статистической и психовизуальной избыточности в условиях сокращения вычислительных затрат. В то же время необходимо отметить и недостатки данного подхода относительно формирования ФАГ, которые связаны с тем, что высота межкадровой апертуры выбирается заранее. Это может привести к потере адаптивности относительно реального динамического диапазона обрабатываемых Р-кадров. Возможны последствия, когда динамический диапазон:

- будет значительно меньшим, чем выбранная заранее высота межкадровой апертуры, что приведет к появлению избыточного количества разрядов при формировании объема W_{in} ;

- будет иметь нестационарные значения, что в случае фиксированной высоты межкадровой апертуры приведет к образованию большого количества апертур для кадров Р-образа, т.е. увеличится объем W_{cl} ;

- будет значительно выше, чем выбранная высота межкадровой апертуры. Это приведет к появлению большого количества апертур единичной длины и, как следствие, к понижению суммарного коэффициента сжатия.

Для устранения указанных последствий возможны следующие направления:

- 1) выбирать заранее высокое значение высоты межкадровой апертуры. Данное направление имеет такие недостатки:

- приводит к увеличению объема W_{in} в случае описания межкадровой апертуры в режиме фиксированной длины кода, определяемой в зависимости от высоты МА;

- снижает гибкость к особенностям обрабатываемых кадров Р-образа, в том числе к их динамическим диапазонам. Проявляется эффект поглощения апертурой с большой высотой коротких апертур, имеющих относительно меньшие высоты;

- 2) подбирать значение высоты межкадровой апертуры под реальный динамический диапазон. Такое направление характеризуется недостатками: при большой высоте межкадровой апертуры увеличивается W_{in} ; увеличивается количество служебных данных в случае нестационарности изображений, так как формируется большое количество апертур с неравномерными длинами; для апертур, содержащих большое количество равных элементов, все равно формируется два ограничителя на динамический диапазон; если в апертуре не все элементы будут равны друг другу, то в случае появления равных элементов они также будут рассматриваться в процессе построения ФАГ как не равные.

Поэтому для устранения недостатков второго подхода относительно формирования ФАГ на основе представления их позиционными числами **предлагается** разработать **направление**, базирующееся на дополнительном выявлении закономерностей, основанных на учете локально-пространственных свойств межкадровой апертуры, выявляемой для последовательности изображений.

Выявление локально-пространственных свойств межкадровой апертуры предлагается осуществлять на основе учета ограниченного приращения δ между соседними элементами Р-кадров. Это обусловлено тем, что для большинства видеопоследовательностей реалистических изображений характерны относительно незначительные изменения цвета и яркости между соответствующими элементами соседних кадров. Наиболее часто наблюдаются плавные цветовые переходы между последовательностями кадров. Такая тенденция имеет более устойчивое проявление в случае обработки не исходных кадров, а кадров,

представленных в дифференциальном виде. Наоборот, резкие изменения сценариев между кадрами, т.е. наибольшие значения приращения, встречаются значительно реже. Данный вид ограничений задается следующей системой соотношений:

$$\begin{cases} a(\tau)_{\xi,\gamma} - \delta \leq a(\tau+1)_{\xi,\gamma}; \\ a(\tau)_{\xi,\gamma} + \delta \geq a(\tau+1)_{\xi,\gamma}. \end{cases} \quad (1)$$

В то же время в соответствии с выбранным подходом обработки изображений элементы $a(\tau)_{\xi,\gamma}$ и $a(\tau+1)_{\xi,\gamma}$ входят в состав межкадровой апертуры, т.е. $a(\tau)_{\xi,\gamma}, a(\tau+1)_{\xi,\gamma} \in A^{(\xi,\gamma)}$. Тогда обобщенное ограничение на элементы апертуры, удовлетворяющее условиям системы (1), примет вид:

$$\begin{cases} \ell_{\xi,\gamma}^{(\min)} = a(0)_{\xi,\gamma} - D_{\xi,\gamma}/2 \leq a(\tau)_{\xi,\gamma} - \delta_{\xi,\gamma} \leq a(\tau+1)_{\xi,\gamma} \leq a(0)_{\xi,\gamma} + D_{\xi,\gamma}/2 = \ell_{\xi,\gamma}^{(\max)}; \\ \ell_{\xi,\gamma}^{(\max)} = a(0)_{\xi,\gamma} + D_{\xi,\gamma}/2 \geq a(\tau)_{\xi,\gamma} + \delta_{\xi,\gamma} \geq a(\tau+1)_{\xi,\gamma} \geq a(0)_{\xi,\gamma} - D_{\xi,\gamma}/2 = \ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}; \end{cases} \quad (2)$$

$\tau = \overline{0, r_{\xi,\gamma} - 1}$, где $a(0)_{\xi,\gamma}$ – вершина $(\xi;\gamma)$ -й межкадровой апертуры; $r_{\xi,\gamma}, D_{\xi,\gamma}$ – соответственно длина и высота межкадровой апертуры; $\delta_{\xi,\gamma}$ – приращение между элементами на позиции $(\xi;\gamma)$ в последовательности Р-кадров.

Данное условие задает межкадровую апертуру, элементы которой имеют ограниченное приращение $\delta_{\xi,\gamma}$.

Для оценки информативности предложенного подхода относительно создания апертурного описания Р-кадров необходимо определить количество информации, содержащееся в кодовых словах, формируемых генерирующей апертурной функцией на базе формирования позиционных чисел.

Проведем оценку количества информации, содержащейся в межкадровых апертурах, элементы которой удовлетворяют системе ограничений (2). В условиях формирования позиционных чисел относительно оценки информативности межкадровых апертур требуется определить динамические диапазоны изменения значений ее элементов. Анализ выражения (2) показывает, что:

1) значение координаты вершины апертуры $a(0)_{\xi,\gamma}$ будет изменяться в пределах $a(0)_{\xi,\gamma} \in [\ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}, \ell_{\xi,\gamma}^{(\max)}]$, т.е. динамический диапазон величины $a(0)_{\xi,\gamma}$ будет равен

$$\lambda(0)_{\xi,\gamma} = \ell_{\xi,\gamma}^{(\max)} - \ell_{\xi,\gamma}^{(\min)} + 1 = D_{\xi,\gamma} + 1; \quad (3)$$

2) значения элементов $a(\tau)_{\xi,\gamma}, \tau = \overline{1, r_{\xi,\gamma}}$, принадлежащих $(\xi;\gamma)$ -й межкадровой апертуре, будут изменяться в следующих пределах:

$$a(\tau)_{\xi,\gamma} - \delta_{\xi,\gamma} \leq a(\tau+1)_{\xi,\gamma} \leq a(\tau)_{\xi,\gamma} + \delta_{\xi,\gamma}.$$

Отсюда динамический диапазон элементов $a(\tau)_{\xi,\gamma}$ относительно предыдущего элемента межкадровой апертуры находится как

$$\lambda(\tau)_{\xi,\gamma} = 2\delta_{\xi,\gamma} + 1, \text{ для } \tau = \overline{1, r_{\xi,\gamma} - 1}. \quad (4)$$

Значит, в результате того, что генерируется межкадровая апертура, элементы которой соответствуют условиям (3), образуются позиционные числа $A^{(\xi,\gamma)}$, отличающиеся тем, что:

– основание первого элемента определяется по формуле (3) и зависит от высоты межкадровой апертуры, если известны максимальный и минимальный ее уровни. В противном случае основание координаты высоты межкадровой апертуры определяется общим динамическим диапазоном изображения;

– основания остальных элементов зависят от величины межкадрового приращения $\delta_{\xi,\gamma}$ и вычисляются соответственно по формуле (4).

Числа с такими свойствами будем называть *одномерными позиционными числами с ограниченным приращением на элементы*.

С другой стороны, элементам сформированных чисел соответствует два различных основания, а именно для первого элемента $\lambda(\tau)_{\xi,\gamma} = D_{\xi,\gamma} + 1$, $\tau = 0$, а для всех остальных

$$\lambda(\tau)_{\xi,\gamma} = 2\delta_{\xi,\gamma} + 1, \text{ где } \tau = \overline{1, r_{\xi,\gamma} - 1}, \text{ т.е. } \lambda(\tau)_{\xi,\gamma} = \begin{cases} D_{\xi,\gamma} + 1, & \rightarrow \tau = 0; \\ 2\delta_{\xi,\gamma} + 1, & \rightarrow \tau = \overline{1, r_{\xi,\gamma} - 1}; \end{cases}$$

Отсюда следует, что межкадровые апертюры, элементы которых удовлетворяют соотношениям (2) – (4) являются *одномерными биадическими (двухосновными) числами* (ОБЧ). Тогда количество $V^{(\xi,\gamma)}$ различных ОБЧ длиной $r_{\xi,\gamma}$, основания элементов которых определяются по формулам (3) и (4), вычисляется по формуле

$$V^{(\xi,\gamma)} = \prod_{\tau=0}^{r_{\xi,\gamma}-1} \lambda(\tau)_{\xi,\gamma} = (D_{\xi,\gamma} + 1)(2\delta_{\xi,\gamma} + 1)^{r_{\xi,\gamma}-1}. \quad (5)$$

Из анализа выражения (5), следует, что количество $V^{(\xi,\gamma)}$ допустимых одномерных биадических чисел находится в прямо пропорциональной зависимости от высоты $D_{\xi,\gamma}$ межкадровой апертюры и величины межкадрового приращения $\delta_{\xi,\gamma}$.

Согласно выражению (5) максимальное количество $W^{(\xi,\gamma)}$ разрядов, затрачиваемое на представление $(\xi;\gamma)$ -й межкадровой апертюры в виде одномерного биадического числа, определяется по формуле

$$W^{(\xi,\gamma)} = [\ell \log_2 V^{(\xi,\gamma)}] + 1 = [\ell \log_2 (D_{\xi,\gamma} + 1) + (r_{\xi,\gamma} - 1) \ell \log_2 (2\delta_{\xi,\gamma} + 1)] + 1. \quad (6)$$

Среднее количество разрядов $\overline{W}^{(\xi,\gamma)}$, приходящееся на один элемент межкадровой апертюры длиной $r_{\xi,\gamma}$ элементов, в случае их описания ОБ числами оценивается следующим соотношением:

$$\overline{W}^{(\xi,\gamma)} = \frac{W^{(\xi,\gamma)}}{r_{\xi,\gamma}} = \frac{[\ell \log_2 (D_{\xi,\gamma} + 1) + (r_{\xi,\gamma} - 1) \ell \log_2 (2\delta_{\xi,\gamma} + 1)] + 1}{r_{\xi,\gamma}}. \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет сделать вывод, что для больших длин межкадровых апертюр, длиной $r_{\xi,\gamma}$, среднее количество разрядов $\overline{W}^{(\xi,\gamma)}$ будет ограничено снизу величиной $\overline{W}^{(\xi,\gamma)} \geq \ell \log_2 (2\delta_{\xi,\gamma} + 1)$.

Минимальное количество избыточности $R_{\xi,\gamma}^{(\min)}$, оцениваемое как разница в количестве разрядов, отводимых на представление соответственно исходных элементов Р-кадров и элементов ОБЧ, и выражаемое в процентах, будет равно

$$R_{\xi,\gamma}^{(\min)} = 100(b - \overline{W}^{(\xi,\gamma)})/b \%,$$

где b – количество разрядов, отводимое на представление элемента исходного изображения.

Заменив в предыдущем выражении величину $\overline{W}^{(\xi,\gamma)}$ формулой (7), получим следующую оценку для $R_{\xi,\gamma}^{(\min)}$:

$$R_{\xi,\gamma}^{(\min)} = 1 - \frac{([\ell \log_2 (D_{\xi,\gamma} + 1) + (r_{\xi,\gamma} - 1) \ell \log_2 (2\delta_{\xi,\gamma} + 1)] + 1)}{b r_{\xi,\gamma}} \times 100\%. \quad (8)$$

Анализ полученного соотношения для оценки величины $R_{\xi,\gamma}^{(\min)}$ показывает, что для:

– количества избыточности выполняется неравенство $R_{\xi,\gamma}^{(\min)} > 0\%$;

– больших длин апертур $R_{\xi,\gamma}^{(\min)} \geq (100 - 12,5 \log_2(2\delta_{\xi,\gamma} + 1))\%$.

Действительно, распишем формулу (8) следующим образом:

$$R_{\xi,\gamma}^{(\min)} = 1 - \frac{([\log_2(D_{\xi,\gamma} + 1) + (r_{\xi,\gamma} - 1)\log_2(2\delta_{\xi,\gamma} + 1)] + 1)}{b + b(r_{\xi,\gamma} - 1)} \times 100\% .$$

В то же время по условию построения межкадровой апертуры ее формирование осуществляется при следующих ограничениях на высоту и на межкадровое приращение между элементами соседних Р-кадров:

$$D_{\xi,\gamma} + 1 < 2^b - 1; \quad 2\delta_{\xi,\gamma} + 1 < 2^b - 1. \quad (9)$$

Отсюда следует, что $\log_2(D_{\xi,\gamma} + 1) < b$ и $(r_{\xi,\gamma} - 1)\log_2(2\delta_{\xi,\gamma} + 1) < (r_{\xi,\gamma} - 1)b$. Значит, за счет описания межкадровой апертуры как биадического числа происходит сокращение избыточности, количество которой будет больше нулевого уровня. При этом количество устраняемой избыточности будет тем больше, чем меньше значение высоты межкадровой апертуры и межкадрового приращения относительно общего динамического диапазона, равного $2^b - 1$. Понятно, что количество такой избыточности обусловлено наличием в Р-кадрах статистических и структурно-комбинаторных закономерностей.

Результаты проведенных экспериментов относительно оценки минимального количества избыточности, которое устраняется в результате представления межкадровой апертуры биадическим числом с ограниченным приращением, свидетельствует о том, что минимальное количество избыточности $R_{\xi,\gamma}^{(\min)}$, устраняемое относительно исходного представления элементов межкадровой апертуры, характеризуется следующими зависимостями:

– величина $R_{\xi,\gamma}^{(\min)}$ изменяется от 27 до 97% в зависимости от длины апертуры и значения приращения;

– наибольшее количество такой избыточности сокращается для относительно низких значений величины приращения и с ростом длины апертуры. Так, для $8 \leq r_{\xi,\gamma} \leq 32$ и для $0 \leq \delta_{\xi,\gamma} \leq 2$ количество исключаемой избыточности будет находиться в пределах 60 – 97%. Наименьшее количество избыточности снижается для $r_{\xi,\gamma} = 2$ и для $5 \leq \delta_{\xi,\gamma} \leq 6$, и находится на уровне 28%;

– для длин апертур, принимающих значения больше $r_{\xi,\gamma} \geq 32$, минимальное количество устраняемой избыточности снижается не более, чем на 1 - 2%, что говорит о наступлении эффекта насыщения, причем такой эффект в большей степени проявляется с ростом величины приращения.

Выявление локально-пространственных свойств межкадровой апертуры возможно на основе адаптивного учета динамических диапазонов ее элементов. При этом в соответствии с предложенным подходом относительно построения генерирующей апертурной функции наибольшая эффективность будет достигаться в случае понижения динамических диапазонов до минимального значения.

Значит, на основе изложенного можно заключить, что построение ФАГ на основе описания межкадровой апертуры биадическим числом с ограниченным межкадровым приращением между элементами позволяет обеспечить минимальное количество избыточности, устраняемое относительно исходного представления элементов апертуры на уровне от 27 до 97% в зависимости от длины апертуры и значения межкадрового приращения.

3. Выводы

1. Разработана математическая модель оценки информативности биадического представления межкадров апертур для последовательности предсказанных кадров в технологии компрессии видеопотока. Учитывается, что Р-кадры представляются биадическими

числами, полученными для межкадровых апертур с ограничением на локальное приращение между элементами.

2. На основе полученной модели оценки информативности доказано, что:

– за счет выявления локальных свойств межкадровых апертур Р-кадров достигается дополнительное сокращение избыточности изображений без потери информации. Количество устраняемой избыточности обусловлено наличием в Р-кадрах статистических и структурно-комбинаторных закономерностей, и будет тем больше, чем меньше значения высоты апертуры и приращения относительно общего динамического диапазона;

– минимальное количество избыточности, устраняемое относительно исходного представления элементов межкадровой апертуры, изменяется от 27 до 97% в зависимости от ее длины и значения приращения.

Научная новизна полученного результата заключается в том, что: получила дальнейшее развитие структурно-комбинаторная модель оценки информативности последовательности предсказанных кадров для технологии обработки видеопотока. Отличия состоят в том, что последовательности Р-кадров представляются биадическими числами, формируемыми для межкадровых апертурных последовательностей с учетом ограничения на локальное приращение между их элементами. Это позволяет проводить блочную обработку последовательности Р-кадров и повышать степень сжатия без внесения искажений.

Список литературы: 1. *Олифер В.Г.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 3-е изд. / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. СПб.: Питер, 2006. 958 с. 2. *Миано Дж.* Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии: учебное пособие / Дж. Миано; пер. с англ. М.: Триумф, 2003. 336 с. 3. *Сэломон Д.* Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. М.: Техносфера, 2004. 368 с. 4. *Баранник В.В.* Структурно-комбинаторное представление данных в АСУ / В.В. Баранник, Ю.В. Стасев, Н.А. Королева. Х.: ХУПС, 2009. 252 с. 5. *Акимов Р.И.* Технология кодирования пакетов предсказанных кадров в инфокоммуникационных системах // Сучасна спеціальна техніка. 2012. № 4. С. 17 – 18.

Поступила в редколлегию 18.01.2013

Акимов Руслан Иванович, соискатель Киевского Национального авиационного университета. Научные интересы: обработка видеоинформации и безопасность инфокоммуникационных систем. Адрес: Украина, Киев, пр. Космонавта Комарова, 1.

Хаханова Анна Владимировна, канд. техн. наук, доц. кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: сжатие и восстановление двоичных данных. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: anna_hahan@mail.ru.

УДК 629.391

В.В. БАРАННИК, В.Н. КРИВОНОС, А.В. ХАХАНОВА

МЕТОД КОМПАКТНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВЕКТОРА ЗНАЧИМЫХ КОМПОНЕНТ ТРАНСФОРМАНА

Обосновывается модель описания значимых компонент на основе позиционных чисел с неравными соседними элементами. Излагаются базовые этапы позиционного кодирования для сокращения суммарных затрат на представление значимых компонент. Описывается кодирование низкочастотной компоненты с применением статистического кода. Доказывается возможность дополнительного увеличения степени сжатия видеоданных за счет сокращения структурной избыточности в векторах значимых компонент трансформанта. Ключевые слова: трансформанта, значимые компоненты, динамический диапазон, компонента, сжатие.

Введение

Возросшее потребление видеоинформационных ресурсов при развитии современных технологий диктует необходимость обеспечивать соответствующие требования по достоверности, доступности и целостности видеоинформации. Одним из таких требований является кодирование источников видеоинформации. Из результатов проведенных исследований различных систем компрессии видно, что наибольшая эффективность обработки

числами, полученными для межкадровых апертур с ограничением на локальное приращение между элементами.

2. На основе полученной модели оценки информативности доказано, что:

– за счет выявления локальных свойств межкадровых апертур Р-кадров достигается дополнительное сокращение избыточности изображений без потери информации. Количество устраняемой избыточности обусловлено наличием в Р-кадрах статистических и структурно-комбинаторных закономерностей, и будет тем больше, чем меньше значения высоты апертуры и приращения относительно общего динамического диапазона;

– минимальное количество избыточности, устраняемое относительно исходного представления элементов межкадровой апертуры, изменяется от 27 до 97% в зависимости от ее длины и значения приращения.

Научная новизна полученного результата заключается в том, что: получила дальнейшее развитие структурно-комбинаторная модель оценки информативности последовательности предсказанных кадров для технологии обработки видеопотока. Отличия состоят в том, что последовательности Р-кадров представляются биадическими числами, формируемыми для межкадровых апертурных последовательностей с учетом ограничения на локальное приращение между их элементами. Это позволяет проводить блочную обработку последовательности Р-кадров и повышать степень сжатия без внесения искажений.

Список литературы: 1. *Олифер В.Г.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 3-е изд. / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. СПб.: Питер, 2006. 958 с. 2. *Миано Дж.* Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии: учебное пособие / Дж. Миано; пер. с англ. М.: Триумф, 2003. 336 с. 3. *Сэломон Д.* Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. М.: Техносфера, 2004. 368 с. 4. *Баранник В.В.* Структурно-комбинаторное представление данных в АСУ / В.В. Баранник, Ю.В. Стасев, Н.А. Королева. Х.: ХУПС, 2009. 252 с. 5. *Акимов Р.И.* Технология кодирования пакетов предсказанных кадров в инфокоммуникационных системах // Сучасна спеціальна техніка. 2012. № 4. С. 17 – 18.

Поступила в редколлегию 18.01.2013

Акимов Руслан Иванович, соискатель Киевского Национального авиационного университета. Научные интересы: обработка видеоинформации и безопасность инфокоммуникационных систем. Адрес: Украина, Киев, пр. Космонавта Комарова, 1.

Хаханова Анна Владимировна, канд. техн. наук, доц. кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: сжатие и восстановление двоичных данных. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: anna_hahan@mail.ru.

УДК 629.391

В.В. БАРАННИК, В.Н. КРИВОНОС, А.В. ХАХАНОВА

МЕТОД КОМПАКТНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВЕКТОРА ЗНАЧИМЫХ КОМПОНЕНТ ТРАНСФОРМАНА

Обосновывается модель описания значимых компонент на основе позиционных чисел с неравными соседними элементами. Излагаются базовые этапы позиционного кодирования для сокращения суммарных затрат на представление значимых компонент. Описывается кодирование низкочастотной компоненты с применением статистического кода. Доказывается возможность дополнительного увеличения степени сжатия видеоданных за счет сокращения структурной избыточности в векторах значимых компонент трансформанта. Ключевые слова: трансформанта, значимые компоненты, динамический диапазон, компонента, сжатие.

Введение

Возросшее потребление видеоинформационных ресурсов при развитии современных технологий диктует необходимость обеспечивать соответствующие требования по достоверности, доступности и целостности видеоинформации. Одним из таких требований является кодирование источников видеоинформации. Из результатов проведенных исследований различных систем компрессии видно, что наибольшая эффективность обработки

обеспечивается для предварительно трансформированных изображений. Тем не менее, устранение избыточности в трансформантах проводится в основном за счет учета психо-визуальных и статистических закономерностей. В результате этого получается ограниченный уровень компрессии, что приводит к таким последствиям как: потеря части информации, несвоевременная её доставка по запросу пользователя, ухудшение качества реконструированного изображения. Это нарушает условия обеспечения заданной целостности информации и доступности к ней. Нарастает несоответствие категориям информационной безопасности (рис. 1). Отсюда, *цель исследований* посвящена разработке метода кодирования значимых компонент сегментированных изображений, обеспечивающего повышение доступности и целостности видеoinформации для заданного уровня достоверности.

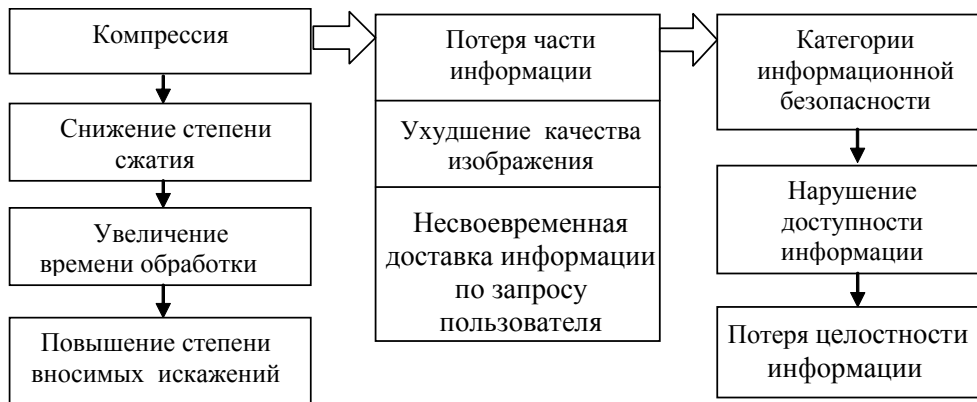


Рис. 1. Схема влияния характеристик степени компрессии на категории информационной безопасности

1. Описание общей структуры метода обработки видеоизображений

Чтобы добиться наибольшей эффективности при обработке изображений, необходимо исходное изображение предварительно преобразовать (трансформировать). В результате этого образуется форма, которая обладает полезными свойствами, удобными для последующего сокращения различных видов избыточности [1].

Технология сжатия изображений на основе их трансформирования реализована в таком формате как JPEG. Одним из основных этапов работы является дискретное косинусное преобразование (ДКП), которое применяют не ко всему изображению, а к отдельным блокам размера 8x8 пикселей [2]. Это позволяет получить представление, для которого: в правом верхнем углу сосредотачивается низкочастотная компонента, называемая "коэффициент DC". Все остальные компоненты называются "коэффициентами AC". Следующий этап работы алгоритма – квантование коэффициентов ДКП. На этом этапе происходит отбрасывание незначительной части информации, а именно, элемент трансформанты коэффициентов ДКП делится на специальное число, называемое коэффициентами квантования. В результате этого получившееся значение округляется до ближайшего целого [3]. Затем к двумерному массиву компонент трансформанты применяется линеаризация, т.е. формируется одномерный вектор с помощью "зигзаг"-сканирования. В сформированном одномерном векторе Y_m компонент вначале получаем низкочастотную компоненту y_1 , после чего из оставшихся компонент предлагается образовать два вектора: первый Y_{m-1} – вектор значимых компонент, второй G_{m-1} – вектор масштабирующих компонент, т.е. $Y_m = \{DC; Y_{m-1}; G_{m-1}\}$.

Это позволяет сократить количество повторяющихся коэффициентов трансформанты ДКП. Поэтому G_{m-1} предлагается называть вектором масштабирующих компонент, которые определяют количество повторов значимых компонент, т.е. задают их масштаб в частотном пространстве.

В результате вектор Y_m заменяется совокупностью пар $\{y_i, g_i\}$, где y_i – значение i -й значимой компоненты развёрнутой трансформанты, g_i – количество компонент, имеющих одинаковое значение (рис.2).

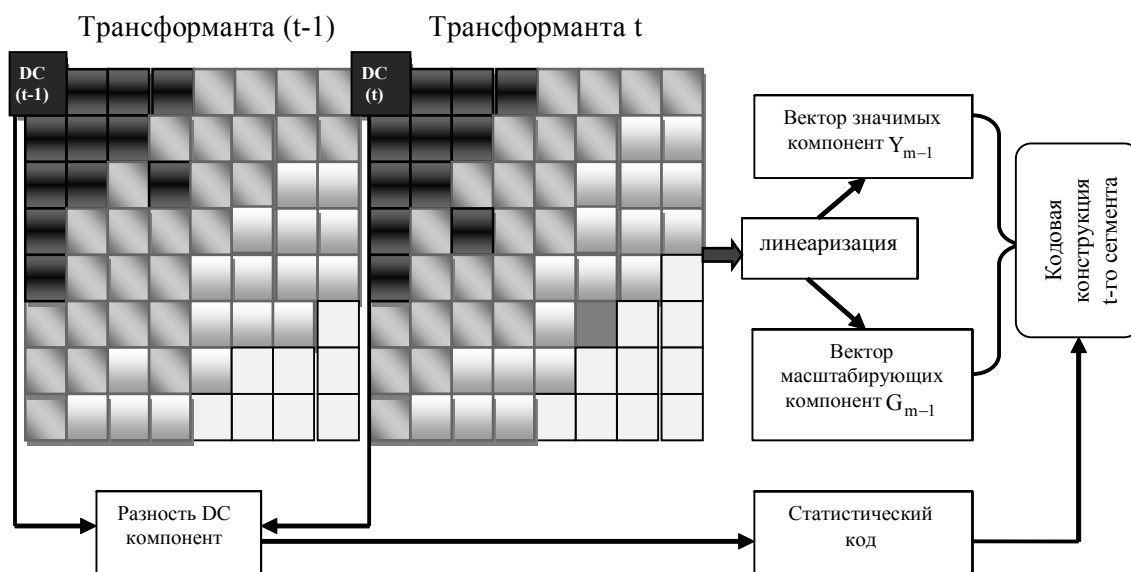


Рис. 2. Структурная схема предлагаемого метода обработки трансформанты

В процессе сжатия первая низкочастотная значимая компонента u_1 в векторе компонент Y_m и остальные компоненты кодируются по-разному. Это позволяет: снизить динамический диапазон компонент вектора Y_{m-1} ; учесть закономерности для DC коэффициентов соседних трансформант, а именно, их корреляцию.

2. Кодирование низкочастотной компоненты трансформанты

Низкочастотная компонента кодируется отдельно от остальных значимых компонент. Она представляется в виде разности значений текущей компоненты DC(t) и компоненты DC(t-1) предыдущей соседней трансформанты, а именно: $\Delta DC(t) = DC(t) - DC(t-1)$, где $\Delta DC(t)$ – значение разницы компонент DC(t) и DC(t-1); DC(t) – значение низкочастотной компоненты для текущей t-й трансформанты; DC(t-1) – значение компоненты для предыдущей (t-1)-й трансформанты. Это позволяет для кодирования значений DC компонент использовать меньшее число бит.

Поскольку при переходе от одной трансформанты к следующей низкочастотная компонента изменяется незначительно, то разрядность разности между соседними компонентами DC будет меньше разрядности исходных компонент DC, т.е. $\Delta DC(t) < DC(t)$. Следовательно, $l(\Delta DC(t)) < l(DC(t))$, где $l(\Delta DC(t))$ – длина двоичного представления разности $\Delta DC(t)$ соседних компонент; $l(DC(t))$ – длина двоичного представления исходных DC(t) компонент. Низкочастотные компоненты DC кодируются двумя частями (рис.3), что задаётся следующей формулой: $[\Delta DC(t)]_2 = [l_i]_2 \cup [d_i]_2$, где $[\Delta DC(t)]_2$ – двоичная запись значения разности $\Delta DC(t)$ компоненты; $[l_i]_2$ – двоичная запись основного кода; $[d_i]_2$ – двоичная запись дополнительного кода.

Основной код – это статистический код длиной равной l_i бит, обладающий свойством префиксности, записанный в двоичном виде $[l_i]_2$. Основной код $[l_i]_2$ и его длина l_i строятся за два этапа.



Рис. 3. Структура кода низкочастотной компоненты

Первый этап. Определяется категория i , соответствующая диапазону значения разности $\Delta DC(t)$. Для этого используется табл.1.

Таблица 1
Категории кодирования коэффициентов

Диапазон значений компонент DC		Коды разрядности (категория) для разности компонент DC
Отрицательный диапазон	Положительный диапазон	$i = \overline{0,16}$
$-2^i + 1, \dots, -2^{i-1}$	$2^{i-1}, \dots, 2^i - 1$	i

В табл.1 приняты следующие обозначения: $-2^i + 1, \dots, -2^{i-1}$ – отрицательный диапазон значения компонент DC, соответствующий i -й категории; $2^{i-1}, \dots, 2^i - 1$ – положительный диапазон значения компонент DC, соответствующий i -й категории; i – номер категории; $i = \overline{0,16}$ – значение категории от 0 до 16 бит.

Второй этап. На основе определения категории i с учетом данных табл. 2 осуществляется выбор соответствующего статистического кода $[l_i]_2$. Так как основной код $[l_i]_2$ указывает только на порядок разности, то вводится дополнительный код $[d_i]_2$, уточняющий категорию до точного значения разности.

Таблица 2
Стандартные коды для низкочастотных компонент

Категория кодирования коэффициентов DC	Двоичный код (основной код)	Длина дополнительного кода	Длина кода значения разности коэффициента $\Delta DC(t)$
i	$[l_i]_2$	d_i	$l(\Delta DC(t))$
0	010	0	3
1	011	1	4
2	100	2	5
3	00	3	5
4	101	4	7
5	110	5	8
6	1110	6	10
7	11110	7	12
8	111110	8	14
9	1111110	9	16
A	11111110	10	18
B	111111110	11	20

Дополнительный код $[d_i]_2$ – это количество d_i дополнительных бит, которые формируются из младших разрядов значения разности $\Delta DC(t)$, записанных в двоичном виде. Если значение разности $\Delta DC(t)$ находится в одном из диапазонов, то

$$\Delta DC(t) \in [-2^i + 1, \dots, -2^{i-1}, 2^{i-1}, \dots, 2^i - 1].$$

Первый случай, когда $\Delta DC(t)$ находится в отрицательном диапазоне $z = 1$:

$$\Delta DC(t) \in [-2^i + 1, \dots, -2^{i-1}],$$

то от дополнительного кода $[d_i]_2$ значения разности $\Delta DC(t)$ необходимо отнять 1.

$$[d_i]_2 = [d_i]_2 - 1.$$

Второй случай, когда $\Delta DC(t)$ находится в положительном диапазоне $z = 0$:

$\Delta DC(t) \in [2^{i-1}, \dots, 2^i - 1]$, $z = 0$. Тогда дополнительный код $[d_i]_2$ остаётся без изменений, где z – знак разности низкочастотной компоненты; $z = 1$ – отрицательный знак; $z = 0$ – положительный знак; $[d_i]_2 - 1$ – значение дополнительного кода в двоичном виде.

С учётом этого длина всего кода компоненты $\Delta DC(t)$ определяется как: $l(\Delta DC(t)) = l_i + d_i$, где l_i – длина двоичного кода; d_i – длина дополнительного кода, определяемая из младших разрядов значения разности $[\Delta DC(t)]_2$.

Кодирование DC компоненты происходит отдельно от остальных значимых компонент, это позволяет снизить динамический диапазон вектора Y_{m-1} и учесть закономерности для DC коэффициентов соседних трансформант.

3. Описание значимых компонент трансформанты оценка их информативности

Отличительная особенность процесса устранения избыточности в компонентной структуре трансформанты состоит в учете: концентрации основной энергии исходного сигнала в низкочастотных компонентах, (и наоборот, информация о мелких деталях формируется в высокочастотных компонентах трансформанты дискретного косинусного преобразования, значения которых зачастую близки к нулю); наличия компонент трансформанты с нулевыми значениями. Для такого варианта трансформанты из двумерной растягивается по диагональному зигзагу в одномерную структуру. После этого формируется совокупность пар $\{y_\alpha, l_\alpha\}$, где y_α, l_α – соответственно значение α -й значимой компоненты развернутой трансформанты и количество компонент, имеющих одинаковое значение. После n^2 компонент трансформанты заменяются m парами $\{y_\alpha, l_\alpha\}$, где $\alpha = \overline{1, m}$. В результате выявления значимых компонент трансформант создается возможность для устранения структурной избыточности.

Для трансформант в рамках их описания на основе структурного подхода последовательности Y_m значимых компонент присущи следующие закономерности:

1) соседние компоненты y_ξ и $y_{\xi+1}$ (где $\xi = \overline{1, m}$) имеют различные значения, т.е.

$$y_\xi \neq y_{\xi+1}, \quad \xi = \overline{1, m}; \quad (1)$$

2) если рассмотреть вектор Y_{m-1} , полученный в результате исключения из вектора Y_m низкочастотной компоненты y_1 , то для значимых компонент будет выполняться закономерность относительно ограниченного динамического диапазона, т.е.

$$y_{\min} \leq y_2, \dots, y_j, \dots, y_m \leq y_{\max}. \quad (2)$$

Здесь разница между величиной верхнего уровня y_{\max} и величиной нижнего уровня y_{\min} диапазона величин y_j на интервале $2 \leq j \leq m$ будет меньше, чем динамический диапазон для вектора Y_m .

Вектор Y_{m-1} , для компонент которого выполняются условия $y_2 \leq w(y)_2 = y_{\max} - y_{\min} + 1$; $y_j \leq w(y)_j = y_{\max} - y_{\min}$, $j = \overline{3, m}$, так, что в общем случае $w(y)_j \neq w(y)_v$, $j \neq v$ и $j, v = \overline{2, m}$, называется позиционным числом с неравными соседними элементами (ПЧНСЭ) и с системой оснований $W(y) = \{w(y)_j\}$. Для такого подхода относительно представления последовательности значимых компонент оценка информативности сводится к определению количества допустимых ПЧНСЭ. В общем случае для позиционной системы со смешанными

основаниями количество допустимых чисел равно $\prod_{j=2}^m w(y)_j$. Следовательно, с учетом

соотношений для величин оснований $w(y)_j$ получим следующее выражения для определения количества $V_m^{(y)}$ допустимых ПЧНСЭ: $V_m^{(y)} = \prod_{j=2}^m w(y)_j = (y_{\max} - y_{\min} + 1)(w(y)_j)^{m-2}$. Данное выражение учитывает: неизменность оснований для элементов вектора Y_{m-1} ; неравенство соседних компонент вектора Y_{m-1} . Максимальное количество $D_{m-1}^{(y)}$ разрядов, затрачиваемое на представление вектора Y_{m-1} значимых компонент трансформанты, вычисляется по формуле

$$D_{m-1}^{(y)} = [\log_2 V_{m-1}^{(y)}] + 1 = [\log_2 (y_{\max} - y_{\min} + 1) w(y)^{m-2}] + 1 = \\ = [\log_2 (y_{\max} - y_{\min} + 1) + (m - 2) \log_2 w(y)] + 1,$$

где y_{\min} и y_{\max} – величина нижнего и верхнего уровня динамического диапазона; $w(y)^{m-2}$ – динамический диапазон; $m - 2$ – длина числа.

Отсюда среднее количество $D_{m-1}^{(y)}$ двоичных разрядов, приходящееся на один элемент вектора Y_{m-1} , будет равно $\bar{D}_{m-1}^{(y)} = \frac{[\log_2 (y_{\max} - y_{\min} + 1) + (m - 2) \log_2 w(y)] + 1}{m - 1}$. Тогда ми-

нимальное количество $\bar{S}_{\min}^{(y)}$ избыточности в случае представления компоненты трансформанты как отдельной величины относительно ее представления как элемента вектора Y_{m-1} , т.е. как элемента позиционного числа с неравными соседними элементами оценивается на основе выражения

$$\bar{S}_{\min}^{(y)} = \frac{8 - \bar{D}_{m-1}^{(y)}}{8} \times 100\% = (1 - [\frac{\log_2 (y_{\max} - y_{\min} + 1)}{8(m-1)} + \frac{\log_2 w(h)}{8(m-1)}]) 100\%.$$

Поскольку выполняется неравенство $\log_2 (y_{\max} - y_{\min}) \leq 8$, то минимальное количество избыточности $\bar{S}_{\min}^{(y)}$ будет отличным от нулевого уровня, т.е. $\bar{S}_{\min}^{(y)} > 0\%$ [4].

Значит, можно заключить, что в результате представления вектора значимых компонент позиционным числом с неравными соседними элементами достигается сокращение избыточности относительно случая обработки отдельных компонент. Снижение избыточности достигается в результате учета структурно-комбинаторных закономерностей в векторе значимых компонент трансформанты, которые проявляются в том, что: для вектора Y_{m-1} проявляется ограниченность динамического диапазона как снизу, так и сверху (условие (2)); выполняется ограничение на неравенство между соседними компонентами (условие (1)).

4. Позиционное кодирование значимых компонент трансформанты с неравными соседними элементами

По определению *позиционное число с неравными соседними элементами* образуется на основе вектора значимых компонент трансформанты.

Формирование кодового описания предлагается осуществлять на базе построения кодовых конструкций для позиционных чисел. Вывод выражения для кодирования ПЧНСЭ осуществляется в два этапа:

- 1) первый этап заключается в определении значения кода вектора с учетом ограниченности динамического диапазона трансформанты (исключая низкочастотную компоненту);
- 2) на втором этапе выводятся выражения для получения кода позиционного числа с учетом ограничения на равенство соседних компонент вектора Y_{m-1} .

Здесь $\Delta V(y)_j$ определяется как количество допустимых последовательностей, предшествующих вектору $\Delta Y(m - j)$. Величина $\Delta V(y)_j$ вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta V(y)_j = \begin{cases} y_j (w(y)-1)^{(m-j-1)} - \Delta V(y'_j = y_{j-1}), \\ \rightarrow y_{j-1} < y_j; \\ y_j (w(y)-1)^{(m-j-1)}, \\ \rightarrow y_{j-1} > y_j, \end{cases}$$

где $y_j (w(y)-1)^{(m-j-1)}$ - суммарное количество последовательностей (длиной, равной λ_j), для всех элементов которых, кроме j -го, выполняются ограничения на динамический диапазон и на неравенство соседних элементов; $\Delta V(y'_j = y_{j-1})$ определяет количество запрещенных последовательностей, составленных из λ_j элементов, предшествующих кодируемой последовательности $\Delta Y(m-j)$.

Введем вспомогательную величину μ_j , равную

$$\mu_j = \begin{cases} y_j, & \rightarrow y_j < y_{j-1}; \\ y_j - 1, & \rightarrow y_j > y_{j-1}. \end{cases} \quad (3)$$

В результате этого соотношение для кода $E(y)_u$ вектора значимых компонент трансформанты примет вид

$$E(y)_u = \sum_{j=2}^m \mu_j (w(y)-1)^{(m-j-1)}. \quad (4)$$

По условию кодирования значимых компонент для второй компоненты должно выполняться два условия: на значения компонент, предшествующих элементу y_2 , не накладываются ограничения относительно нулевого элемента, т.е. не должно выполняться неравенство $y_{j-1} < y_j$; обеспечивается выполнение неравенства $y'_0 = w(y) > y_2$. Поэтому для компоненты y_2 в качестве предшествующей y'_0 выбирается значение $w(y)$, равное динамическому диапазону вектора Y_{m-1} , т.е.

$$y'_0 = w(y). \quad (5)$$

Таким образом, соотношения (3) – (5) позволяют определить кодовое значение для вектора значимых компонент трансформанты (исключая низкочастотную компоненту), представляющее собой позиционное число с неравными соседними элементами.

В этом случае в результате исключения последовательностей, содержащих равные соседние компоненты, устраняется структурная избыточность без внесения искажений. При этом устранение избыточности обеспечивается даже в тех случаях, когда динамический диапазон высокочастотных компонент трансформанты стремится к динамическому диапазону низкочастотной компоненты, т.е. $y_j \rightarrow y_1$.

Заключение

1. Обоснован подход для построения технологии компрессии изображений с использованием предварительного трансформирования, базирующийся на:

1) формировании двух составляющих трансформанты, а именно: вектора значимых компонент и вектора масштабирующих составляющих. Это позволяет: адаптироваться к структуре трансформанты, учитывая различную концентрацию высокочастотных компонент в сегменте изображения и различный уровень фактора квантизации; выявлять дополнительные структурные закономерности в трансформантах сегментированного изображения;

2) кодировании низкочастотной компоненты трансформанты как статистический код в дифференциальном пространстве. Это позволяет: устранить статистическую избыточность, обусловленную коррелированностью соседних сегментов; устранить энтропийную избыточность, вызванную наличием неравномерности распределения низкочастотных компонент; распараллелить кодирование; снизить динамический диапазон в векторе Y_m ;

3) описании вектора значимых компонент трансформанты в виде элементов позиционных чисел с неравными соседними элементами. Это позволяет адаптироваться к свойствам линеаризированных трансформант благодаря учету: неравенства значений соседних компонент; ограниченности динамического диапазона компонент трансформанты.

2. Сжатие фрагментов изображений достигается в результате:

1) исключения статистической избыточности, обусловленной учетом интегрированных корреляционных зависимостей;

2) снижения психовизуальной избыточности за счет проведения нелинейной квантизации трансформанты;

3) сокращения структурной избыточности, обусловленной: выявлением масштабирующих составляющих трансформанты; выявлением закономерностей для вектора значимых компонент, а именно: исключения избыточного количества позиционных чисел, которые содержат равные соседние элементы; учета ограниченности и неравномерности динамических диапазонов элементов.

Список литературы: 1. *Gonzales R.C. Digital image processing / R.C. Gonzales, R.E. Woods. Prentice Inc. Upper Saddle River, New Jersey 2002. 779 p.* 2. *Миано Дж. Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии. М.: Изд-во Триумф, 2003. 336 с.* 3. *Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. М.: Техносфера, 2004. 368с.* 4. *Баранник В.В. Метод сжатия изображений на основе неравновесного позиционного кодирования битовых плоскостей / В.В. Баранник, Н.К. Гулак, Н.А. Королева / Радиоелектронні і комп'ютерні системи. Х.: ХНАУ "ХАІ", 2009. Вип. 1. С. 55–61.*

Поступила в редколлегию 25.01.2013

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: кодирование и защита информации для передачи в телекоммуникационных системах. E-mail: barannik_v_v@mail.ru.

Кривonos Владимир Николаевич, инженер Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: кодирование и защита информации для передачи в телекоммуникационных системах. E-mail: k.v.n-26@mail.ru.

Хаханова Анна Владимировна, канд. техн. наук, доц. кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: сжатие и восстановление двоичных данных. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: anna_hahan@mail.ru.

УДК 621.39

О.К.БАСАРАБ

ФОРМУВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ЙМОВІРНІСНОГО ПОКАЗНИКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОПЕРАТИВНО-СЛУЖБОВИХ ДІЙ ДЕРЖАВНОЇ ПРИКОРДОННОЇ СЛУЖБИ УКРАЇНИ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Описується комплексний ймовірний показник ефективності оперативно-службових дій Державної прикордонної служби України від функціонування телекомунікаційних систем. Показується його аналітична залежність. Ключові слова: інформаційно-телекомунікаційних система, показник ефективності, Державна прикордонна служба України, база даних.

Вступ

Сучасна охорона державного кордону неможлива без застосування інформаційних технологій. Відповідно, ефективність оперативно-службової діяльності (ОСД) Державної прикордонної служби України (ДПСУ) напряду залежить від ефективності функціонування інформаційно-телекомунікаційних систем (ІТС), які забезпечують автоматизацію зазначеної діяльності.

3) описании вектора значимых компонент трансформанты в виде элементов позиционных чисел с неравными соседними элементами. Это позволяет адаптироваться к свойствам линеаризированных трансформант благодаря учету: неравенства значений соседних компонент; ограниченности динамического диапазона компонент трансформанты.

2. Сжатие фрагментов изображений достигается в результате:

1) исключения статистической избыточности, обусловленной учетом интегрированных корреляционных зависимостей;

2) снижения психовизуальной избыточности за счет проведения нелинейной квантизации трансформанты;

3) сокращения структурной избыточности, обусловленной: выявлением масштабирующих составляющих трансформанты; выявлением закономерностей для вектора значимых компонент, а именно: исключения избыточного количества позиционных чисел, которые содержат равные соседние элементы; учета ограниченности и неравномерности динамических диапазонов элементов.

Список литературы: 1. *Gonzales R. C. Digital image processing / R. C. Gonzales, R. E. Woods. Prentice Inc. Upper Saddle River, New Jersey 2002. 779 p.* 2. *Миано Дж. Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии. М.: Изд-во Триумф, 2003. 336 с.* 3. *Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. М.: Техносфера, 2004. 368 с.* 4. *Баранник В. В. Метод сжатия изображений на основе неравновесного позиционного кодирования битовых плоскостей / В. В. Баранник, Н. К. Гулак, Н. А. Королева / Радиоелектронні і комп'ютерні системи. Х.: ХНАУ "ХАІ", 2009. Вип. 1. С. 55–61.*

Поступила в редколлегию 25.01.2013

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: кодирование и защита информации для передачи в телекоммуникационных системах. E-mail: barannik_v_v@mail.ru.

Кривonos Владимир Николаевич, инженер Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: кодирование и защита информации для передачи в телекоммуникационных системах. E-mail: k.v.n-26@mail.ru.

Хаханова Анна Владимировна, канд. техн. наук, доц. кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: сжатие и восстановление двоичных данных. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: anna_hahan@mail.ru.

УДК 621.39

О.К.БАСАРАБ

ФОРМУВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ЙМОВІРНІСНОГО ПОКАЗНИКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОПЕРАТИВНО-СЛУЖБОВИХ ДІЙ ДЕРЖАВНОЇ ПРИКОРДОННОЇ СЛУЖБИ УКРАЇНИ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Описується комплексний ймовірний показник ефективності оперативно-службових дій Державної прикордонної служби України від функціонування телекомунікаційних систем. Показується його аналітична залежність. Ключові слова: інформаційно-телекомунікаційних система, показник ефективності, Державна прикордонна служба України, база даних.

Вступ

Сучасна охорона державного кордону неможлива без застосування інформаційних технологій. Відповідно, ефективність оперативно-службової діяльності (ОСД) Державної прикордонної служби України (ДПСУ) напряду залежить від ефективності функціонування інформаційно-телекомунікаційних систем (ІТС), які забезпечують автоматизацію зазначеної діяльності.

Існуючі підходи до оцінки ефективності функціонування телекомунікаційних систем спеціального призначення [1] не враховують особливості, зумовлені використанням ТКС в складі ІТС ДПСУ. Так, система показників, яка запропонована в [2, 3], не містить показники ефективності ОСД ДПСУ.

Найбільш активно телекомунікаційна система (ТКС) використовується під час здійснення прикордонного контролю (ПК) та прикордонної служби (ПС). З метою формування системи показників оцінки ефективності функціонування ТКС ДПСУ необхідно визначити результуючий комплексний імовірнісний показник ефективності ОСД залежно від стану ТКС.

У [4, 5] був отриманий вираз для обчислення показника ефективності ПК - ймовірності відсутності у базі даних (БД) пункту пропуску інформації про правопорушника, яка зумовлена непрацездатністю мережі.

Разом з тим, залишився неврахований вплив стану ТКС на іншу складову ОСД ДПСУ – прикордонну службу.

Мета роботи. Сформуванати комплексний імовірнісний показник ефективності оперативно-службової діяльності ДПСУ залежно від стану ТКС.

Результати дослідження

В прикордонній службі активно використовуються складові інформаційно-телекомунікаційної системи «Гарт-3», зокрема мобільні автоматизовані робочі місця (АРМ) «Патруль-М». З використанням комп'ютерної мережі з даних робочих місць здійснюється безпосередній доступ (без використання проміжної бази даних) до інформаційних ресурсів адміністрації ДПСУ. Звичайно, працездатність цих робочих місць безпосередньо залежить від функціонування мережевої складової. У зв'язку з цим їх працездатність прямо корелюється з доступністю ТКС.

Аналогічно забезпечується робота АРМ начальника підрозділу охорони кордону з безпосереднім доступом по мережі до бази даних «Ризик». При виході з ладу мережі доступ до цієї бази неможливий.

Позначимо ймовірність відсутності даних про порушника в АРМ ІТС «Гарт-3», яка викликана недоступністю мережевої складової, P_{nc} .

Відповідно до такого визначення цього імовірнісного показника він безпосередньо визначається доступністю мережі. Тому його можна отримати з виразу:

$$P_{nc} = \left(1 - \frac{D}{100}\right), \quad (1)$$

де D – доступність мережевої складової. Вона визначається загальним часом непрацездатності мережі протягом року:

$$D = \frac{(T_p - t_{nc})}{T_p} \cdot 100, \quad (2)$$

тут T_p – часова протяжність року; t_{nc} – сумарний час непрацездатності мережі протягом року.

Підставивши (2) у (1), отримаємо:

$$P_{nc} = \left(-\frac{(T_p - t_{nc})}{T_p}\right) = \frac{t_{nc}}{T_p}, \quad (3)$$

далі для визначення t_{nc} використаємо такий підхід:

$$t_{nc} = I_{nc} \cdot T_{nc}, \quad (4)$$

де I_{nc} – кількість випадків виходу з ладу мережевої складової ІТС «Гарт-3»; T_{nc} – середній час відновлення працездатності мережевої складової ІТС «Гарт-3».

У зв'язку з цим:

$$P_{nc} = \frac{I_{nc} \cdot T_{nc}}{T_p}, \quad (5)$$

Побудуємо комплексний імовірнісний показник $P_{\text{осд}}$ на основі імовірнісних показників, які враховують вплив працездатності мережевої складової в прикордонному контролі $P_{\text{бд}}$ [1] і прикордонній службі $P_{\text{пс}}$.

Для цього введемо вагові коефіцієнти k_1 і k_2 , з урахуванням яких визначимо:

$$P_{\text{осд}} = k_1 \cdot P_{\text{бд}} + k_2 \cdot P_{\text{пс}}, \quad (6)$$

Враховуючи умову нормування вагових коефіцієнтів:

$$k_1 + k_2 = 1, \quad (7)$$

пропонуємо визначити їх на основі статистичних даних про порушення кордону у пунктах пропуску n_1 та поза їх межами n_2 :

$$k_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2}, \quad (8)$$

$$k_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2}, \quad (9)$$

Враховуючи (5), (6) та вираз для $P_{\text{бд}}$ [1], отримаємо остаточний вираз для обчислення комплексного імовірнісного показника $P_{\text{осд}}$:

$$\begin{aligned} P_{\text{осд}} &= \frac{n_1}{n_1 + n_2} \cdot \frac{l \cdot v_0}{2 \cdot T_p \cdot M} \cdot T_k^2 + \frac{n_2}{n_1 + n_2} \cdot \frac{l_{\text{пс}} \cdot T_{\text{пс}}}{T_p} = \\ &= \frac{1}{(n_1 + n_2) \cdot T_p} \cdot \left[\frac{n_1 \cdot v_0 \cdot l}{2 \cdot M} \cdot T_k^2 + n_2 \cdot l_{\text{пс}} \cdot T_{\text{пс}} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Слід відмітити, що в отриманому виразі для обчислення комплексного показника враховується вплив працездатності мережевої складової ІТС прикордонного контролю «Гарт-1» і ІТС прикордонної служби «Гарт-3». У зв'язку з тим, що в «Гарт-1» використовується проміжна база даних, перший доданок у (10) має квадратичну залежність від часу відновлення працездатності мережі. У цей же час, внаслідок особливостей організації інформаційних потоків у ІТС «Гарт-3» другий доданок у (10) має вже лінійну залежність від часу відновлення працездатності мережі.

Висновок

В результаті проведених досліджень вперше отримана аналітична залежність для визначення комплексного імовірнісного показника оцінки впливу функціонування мережевої складової на ОСД при здійсненні прикордонного контролю та прикордонної служби. Цей показник розширює систему показників оцінки ефективності ТКС та надає можливість точніше оцінити ТКС ДПСУ.

Список літератури: 1. Катеринчук І. С., Періг В.М. Концептуальні засади експертизи телекомунікаційних систем //Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ : ВІКНУ, 2010. № 28. С. 76-78. 2. Методика експертизи телекомунікаційних систем в умовах невизначеності. Звіт про НДР / НАДПСУ. Шифр 210-0018 А – Хмельницький, 2010. 74 с. 3. Юдін О. К., Яковенко О. Л. Методологія підвищення ефективності функціонування інтегрованих інформаційно-телекомунікаційних систем та мереж / О. К. Юдін, Л.О. Яковенко //Вісник Національного Авіаційного Університету. 2008. Т. 34, №. 1. С. 93. 4. Басараб О.К. Визначення залежності окремих показників ефективності прикордонного контролю від функціонування телекомунікаційної мережі / О.К. Басараб// Збірник наукових праць. Хмельницький : НАДПСУ, 2012. С. 96–99. 5. Юдін О. К. Послідовний критерій аналізу інформативності параметрів сигналів //Вісник Національного Авіаційного Університету. 2006. Т. 27, №. 1. С. 18.

Поступила в редколлегию 01.02.2013

Басараб Олександр Корнійович, ад'юнкт Національної академії Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького. Наукові інтереси : телекомунікаційні системи та їх розвиток в межах Державної прикордонної служби України. Захоплення: побудова захищених систем передачі інформації. Адреса : Україна, 29003, Хмельницький, вул. Шевченка, 46.

МЕТОДОЛОГИЯ ДВУХКАСКАДНОГО МАСКИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ИНФОТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Рассматриваются вопросы сравнительной оценки наиболее распространенных методов маскирования. Показывается использование ранее обоснованных мер количественной оценки качества детектирования и локализации контуров для сравнения методов. Приводятся результаты эксперимента по использованию методов маскирования. Обосновывается необходимость применения каскадной методологии маскирования в задачах обработки изображений. Ключевые слова: метод маскирования, количественная оценка, качество детектирования и локализации.

1. Постановка проблемы и анализ литературы

В различных прикладных сферах, связанных с обработкой изображений, необходимо учитывать семантическую составляющую последних. Здесь наиболее семантически значимой является информация о контурах, границах объектов. Одной из базовых составляющих семантической обработки есть методы маскирования. Такие технологии позволяют выделять информативные сведения о структурных характеристиках объектов в изображениях.

Для обнаружения контуров существует большое разнообразие технологий и методов маскирования изображений. Одним из эффективных подходов для построения методов маскирования являются методы на основе построения градиента [1 - 3, 6]. Градиентные (дифференциальные) методы основаны на определении в каждой точке пространства приближенных значений градиента яркости и направлений наибольшего их изменения. Это позволяет подчеркнуть позиции изменения яркости в изображениях и является интегрированным методом для выделения контуров, направление которых произвольное. Способом поиска контуров есть обработка изображения с помощью скользящей маски, называемой также фильтром (ядром, окном или шаблоном). В общем случае такие фильтры представляются в виде двумерной матричной структуры. Соответственно оперирование такой маской (матричной структурой) и выполнение соответствующих преобразований в целях определения контуров называется маскированием или пространственной фильтрацией.

Методы маскирования для задач обработки цифровых изображений должны удовлетворять основным требованиям, представленным в [1 - 3, 6].

Не существует универсальных методов маскирования для различных типов изображений [1, 6]. Это приводит к тому, что существующие методы являются эффективными только в пределах узкого класса изображений. Поэтому отсутствие достоверного аппарата оценки методов маскирования приводит к ограничению повышения их эффективности. В большинстве случаев оценка качества метода маскирования ограничивается только субъективной оценкой (визуальная оценка качества работы). Но такой подход применим при наличии в звене принятия решения – лица, принимающего решение. Значит, количественная оценка качества методов маскирования в системах автоматической обработки реалистических изображений является *актуальной научно – прикладной задачей*.

Одним из вариантов ее решения есть построение двухкаскадной схемы маскирования. Это позволит взаимно сократить недостатки методов маскирования, применяемых на первом и втором каскадах с выполнением поэтапной оценки качества маскирования. Поэтому *цель исследований* заключается в обосновании подхода к маскированию изображений на основе двухкаскадной технологии с использованием количественной оценки качества методов маскирования для формирования операторов преобразования каскадов.

2. Основная часть. Метод оценки качества маскирования для формирования его двухкаскадной технологии

Оценку качества работы исследуемых методов проведем на тестовых изображениях. В качестве последних используем GT-образы, ground truth изображения – изображения, содержащие идеальные в понимании исследователя границы, с базы данных University of California Berkeley, Computer Vision Group [4] и лаборатории компьютерной графики ВМиК МГУ [5].

Основные подходы к оценке методов маскирования рассмотрены в работах [1 - 3, 6]. В них предложены методы теоретической и эмпирической оценки качества детектирования и локализации контуров. Оценка методов маскирования проводится на основе следующих мер качества детектирования и локализации:

1) ошибка 1-го рода α – отношение неправильно выделенных граничных пикселей к общему числу пикселей, не являющихся граничными:

$$\alpha(A, B) = \frac{n(B \setminus A)}{n(X \setminus A)}, \quad (1)$$

где $n(\setminus)$ – число пикселей в соответствующем изображении (множестве);

или её производная – специфичность S_p , как отношение выделенных не граничных пикселей к общему числу не граничных пикселей GT-образа:

$$S_p = \frac{n(X / B \cup A)}{n(X / A)} = 1 - \alpha; \quad (2)$$

2) ошибка второго рода β – отношение невыделенных граничных пикселей к общему числу граничных пикселей:

$$\beta(A, B) = \frac{n(A \setminus B)}{n(A)} \quad (3)$$

или её производная – чувствительность S_e – отношение правильно выделенных граничных пикселей к общему числу граничных пикселей GT-образа:

$$S_e = \frac{n(B \cap A)}{n(A)} = 1 - \beta; \quad (4)$$

3) количество правильных определенных пикселей по сравнению с идеальным контуром – N прав.;

4) количество неправильных определенных пикселей по сравнению с идеальным контуром – N неправ.;

5) среднеквадратическая ошибка RMSE (Root Mean Square Error), определяемая как расстояние между двумя пикселями сравниваемых изображений [2, 3, 13]:

$$RMS(f, g) = \left[\frac{1}{\text{card}(X)} \cdot \sum_{x \in X} (f(x) - g(x))^2 \right]^{1/2}; \quad (5)$$

6) пиковое отношение сигнал / шум - PSNR:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right), \quad (6)$$

где MAX_I — максимальное значение, принимаемое пикселем изображения; MSE – среднеквадратичное отклонение, которое для двух изображений F и G размера $m \times n$ определяется как:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |F(i, j) - G(i, j)|^2. \quad (7)$$

В качестве дополнительного параметра предлагается проводить оценку времени обработки изображения $t_{\text{обработки}}$. Метрики, заданные формулами (1) – (4), позволяют провести оценку качества детектирования контуров, метрики (5) и (6) – оценку качества их локали-

зации. Данные метрики также позволяют оценить основные ошибки и искажения (разрывы, локальные смещения, размазывания и утолщения контуров), вносимые методами маскирования в обрабатываемое изображение [1 – 3, 6].

Проведем тестирование методов маскирования, применяемых в системах автоматической обработки изображений. Под тестированием понимается визуализация результатов обработки и количественная оценка качества метода маскирования (вычисление предложенных метрик по формулам (1) – (7)). Для тестирования рассматривались наиболее распространенные методы, использующие градиент изображения – операторы Прюитта, Собела, Шару, Лапласа (2-х видов), Лапласиан – Гауссианн, метод Хрящева и маска метода Канни (коэффициенты рассчитаны для среднеквадратического отклонения $\sigma = 1,4$) [1-3].

При оценке работы методов маскирования в качестве входных были использованы: реалистические изображения (цветные и полутоновые) одинаковых размеров и бинарные изображения в качестве GT-образов для данных реалистических изображений. При вычислении метрик сравнивались изображения – результат метода маскирования и бинарное GT изображение для обрабатываемого изображения.

При сравнении методов маскирования использовались предложенные объективные метрики качества (1) – (7), которые при всех своих недостатках по сравнению с субъективными методами оценки качества (основанными на оценке визуального качества обработки изображений) применимы в системах автоматической обработки изображений.

3. Результаты тестирования

В статье представлены оценки качества методов маскирования (входное изображение, результат обработки, расчётные значения метрик) для следующих изображений из базы [4, 5]: цветное и полутоновое реалистическое изображение “37073” с природным фоном, размером - 481x321 пикселей, разрешением 300x300 dpi, глубиной цвета 24bit и 8bit, и соответствующий ему GT – образ (рисунок, поз. а, б);

Результаты тестирования представляются в табличном и графическом виде. Пример обработки для полутоновых реалистических изображений (изображение “37073”) разными методами маскирования представлен на рисунке. В таблице даны рассчитанные значения метрик качества методов маскирования для реалистического изображения “37073” (жирным шрифтом выделены соответствующие минимальные и максимальные значения метрик).

В результате проведенных исследований распространенных методов маскирования можно сделать следующие выводы:

а) анализ значений метрик показывает несущественность цветности изображений для методов маскирования (сохраняется тенденция в работе методов “лучше - хуже”, незначительно изменяются значения показателей качества – не более 5 – 8 %);

б) лучшие показатели качества поиска контуров у метода Собела (значения $N_{\text{прав.}} = 150723$, $N_{\text{неправ.}} = 2078$, $RMSE = 0,116616411531842$, $PSNR = 18,6648065325059$);

в) лучшие показатели качества с точки зрения недобавления ложных контуров у метода Хрящева (значения ошибки 1-го рода $\alpha = 2,89383251944294E-5$ и специфичности $S_p = 0,999971061674806$) с одновременно наихудшими значениями характеристик пропуска реальных контуров и возникновения разрывов (ошибки 2-го рода $\beta = 0,955063117453348$ и чувствительности $S_e = 0,044936882546652$), что и подтверждается визуальной оценкой результата работы метода;

г) лучшие показатели качества с точки зрения пропуска реальных контуров и возникновения разрывов границ у метода Шару (ошибки 2-го рода $b = 0,001$ и чувствительности $S_e = 0,999$).

Метод Канни в среднем дает наиболее высокие значения метрик, однако не пригоден для использования в системах автоматической обработки изображений.

Результаты количественной оценки подтверждаются при визуализации результатов обработки тестовых изображений (рисунок).

Повысить качество обработки изображений возможно следующими способами:

1) предварительный анализ и обработка изображений, зависящая от результата анализа (фильтрация, повышение резкости, уменьшение шума). При этом повышаются качество обработки методами Хрящева, Лапласиана и маской метода Канни (все маски размером 5x5);

2) введение интеллектуальной обработки изображений, а именно:

а) проведение предварительного анализа фрагментов изображения по степени насыщенности их контурами (слабо-, средне- и сильно-насыщенные);

б) использование каскадной схемы выделения контуров с учетом класса фрагментов.

На первом каскаде – использовать метод, обеспечивающий непропуск реальных контуров (минимальное (максимальное) значение ошибки 2-го рода (чувствительности)).

На втором этапе – метод, обеспечивающий высокую локализацию и отсутствие разрывов в контурах (точное выделение граничных пикселей и их несмещенность), соответственно обеспечивающий минимальное (максимальное) значение ошибки 1-го рода (специфичности) и минимальное значение RMSE.

Для первого каскада предлагается использовать методы Собела, Шару или Лапласиана (LoG), для второго каскада – методы Лапласа 1, Собела или Хрящева.

Таким образом, не существует универсального метода маскирования, обладающего одинаково высокими значениями метрик, для разных видов изображений.

Основные достоинства и недостатки методов маскирования представлены в [1, 2,6].

4. Выводы

1. В результате тестирования методов маскирования с выполнением количественной оценки качества обработки изображений обосновано, что не существует универсального метода маскирования, обладающего одинаково высокими значениями метрик для изображений с разным наполнением их объектами (контурами). Доказано, что существующие методы являются эффективными только в пределах узкого класса изображений. В большинстве случаев оценка качества метода маскирования ограничивается только субъективной оценкой (визуальная оценка качества работы).

2. Проведенные экспериментальные оценки качества методов маскирования выявили следующее:

а) несущественность цветности изображений для методов маскирования (незначительно изменяются показатели качества – не более 8 %);

б) лучшие показатели качества поиска контуров у метода Собела (по значениям показателей N прав., N неправ., RMSE, PSNR);

в) лучшие показатели качества с точки зрения невнесения ложных контуров у метода Хрящева (значения ошибки 1-го рода и специфичности) с одновременно наихудшими значениями характеристик пропуска реальных контуров и возникновения разрывов (значения ошибки 2-го рода и чувствительности), что и подтверждается визуальной оценкой результата работы метода;

г) лучшие показатели качества с точки зрения непропуска реальных контуров и возникновения разрывов границ у метода Шару (значения ошибки 2-го рода и чувствительности);

3. Созданная методология применима в системах автоматической обработки изображений и базируется на интеллектуальной обработке изображений, а именно: предварительном анализе изображений по степени насыщенности их контурами с последующей классификацией: слабо-, средне- и сильно-насыщенные контурами; использование каскадной схемы обнаружения и выделения контуров в изображениях с учетом степени насыщенности их контурами.

Применение двухкаскадной технологии маскирования позволяет сократить время обработки и повысить точность маскирования, при этом позволяет устранить недостатки отдельно используемых методов с сохранением достоинств и преимуществ технологии маскирования в целом.

Список литературы: 1. Гонсалес Р.С., Вудс Р.Э. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с. 2. Prieto M.S., Allen A.R. A similarity metric for edge images, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2003. Vol. 25, № 10. P. 1265–1273. 3. Хрящев Д.А. Об одном методе выделения контуров на цифровых изображениях. // Вестник Астрахан. гос. тех. ун - та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатик. 2010. № 2. 4. *Caim* University of California Berkeley, Computer Vision Group. <http://>

www.eecs.berkeley.edu/Research. 5. Сайт лаборатории компьютерной графики ВМиК МГУ. <http://www.compression.ru>. 6. Баранник В.В. Анализ методов обнаружения границ объектов на изображениях и их классификация / В.В. Баранник, А.В. Власов // Сучасна спеціальна техніка. 2012. №3. С. 17 - 27.

Поступила в редколлегию 11.02.2013

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, проф., начальник кафедры Харьковского университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба. Научные интересы: технологии кодирования и обеспечения безопасности информации. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Сумская, 77/79. E-mail: Barannik_V_V@mail.ru.

Власов Андрей Владимирович, научный сотрудник научного центра Воздушных Сил Харьковского университета Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба. Научные интересы: технологии кодирования и обеспечения безопасности информации. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Сумская, 77/79.

Ширяев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры “Сети связи” ХНУРЭ. Научные интересы: обработка видеоданных, клиент-серверные и облачные архитектуры, администрирование и безопасность компьютерных сетей. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14.

УДК 621.391

О.С. КУЛИЦА

МЕТОДОЛОГИЯ УСТРАНЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЯХ КОМПРЕССИИ С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПОТЕРЕЙ КАЧЕСТВА

Проводится проблемная оценка особенностей функционирования технологий компрессии с контролируемой потерей качества реконструируемых изображений, влияющих на доступность и целостность видеoinформации. Обосновывается направление для разработки методов повышения доступности видеoinформации в системе воздушного мониторинга в заданных требованиях по ее целостности. Строится методология устранения избыточности в системах сжатия с контролируемой потерей качества, базирующаяся на технологиях сокращения структурной избыточности и исключения дополнительной служебной информации.

1. Введение

При решении задач, связанных с видеомониторингом кризисных объектов, важное место занимают комплексы воздушного видеонаблюдения [1 - 3]. Здесь встают вопросы, связанные с обеспечением заданной доступности и целостности видеoinформационных ресурсов [4]. В процессе обеспечения данных категорий информационной безопасности ключевую роль играют технологии компрессии изображений с контролируемой потерей качества [4; 5]. С одной стороны, это позволяет снизить время передачи сжатых данных по каналу связи, с другой – здесь существуют два недостатка, а именно: при увеличении размеров изображений до 4096x3072 элементов суммарное время на их обработку бортовыми средствами и передачу по каналу связи увеличивается до *нескольких минут*; устранение психовизуальной избыточности связано с внесением погрешностей в обрабатываемые изображения. Следующий проблемный недостаток механизма кодирования связан со сложностью процесса обработки трансформант. Использование в методах компрессии арифметических кодов связано со значительными вычислительными затратами. Еще один проблемный недостаток механизма устранения избыточности и формирования кодовых конструкций связан с влиянием на снижение целостности видеoinформации. Отсюда повышение доступности видеoinформации в условиях заданной ее целостности с использованием технологий компрессии изображений является *актуальной научно-прикладной задачей*.

Совершенствование технологий обработки требуется проводить в направлении: с одной стороны – снижения сложности процессов компактного представления; с другой – обеспечения заданного уровня достоверности получаемой информации. Для этого *предлагается*

www.eecs.berkeley.edu/Research. 5. Сайт лаборатории компьютерной графики ВМиК МГУ. <http://www.compression.ru>. 6. Баранник В.В. Анализ методов обнаружения границ объектов на изображениях и их классификация / В.В. Баранник, А.В. Власов // Сучасна спеціальна техніка. 2012. №3. С. 17-27.

Поступила в редколлегию 11.02.2013

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, проф., начальник кафедры Харьковского университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба. Научные интересы: технологии кодирования и обеспечения безопасности информации. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Сумская, 77/79. E-mail: Barannik_V_V@mail.ru.

Власов Андрей Владимирович, научный сотрудник научного центра Воздушных Сил Харьковского университета Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба. Научные интересы: технологии кодирования и обеспечения безопасности информации. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Сумская, 77/79.

Ширяев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры “Сети связи” ХНУРЭ. Научные интересы: обработка видеоданных, клиент-серверные и облачные архитектуры, администрирование и безопасность компьютерных сетей. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14.

УДК 621.391

О.С. КУЛИЦА

МЕТОДОЛОГИЯ УСТРАНЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЯХ КОМПРЕССИИ С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПОТЕРЕЙ КАЧЕСТВА

Проводится проблемная оценка особенностей функционирования технологий компрессии с контролируемой потерей качества реконструируемых изображений, влияющих на доступность и целостность видеoinформации. Обосновывается направление для разработки методов повышения доступности видеoinформации в системе воздушного мониторинга в заданных требованиях по ее целостности. Строится методология устранения избыточности в системах сжатия с контролируемой потерей качества, базирующаяся на технологиях сокращения структурной избыточности и исключения дополнительной служебной информации.

1. Введение

При решении задач, связанных с видеомониторингом кризисных объектов, важное место занимают комплексы воздушного видеонаблюдения [1 - 3]. Здесь встают вопросы, связанные с обеспечением заданной доступности и целостности видеoinформационных ресурсов [4]. В процессе обеспечения данных категорий информационной безопасности ключевую роль играют технологии компрессии изображений с контролируемой потерей качества [4; 5]. С одной стороны, это позволяет снизить время передачи сжатых данных по каналу связи, с другой – здесь существуют два недостатка, а именно: при увеличении размеров изображений до 4096x3072 элементов суммарное время на их обработку бортовыми средствами и передачу по каналу связи увеличивается до *нескольких минут*; устранение психовизуальной избыточности связано с внесением погрешностей в обрабатываемые изображения. Следующий проблемный недостаток механизма кодирования связан со сложностью процесса обработки трансформант. Использование в методах компрессии арифметических кодов связано со значительными вычислительными затратами. Еще один проблемный недостаток механизма устранения избыточности и формирования кодовых конструкций связан с влиянием на снижение целостности видеoinформации. Отсюда повышение доступности видеoinформации в условиях заданной ее целостности с использованием технологий компрессии изображений является *актуальной научно-прикладной задачей*.

Совершенствование технологий обработки требуется проводить в направлении: с одной стороны – снижения сложности процессов компактного представления; с другой – обеспечения заданного уровня достоверности получаемой информации. Для этого *предлагается*

на базе методов с контролируемой потерей качества изображений разработать подходы для увеличения степени сжатия видеоданных при заданных требованиях относительно вычислительной сложности алгоритмов обработки и уровня достоверности получаемой информации. Поэтому *цель исследования* заключается в разработке методологии устранения избыточности видовых изображений для технологий сжатия с контролируемой потерей качества.

2. Построение методологии устранения избыточности в технологиях сжатия с контролируемой потерей качества реконструируемых изображений

Рассмотрим возможность совершенствования технологий кодирования. Здесь возможны следующие варианты относительно увеличения степени сжатия:

1. Проводить дальнейшее развитие статистических методов кодирования. Однако такое направление имеет ограниченные возможности, обусловленные увеличением времени на обработку и ростом количества разрядов на представление служебной информации.

2. Совершенствовать выявление дополнительных возможностей для сокращения психовизуальной избыточности. Однако такой вариант связан со снижением разрешающей способности снимков и, как следствие, снижением целостности видеоинформации в процессе решения задач мониторинга.

3. Организовывать распределение количества разрядов для кодового представления компонент трансформант, используя механизмы, не связанные с предварительной оценкой вероятности их появления.

Значит, существует необходимость исследования возможности относительно увеличения коэффициента сжатия для методов, использующих ортогональные преобразования, за счет выявления новых закономерностей и устранения избыточности не только статистической и психовизуальной природы. Для этого *предлагается*: дополнительно выявлять в трансформированные изображения структурных закономерностей; реализовывать процесс кодирования с использованием блочной схемы, что позволит реализовывать конвейерные и параллельные схемы.

Динамический диапазон трансформанты H двумерного ортогонального преобразования оценивается по двум направлениям:

1) в направлении строк трансформанты величина d_k динамического диапазона зависит от разности между максимальным $h_{k,max}$ и $h_{k,min}$ минимальными значениями компонент в k -й строке;

2) в направлении столбцов величина d_ℓ динамического диапазона ℓ -го столбца трансформанты определяется разностью между максимальным $h_{\ell,max}$ и $h_{\ell,min}$ минимальными значениями компонент ℓ -го столбца.

В силу неоднородности структуры трансформанты в общем случае выполняется условие

$$d_k \neq d_\ell. \quad (1)$$

В связи с этим для сокращения динамического диапазона и повышения уровня адаптивности относительно структурного содержания трансформанты предлагается оценивать его значения $d_{k\ell}$ для каждой компоненты в отдельности с учетом условия (1). Для этого используется следующая формула:

$$d_{k\ell} = \min(d_k; d_\ell). \quad (2)$$

Для выявления структурных закономерностей *предлагается* трансформанту рассматривать как комбинаторный объект, а именно как перестановку с повторениями, на компоненты $h_{k\ell}$ которой наложены ограничения на динамический диапазон $d_{k\ell}$.

Поскольку выполняется условие $h_{k\ell} < d_{k\ell}$, то можно сделать предположение относительно наличия структурной избыточности. В данном случае количество структурной избыточности в трансформанте определяется разницей между количеством информации, приходящимся в среднем на одну компоненту, до и после учета ограничений на динамический диапазон трансформанты.

До выявления ограничений на динамический диапазон трансформанты значения ее компонент изменялись в диапазоне $h_{k\ell} = 0, d-1$, где d – динамический диапазон трансформанты, определяемый как $d = \max_{\substack{1 \leq k \leq n \\ 1 \leq \ell \leq n}} (h_{k\ell})$. Количество $V_{n \times n}^{(2)}$ перестановок с повторениями, т.е. количество различных массивов размерностью $(n \times n)$, составленных из элементов в диапазоне $h_{k\ell} = \overline{0, d-1}$, определяется как $V_{n \times n}^{(2)} = \prod_{k=1}^n \prod_{\ell=1}^n d = d^{n^2}$.

Соответственно количество информации \overline{Q}_2 , приходящееся в среднем на одну компоненту, оценивается по формуле

$$\overline{Q}_2 = \log_2 V_{n \times n}^{(2)} / n^2 = \log_2 d. \quad (3)$$

После выявления ограничений компоненты трансформанты будут изменяться в диапазоне $h_{k\ell} = \overline{0, d_{k\ell}-1}$. Отсюда количество $V_{n \times n}'^{(2)}$ перестановок трансформанты и количество информации \overline{Q}'_2 на одну компоненту будут соответственно оцениваться по следующим выражениям:

$$V_{n \times n}'^{(2)} = \prod_{k=1}^n \prod_{\ell=1}^n d_{k\ell}; \quad (4)$$

$$\overline{Q}'_2 = \log_2 V_{n \times n}'^{(2)} / n^2 = (\log_2 \prod_{k=1}^n \prod_{\ell=1}^n d_{k\ell}) / n^2 = (\sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n \log_2 d_{k\ell}) / n^2. \quad (5)$$

Поскольку выполняются неравенства $d_{k\ell} = \max_{1 \leq k \leq n} (h_{k\ell}) \leq d$ и $d_k = \max_{1 \leq \ell \leq n} (h_{k\ell}) \leq d$, то тем более выполняется соотношение $d_{k\ell} \leq d$. Значит, можно заключить, что трансформанты двумерного ортогонального преобразования обладают структурной избыточностью, суммарное количество R_2 которой оценивается по формуле $R_2 = n^2 \log_2 d - (\sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n \log_2 d_{k\ell})$. Это позволяет организовать подход для сжатия изображений без потери их качества на основе сокращения структурной избыточности.

Для устранения недостатков, связанных с поэлементным кодированием и поточной схемой обработки, *предлагается* организовывать формирование кодовых конструкций с использованием блочной схемы. Для такого варианта код $N_j \in N$ формируется целиком для всей кодируемой последовательности $H_j \in H$. В этом случае код формируется только целиком, а не по частям, как для поточной схемы (рисунок).

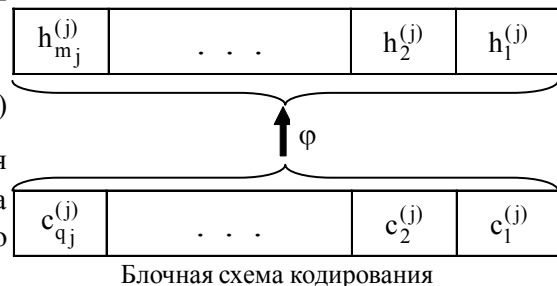
Вариантом построения такого механизма является полиадическое кодирование. Если задана двумерная система оснований $\Lambda^{(2)}$, то трансформанта представляет собой двумерное полиадическое число. Согласно соотношению (2) основания $\lambda_{k\ell}$ числа для предложенной интерпретации предлагается выбирать равными величинам динамических диапазонов $d_{k\ell}$ компонент трансформант, т.е. $\lambda_{k\ell} = d_{k\ell}$. Формирование кода $N^{(2)}$ для двумерного полиадического числа H с учетом заданной системы оснований $\Lambda^{(2)}$ определяется

соотношением [4]: $N^{(2)} = \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n h_{k\ell} V_{k\ell}^{(2)}$, где $V_{k\ell}^{(2)}$ – весовой коэффициент компоненты $h_{k\ell}$.

Значения весовых коэффициентов $V_{k\ell}^{(2)}$ элементов массивов будут равны:

$$V_{k\ell}^{(2)} = \prod_{\eta=k+1}^n d_{\eta,\ell} \prod_{\xi=\ell+1}^m \prod_{\eta=1}^n d_{\eta,\xi}. \quad (6)$$

где m – количество столбцов в выборке, для которой формируется код; $(k; \ell)$ – координата позиции старшего элемента полиадического числа.



Блочная схема кодирования

Покажем, что в результате полиадического кодирования сокращается количество структурной избыточности трансформанты. Для этого обоснуем выполнение неравенства

$$N^{(2)} < V_{n \times n}^{(2)} = \prod_{k=1}^n \prod_{\ell=1}^n d_{k\ell}. \quad (7)$$

Преобразуем левую часть выражения (7), учитывая ограничения на динамический диапазон компонент, т.е. $h_{k\ell} = \overline{0, d_{k\ell} - 1}$: $N^{(2)} = \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n h_{k\ell} V_{k\ell}^{(2)} \leq \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n (d_{k\ell} - 1) V_{k\ell}^{(2)}$.

Тогда используя соотношение $d_{1,1} V_{1,1}^{(2)} = V_{n \times n}^{(2)}$, получаем следующее неравенство

$$N^{(2)} = \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n h_{k\ell} V_{k\ell}^{(2)} \leq V_{n \times n}^{(2)} - 1. \text{ Следовательно, неравенство (7) выполняется, откуда мож-}$$

но заключить, что $\sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n \log_2 d_{k\ell} - \log_2 N^{(2)} > 0$. Значит, тем более выполняется условие

$$n^2 \log_2 d - \left(\sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n \log_2 d_{k\ell} \right) < n^2 \log_2 d - \log_2 N^{(2)}. \text{ Левая часть неравенства указывает на}$$

наличие количества R_2 структурной избыточности в трансформанте с учетом выявления закономерностей в динамических диапазонах ее компонент. Правая часть неравенства указывает на соотношение между количеством разрядов на представление кода полиадического числа и его верхней границы. Поэтому можно сделать вывод о том, что в результате полиадического кодирования трансформант устраняется структурная избыточность.

3. Выводы

1. На основе особенностей формирования трансформант для различных классов изображений доказана потенциальная возможность дополнительного повышения степени сжатия путем их описания двумерными полиадическими числами.

2. Обосновано, что в результате полиадического кодирования трансформант обеспечивается: сокращение структурной избыточности, обусловленной с одной стороны коррелированностью областей изображений, а с другой стороны - наличием ограниченного количества мелких объектов; исключение дополнительной служебной информации, указывающей на позиции кодов отдельных элементов.

Список литературы: 1. *Лабутина И.А.* Дешифрование аэрокосмических снимков: Учебное пособие. М.: Аспект-Пресс, 2004. 184 с. 2. *Кашкин В.Б.* Цифровая обработка аэрокосмических изображений: Конспект лекций. Красноярск: ИПК СФУ, 2008. 121 с. 3. *Barannik V.* Image Encoding Design Based On 2-D Combinatory Transformation / V. Barannik., V. Hahanov // International Symposium [IEEE East-West Design & Test], (Yerevan, Armenia, September 7 – 10, 2007) / Yerevan: 2007. P. 124 – 127. 4. *Баранник В.В.* Методологический анализ системы аэрокосмического видеомониторинга чрезвычайных ситуаций / В.В. Баранник, А.В. Яковенко, А.Ю. Школьник // Сучасна спеціальна техніка, Киев, 2011. №4(27). С. 12 – 22. 5. *Баранник В.В.* Структурно-комбинаторное представление данных в АСУ / В.В. Баранник, Ю.В. Стасев, Н.А. Королева. Х.: ХУПС, 2009. 252 с.

Поступила в редколлегию 19.01.2013

Кулица Олег Сергеевич, адъюнкт Академии пожарной безопасности имени Героев Чернобыля. Научные интересы: система и технология безопасности информации. Адрес: Украина, 18000, Черкассы, ул. Оноприенко, 8, тел.: 097-66-41-387

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Рассматриваются модели и методы, которые используются для интеллектуальных решений при ликвидации последствий чрезвычайных природных ситуаций. Предлагаемые решения учитывают многокритериальность и неопределенность исходной информации. В динамической модели поиска рациональных решений для ликвидации последствий чрезвычайной природной ситуации используется сеть Петри.

1. Введение

В настоящее время для жизнедеятельности человека в природной сфере постоянно возникают опасности и угрозы. В первую очередь это так называемые чрезвычайные природные ситуации (ЧПС). Под ЧПС принято понимать нарушение устойчивого состояния окружающей природной среды, которое под воздействием метеорологических и других внешних факторов, включая деятельность человека, приобретает катастрофическое развитие, каскадное возникновение чрезвычайных ситуаций или непрекращающийся рост (превышение скорости изменения состояния вышедшего допустимого значения), что приводит к экономическим, социальным и людским потерям.

Обычно ЧПС возникает спонтанно (с большой скоростью распространения катастрофических событий и непрогнозируемыми масштабами их развития, при этом характерна многокритериальность, нечеткость и неполнота знаний об источниках и сценариях развития ЧПС). Кроме того, ЧПС характеризуется стохастичностью (в первую очередь это связано с синергетикой окружающей среды, в которой возникает ЧПС, при этом появляется множество противоречивых или неточных данных и сведений). Также надо учитывать восприятие человеком ЧПС и поведение лица, принимающего решение (ЛПР) в чрезвычайной ситуации (зачастую сказывается неразбериха в межведомственных и административных связях, человеческий фактор при взятии на себя ответственности за принятые решения, паника и неадекватное поведение людей, внимательность при совершении действий и многое другое).

Результатом ЧПС является вред, который наносится природе, человеку, объектам экономики, социальной сфере, окружающей природной среде. В этой связи актуальным есть мониторинг и прогнозирование ЧПС - наблюдение, контроль, предвидение опасных процессов и явлений природы и являющихся источниками чрезвычайных ситуаций. Кроме этого, необходимо исследовать динамику развития чрезвычайных ситуаций, определить ее масштаб в целях решения оценки сценариев развития ЧПС.

Цель исследования - при организации ликвидации последствий ЧПС предоставить в распоряжение ЛПР методы поиска рациональных решений в условиях неопределенности и многокритериальности, разработать динамические модели оценки последствий ЧПС для интеллектуальной системы принятия решений (ИСПР).

Задачи для достижения цели. При разработке ИСПР для организации ликвидации последствий ЧПС широко используются разнообразные математические модели и методы системного анализа и синтеза сложных систем: нечеткая логика, нейронные сети, когнитивное моделирование, вывод по прецедентам, ситуационный анализ и многое другое [1]. Проводимое исследование связано с анализом функциональных задач и выбором информационных, организационных и материальных ресурсов для ликвидации последствий ЧПС. В работе в первую очередь решается задача выбора таких методов и моделей, которые были бы адаптивными к практическим условиям последствий ЧПС и учитывали особенности неопределенности и многокритериальности рассматриваемой проблемы.

Требования к методам и моделям ИСПР определяются противоречиями между полнотой, своевременностью и оптимальностью решений для принятия наилучшего решения при ликвидации последствий ЧПС. Противоречивость требований вызывает необходимость более полного учета внутренних и внешних факторов. В условиях неполноты знаний о взаимовлиянии факторов, неточности их измерения, случайных внешних и внутренних воздействиях необходимо, кроме многокритериальности рассматриваемой проблемы, учитывать неопределенность внутренних и внешних факторов ЧПС.

Большинство исследователей пришли к выводу, что необходимо использовать гибридные методы анализа и синтеза ИСПР. При этом для решения комбинируют не только математические модельные представления проблемы, но и различные интеллектуальные методы искусственного интеллекта [1]. Приводимые в этой работе результаты посвящены обоснованию и выбору некоторых методов и моделей для решения задач принятия интеллектуальных решений при ликвидации последствий ЧПС.

В качестве исходных данных для исследования берутся нормативные акты МЧС по действиям персонала в условиях предотвращения и ликвидации ЧПС [1], документы, стандартизирующие вывод и представление информации для ЛПП, объективные количественные и качественные данные о контролируемой в заданном районе проблемной ситуации. Кроме этого, используется база данных и знаний о прецедентах, квантах знаний и микроситуаций [1].

2. Основное содержание

Направление исследования для анализа ЧПС и синтеза систем управления ИСПР включает этапы: формирование цели и задач анализа, методика информационного, функционального и структурного анализа, выработка обоснованных предложений по совершенствованию структуры системы управления ИСПР и алгоритма её функционирования.

В этой работе для исследования выделяются задачи поиска решений $\{Zps\}$ для интеллектуальной системы принятия решений при ликвидации последствий ЧПС. При этом необходимо определить соответствующие требования к структуре ИСПР $\{Str\}$ в рамках использования GRID-технологии. ИСПР должна применять сервисы GRID-системы, ее внутреннюю систему моделирования, прогнозирования и безопасности объектов контроля, получать сигналы и извещения; а также иметь возможность передавать управляющие воздействия. Необходимо предусмотреть не только автоматическое оповещение о возможности возникновения или инициализации ЧПС ЛПП, но и передать информацию о возможном сценарии развития ЧПС на основе оценки факторов риска, моделей распространения ЧПС, вхождение в модели новых опасных сценариев.

Кроме этого, необходимо выделить оптимальные процедуры разработки ИСПР $\{Pr\}$ (в смысле удовлетворения соответствующим показателям качества $\{Pk\}$), которые должны привести к реализации наиболее эффективной структуры обеспечивающего комплекса ИСПР $\{Str\}$ в рамках GRID – системы. При этом комплектующие элементы и подсистемы Str_i ($i = \overline{1, K}$) обеспечивающего комплекса ИСПР должны наилучшим образом реализовывать требования и характеристики статистической и лингвистической моделей ЧПС $\{Mod\}$, методов разработки $\{Met\}$, алгоритмов поиска решений $\{Alg\}$ как для проектирования ИСПР, так и для анализа ситуации и обеспечивать принятие наилучших решений для ликвидации последствий ЧПС. В этом случае справедливо для решения комплекса всех задач Z и поиска наиболее рациональных вариантов для принятия решений $\{Zps\}$ при ликвидации последствий ЧПС и разработки структуры ИСПР $\{Str\}$ представить в следующем виде:

$$\{Met, Alg, Prog, Mod, Zps, Pk\} \xrightarrow{\{Pr\}} \{Str\}, \{Str_i \in Str\}, i = \overline{1, K},$$

$$Pk^e = \underset{Met^e \in Met}{extr} \underset{Alg^e \in Alg}{extr} \underset{Prog^e \in Prog}{extr} \underset{Mod^e \in Mod}{extr} \underset{Zps^e}{extr} Pk(Met^e, Alg^e, Prog^e, Mod^e, Zps^e), \quad (1)$$

где Met^e - e -й метод разработки ИСПР, $e = \overline{1, E}$; Alg_j^e - j -й алгоритм алгоритмического, обеспечивающего комплекса ИСПР для e -го метода разработки ИСПР, $j = \overline{1, J}$; среди методов и алгоритмов можно выделить: методы максимального правдоподобия, минимизации байесовского риска и группового учета аргументов (МГУА), обычный и взвешенный метод наименьшей квадратичной ошибки (МНК), гребневые, робастные и рекуррентные процедуры, нейронные сети, генетические алгоритмы, адаптивные и другие процедуры [1]; $Prog_{\varphi_j}^e$ - φ - я программа программного, обеспечивающего комплекса ИСПР для реализации j -того алгоритма в e -м методе разработки ИСПР, $\varphi = \overline{1, \Pi}$; Mod_t^e - t - я модель природной среды в e -м методе разработки ИСПР, $t = \overline{1, T}$; Zad_{η}^e - η - я задача контроля и прогнозирования природной среды для e -го метода разработки ИСПР, $\eta = \overline{1, Z}$; Pk^e - показатель качества обеспечивающего комплекса ИСПР для e -го метода разработки ИСПР.

При *информационном анализе* ЧПС необходимо выполнить идентификацию и прогнозирование опасностей контролируемой территории, оценить степени уязвимости населения, территории и экономики от их воздействия. Кроме того, оценить количество и качество информации мониторинга, которая отображает состояние опасностей исследуемой территории.

Использование разработанного подхода позволяет количественно оценить существующие риски возникновения и развития ЧПС, выбрать наиболее эффективные направления по их минимизации и предотвращению ущерба, а также получить прогнозные (модельные) оценки в ситуации на контролируемых объектах с возможностью формирования сценариев развития ЧПС.

Для реализации требований и характеристик статистических и лингвистических моделей ЧПС $\{Mod\}$, методов разработки $\{Met\}$, алгоритмов поиска решений $\{Alg\}$ как для проектирования ИСПР, так и для анализа ситуации и обеспечения принятия наилучших решений для ликвидации последствий ЧПС необходимо использовать вероятностную оценку причинно-следственных связей и событий.

Для динамического моделирования ситуаций в ИСПР при выборе рациональных решений ЛПР в условиях ликвидации последствий ЧПС можно исследовать возможность использования диаграммы влияния. Диаграмма влияния относится к классу семантических функциональных сетей. Такие сети являются графами, но отличаются дополнительной информацией, содержащейся в их узлах и дугах (ребрах), которые представляют так называемые сети стохастической структуры типа Петри. Практическое применение сетей Петри основывается на следующих преимуществах:

- а) возможность объединения логических и графических способов представления исследуемых событий;
- б) учет стохастичности информации, выраженной узлами и дугами;
- в) доступность для моделирования параллельно протекающих, циклических и многократно наблюдаемых процессов;
- г) наибольшие (по сравнению с другими типами диаграмм) логические возможности – в смысле строгости, компактности и простоты корректировки условий наблюдения моделируемых событий и явлений [2].

Для решения поставленной задачи стохастическая функциональная сеть имеет четыре типа символов – источник, сток, метка или планка и статистика. Раскраска, т.е. использование разноцветных маркеров, позволяет учесть разнородность состояний окружающей среды и объектов контроля при возникновении ЧПС. Кроме того, в сети учитывается множество признаков моделируемых ситуаций в зоне действия ЧПС.

Отдельные элементы стохастических дискретных динамических сред ЧПС при моделировании могут не иметь физического смысла и использоваться лишь для указания

логической последовательности реализации моделируемого процесса. В сетевой модели применяется возможность моделирования причинно-следственных связей между событиями параллельных и конфликтных ситуаций. В результате применения такой сети можно провести оценку временных и случайных характеристик протекающих процессов.

Для осуществления функций управления при ликвидации последствий чрезвычайной ситуации и анализа развития ЧПС предлагается использовать метод принятия управленческих решений, основанный на применении языка модифицированных сетей Петри, в дальнейшем именуемых обобщенными сетями Петри [2].

Объектом моделирования ЧПС является некоторая территория (область, промышленный район) с ее инфраструктурой. В качестве элементов модели выделим опасные объекты, которые в результате возникновения ЧПС могут привести к каскадному развитию чрезвычайной ситуации. Необходимо выделить те объекты, которые нужно защищать в первую очередь. В распоряжении ЛПР находятся объекты или ресурсы для ликвидации последствий ЧПС. Перечисленные выше объекты в зависимости от необходимой детализации могут представляться множеством элементов, из которых состоит объект. Элементы объекта в модели связаны между собой информационными и транспортными магистралями (сеть дорог), причем каждая связь имеет свои характеристики и геоинформационную привязку. В предлагаемой модели учитываются также последствия тех или иных разрушительных или вредных причин, вызванных возникновением ЧПС.

Динамические свойства предлагаемой модели позволяют учитывать изменения окружающей среды и выделенных выше объектов в зависимости от времени. Таким образом, в ИСПР исследуются различные сценарии развития ЧПС и возможности ликвидации ее последствия необходимыми ресурсами.

Важной составляющей в ИСПР является база знаний прецедентов с микроситуационным представлением квантов знаний о подобных чрезвычайных ситуациях и набором удачных или рациональных средств ликвидации последствий, возникшей в контролируемой зоне ЧПС [1,3].

Формально модель контролируемой территории, на которой может произойти ЧПС, с точки зрения выбора рациональных методов и средств ликвидации последствий ЧПС будет иметь множество потенциально опасных участков $Zon^0 = \{Zon_1^0, Zon_2^0, \dots, Zon_i^0, \dots, Zon_n^0\}$ (ущелий, стоков воды, участков, подвергаемых затоплению при наводнении, сейсмически опасных участков территории).

Каждый объект Zon_i^0 (в контролируемой зоне) из множества $Zon^0 = \{Zon_1^0, Zon_2^0, \dots, Zon_i^0, \dots, Zon_n^0\}$ может быть описан вектором контекстных характеристик, которые содержат данные о типе объекта, его местоположении, занимаемой им площади, количестве людей, типе потенциальной опасности и масштабе последствий возможных ЧС и т. п. В модели представлено множество объектов, защищаемых от возможных каскадных проявлений ЧПС - $Zon^z = \{Zon_1^z, Zon_2^z, \dots, Zon_j^z, \dots, Zon_m^z\}$, которые описываются векторами, содержащими данные о типе объекта, его геоинформационном контексте площади, находящихся на нем людях.

Для ликвидации последствий ЧПС в модели учтены объекты, входящие в силы и средства, используемые для ликвидации последствий ЧПС $Res^c = \{Res_1^c, Res_2^c, \dots, Res_y^c, \dots, Res_r^c\}$. Объекту Res_y^c соответствует вектор характеристик, описывающий тип объекта, его местоположение, наличные ресурсы, специфику. Как уже было отмечено выше, в ИСПР при моделировании сценариев ликвидации последствий ЧПС учитывается прецедентная база микроситуационных квантов знаний, которые в подобных ЧПС приводили к наиболее рациональным и удачным решениям – Tex_{Rez} . Множество Tex_{Rez^c} отражает технические средства, которые размещены на контролируемом объекте и предназначены для использования в случае наступления ЧПС. Кроме указанных множеств, в модели может быть представлена вся технoструктура, которая обеспечивает ликвидацию последствий возникших ЧПС. К таким объектам могут быть отнесены объек-

ты обслуживания Res^{Ob} , места дислокации транспортных средств, спасательной и строительной техники Res^{Tr} , ситуационные центры управления Res^{Sitic} . Каждый из выделенных объектов характеризуются определенными параметрами и характеристиками. Для моделирования информационной сети можно задать граф N , вершинами которого являются элементы множества

$$Ob = Zon^0 \subset Zon^z \subset Res^c \subset Res^{Ob} \subset Res^{Tr} \subset Res^{Sitic} \subset Tex_{Rez} \subset Tex_{Rez^c},$$

две вершины соединены дугой, если между объектами существует прямой канал связи. Дуги графа помеченные, метка определяет тип связи между объектами.

Так как база микроситуационных квантов знаний ИСПР имеет вид графа N , то для определения вероятности наступления причинно-следственного события нам нужна сумма вероятностей всех его предикатов. Предикатами в графе выступают узлы, из которых мы можем попасть в данный узел. При этом данный узел также может выступать в роли предиката, если из него есть путь в любой другой узел. Таким образом, нам необходимо найти все возможные пути из одного узла в другой, определить вероятность каждого маршрута и затем сложить эти вероятности. Так мы получим вероятность наступления одного события при условии выполнения события-предиката. Чтобы получить общую вероятность наступления события, нам необходимо сложить вероятности наступления этого события, взяв в качестве предиката каждый из узлов графа, из которого можно попасть в наш результирующий узел.

Таким образом, мы можем выделить основную задачу в данной ситуации – поиск всех возможных маршрутов из одного узла в другой. Для этого воспользуемся рекурсивным поиском в глубину.

Поиском в глубину называется способ обхода вершин графа, который, начавшись от какой-либо вершины, рекурсивно применяется ко всем вершинам, в какие можно попасть из текущей. Пусть граф с N вершинами задан матрицей смежности $A[N][N]$. Создадим одномерный массив `int visited[N]` и заполним его нулями, считая, что ни одна вершина до начала выполнения алгоритма не была посещена. Функция обхода записывается следующим образом:

```
void go(int curr) {
    visited[curr] = 1; /* помечаем текущую вершину как пройденную */
    for (int i = 0; i < N; i++)
        if (!visited[i] && A[curr][i])
            go(i);
}
...
/* в тексте программы */
go(start);
```

Распишем подробно, как будет работать алгоритм на графе, изображенном на рис. 1. Пусть `start = 1`, т.е. начинаем с первой вершины.

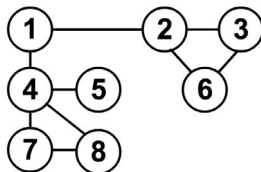


Рис. 1. Исходный граф для демонстрации алгоритма поиска в глубину

При вызове `go(1)` первая вершина помечается как пройденная (`visited[1] = 1`), и в цикле по i перебираются все вершины, куда можно попасть из текущей (т.е. из первой). При $i = 2$ видим, что во второй вершине мы не были (`visited[2] == 0`) и что в графе есть ребро, соединяющее первую вершину и вторую, следовательно, рекурсивно вызываем ту же функцию `go(int curr)` с параметром `curr`, равным 2. Аналогично, `go(2)` вызывает `go(3)`, а последняя вызывает `go(6)`. Здесь мы обнаруживаем, что из шестой вершины некуда идти:

и во второй, и в третьей мы уже побывали. Следовательно, $go(6)$ дорабатывает до конца, а за ней заканчиваются $go(3)$ и $go(2)$. Таким образом, мы оказываемся в функции $go(1)$ в конце цикла for при $i = 2$ (рис. 2).

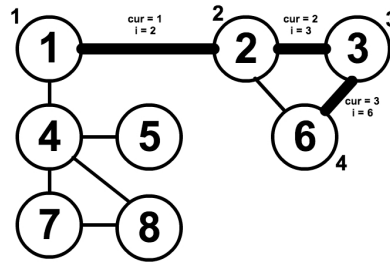


Рис. 2. Порядок обхода вершин в демонстрации алгоритма поиска в глубину

Цикл for в $go(1)$ продолжает работу, и при $i = 4$ мы уходим в рекурсию $go(4)$ и т.д., пока управление снова не вернется в $go(1)$ (и произойдет выход из функции, т.к. больше нет непосещенных вершин, связанных ребром с первой). Окончательная картина показана на рис.3.

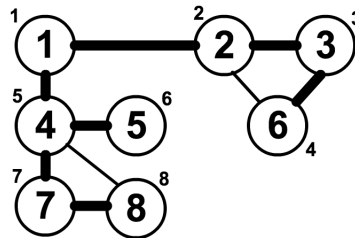


Рис. 3. Окончательный порядок обхода вершин в демонстрации алгоритма поиска в глубину

В результате работы алгоритма все вершины графа оказались пройденными (при условии, что граф связный). Необходимо отметить, что ребра, по которым мы «ходили» — так называемые прямые ребра (они выделены жирным) — образуют один из возможных каркасов исходного графа.

Кроме того, для решения той же задачи можно воспользоваться и поиском в ширину.

При поиске в ширину вместо стека рекурсивных вызовов хранится очередь, в которую записываются вершины в порядке удаления от начальной. Введем массив $int\ visited[N]$, а также создадим очередь для хранения вершин (реализуем ее в виде простого массива; естественно, возможны другие варианты). В начало очереди запишем начальную вершину:

```
int queue[N];
queue[0] = start;
visited[start] = 1;
int r = 0, w = 1;
```

Переменная r будет указывать позицию очереди, из которой мы читаем данные, переменная w — позицию, куда данные будем писать. Тогда обход может быть написан следующим образом:

```
while (r < w) {
    int curr = queue[r++];
    for (int i = 0; i < N; i++) {
        if (!visited[i] && A[curr][i]) {
            visited[i] = 1; queue[w++] = i;
        }
    }
}
```

Находясь в первой вершине, в очередь добавляются вторая и четвертая (они удалены от первой на расстояние $d = 1$). Затем из очереди читается очередной элемент (только что добавленная вторая вершина) и добавляются вершины, в которые можно попасть из второй: третья и шестая. То же самое делается для следующей в очереди вершины (четвертой): в очередь добавляются вершины 5, 7 и 8. Так как все вершины графа уже оказались пройденными, больше в очередь ничего добавлено не будет, и алгоритм завершится после чтения из очереди последней вершины (8).

Цифрами на рис. 4 помечен порядок обхода вершин при поиске в ширину. Так как вершины перебираются в порядке удаления от начальной, работу алгоритма можно представить в виде набегающей волны, что и дает ему второе название: «метод волны».

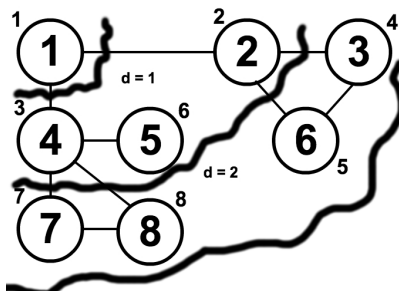


Рис. 4. Порядок обхода вершин в демонстрации алгоритма поиска в ширину

Для каждого из маршрутов, имея оценку вероятности маршрута, мы можем получить вероятность нескольких маршрутов одновременно. Таким образом, можем оценить общую вероятность для нескольких маршрутов из одного предиката или даже общую вероятность из нескольких предикатов. Для этого нам нужно найти сумму вероятностей событий.

Определение 1. Суммой событий A и B называется событие $A + B$, которое наступает тогда и только тогда, когда наступает хотя бы одно из событий: A или B .

Определение 2. Вероятность появления одного из двух несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A + B) = P(A) + P(B).$$

Заметим, что это справедливо для любого числа несовместных событий:

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i).$$

Определение 3. Если случайные события A_1, A_2, \dots, A_n образуют полную группу несовместных событий, то имеет место равенство

$$P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = 1.$$

Определение 4. Если задать в качестве результирующего узла не один узел, а несколько, то можно не только определить вероятность наступления того или иного события, а и найти наиболее оптимальные действия по ликвидации последствий ЧПС, которые стоит предпринять основываясь на выборе событий, имеющих самую большую вероятность. Значит, если мы определили, что наступление некоего события наиболее вероятно, чем всех остальных, то мы можем предложить действия, которые следует предпринять для ликвидации последствий этого события еще до его наступления. Таким образом, возможно выполнить некоторые подготовительные меры для предотвращения последствий ЧПС и снизить всевозможные риски потерь от его действия.

Утверждение. Наиболее оптимальным при ликвидации последствий ЧПС есть решение, которое определяется для события с наибольшей вероятностью, или же несколько решений, близких к высокой вероятности. Близость определяется из расчета заданного экспертом уровня близости.

В целом в предлагаемой модели в терминах сетей Петри каждому объекту, представленному в виде контролируемой зоны – Zon_i^0 на множестве Zon^0 , можно поставить в соответствие фрагмент тривиальной сети, состоящий из составного перехода $t_{Zon_i^0}$ и его входной и выходной позиций $P_{Zon_i^0}^{BX}$ и $P_{Zon_i^0}^{BЫX}$, причем

$$F\left(P_{Zon_i^0}^{BX}, t_{Zon_i^0}\right) = 1, F\left(P_{Zon_i^0}^{BЫX}, t_{Zon_i^0}\right) = 1 \text{ и } H\left(t_{Zon_i^0}, P_{Zon_i^0}^{BЫX}\right) = 1.$$

Такая сеть N моделирует технологические взаимосвязи между элементами объекта Zon^0 либо функциональные взаимосвязи между различными влияющими на возникновение ЧПС факторами и их последствиями, которые возможны при возникновении в заданной контролируемой зоне ЧПС. Для Zon_i^0 сеть $N_{Zon_i^0}$ состоит из одной позиции $P_{Zon_i^0}$ и

входного и выходного переходов. Каждому типу фактора, влияющего на возникновение ЧПС, соответствует множество цветов маркеров $\Omega^{vf} = \{\omega_k^{vf(l)}\}$, где k – индекс типа влияющего на возникновение ЧПС фактора, а l – его интенсивность. До возникновения ЧПС объект Zon_i^0 в позиции $P_{Zon_i^0}$ сети $N_{Zon_i^0}$ находится маркер цвета $\omega_0^{vf} \in \Omega^{vf}$, который не пропускается выходным переходом сети $N_{Zon_i^0}$. Наступление ЧПС моделируется заменой маркера цвета ω_0^n на маркер цвета $\omega_k^{nf(l)}$, соответствующий типу и категории сложности наступившей ЧПС. Если для моделируемого объекта заданы функциональные взаимосвязи между влияющими на возникновение ЧПС факторами и их последствиями, т. е. сеть $N_{Zon_i^0}$ не тривиальна, работа сети в общем случае порождает набор маркеров цветов $\{\omega_{k_1}^{nf(i_1)}, \dots, \omega_{l_1}^{nf(l_1)}\}$, которые через выходной переход сети $N_{Zon_i^0}$ будут пропущены в выходную позицию $P_{Zon_i^0}^{BXX}$. Появление маркера $\omega_k^{nf(l)}$ в данной позиции определяет потребность в ресурсах, необходимых для ликвидации последствий действия k -го влияющего на возникновение ЧПС фактора интенсивности l . Ресурсы, используемые для ликвидации последствий ЧПС типа $\omega_k^{nf(i)}$, моделируются маркерами $\omega_k^{cc(f)}$, где f – потенциальная возможность ликвидации. Защищаемые объекты из множества $Zon^z = \{Zon_1^z, Zon_2^z, \dots, Zon_j^z, \dots, Zon_m^z\}$ представим составным переходом $t_{Zon_j^z}$ (состоит из входного и выходного переходов $t_{Zon_j^z}$, $\bar{t}_{Zon_j^z}$ и позиции $P_{Zon_j^z}$), его входной и выходной позициями $P_{Zon_i^0}^{BX}$ и $P_{Zon_i^0}^{BXX}$ с функциями инцидентности позиций и переходов $F(P_{Zon_i^0}^{BX}, t_{Zon_i^0})=1$, $F(P_{Zon_i^0}^{BXX}, \bar{t}_{Zon_i^0})=1$ и $H(t_{Zon_i^0}, P_{Zon_i^0}^{BXX})=1$. Объекты $Zon^0, Res^{Ob}, Res^{Tr}$, содержащие силы и средства, которые могут быть использованы для ликвидации последствий ЧПС, в модели представлены составными переходами $t_{Zon_j^{zz}}(\bar{t}_{Zon_j^{zz}}, \bar{t}_{Zon_j^{zz}}, P_{Zon_j^{zz}})$, содержащими в позиции $P_{Zon_j^{zz}}$ некоторый набор маркеров, соответствующий находящимся на объекте средствам ликвидации последствий ЧПС (множество $V_{Zon_j^{zz}}$). Пункты управления (Pt^Y) моделируются составным переходом $t_{Pt_j^Y}(\bar{t}_{Pt_j^Y}, \bar{t}_{Pt_j^Y}, P_{Pt_j^Y})$. Входной переход $\bar{t}_{Pt_j^Y}$ связан со всеми объектами модели, а выходной переход $\bar{t}_{Pt_j^Y}$ – с объектами, входящими в состав сил и средств по ликвидации последствий ЧПС. Данные связи представлены посредством дуг, моделирующих информационные связи между объектами. Выходной переход $\bar{t}_{Pt_j^Y}$ моделирует принятие решений о привлечении тех или иных средств для ликвидации последствий ЧПС, и в общем случае его функция срабатывания может иметь сложный вид в зависимости от стратегии принятия решений. Если объект попадает в зону действия факторов, которые приводят к ЧПС, то в позицию P_{Zon_o} заносятся маркеры цвета $\omega_{k_j}^{nf(l_j)}$, соответствующие тяжести последствий действия различных разрушающих факторов ЧПС и определяемые по интенсивности действия разрушающих факторов в зоне нахождения объекта.

Рассмотрим динамику функционирования предлагаемой модели.

В стационарном режиме (в отсутствие воздействия ЧПС) ни один из переходов модели не может быть активизирован, во всех выходных позициях переходов, моделирующих объекты множества $Ob = Zon^0 \cup Zon^z \cup Res^c \cup Res^{Ob} \cup Res^{Tr} \cup Pt^Y$, содержатся маркеры цвета $\omega_0^{vf} \in \Omega^{vf}$. Данную маркировку сети назовем стационарной и обозначим через M_z . Возникновение в зоне действия ЧПС моделируется формированием начальной марки-

ровки M_0 , содержащей маркеры $\omega_k^{nf(1)}$ в позиции объекта – источника вызывающего ЧПС и в позициях P_{Zon_j} всех объектов, попавших в зону действия разрушающих факторов. Ликвидация последствий аварии соответствует переходу сети в стационарное состояние, т. е. достижению маркировки M_z . Если терминальный язык $L^{T(M_z)}(N, M_0) = \{I_W\}$ рассматриваемой сети N с начальным состоянием M_0 и финальной маркировкой M_z не пуст, то существует возможность ликвидации последствий ЧПС силами и средствами, имеющимися в распоряжении ЛПР. Слова данного терминального языка представляют возможные варианты ликвидации последствий ЧПС. На множестве слов возможны постановка и решение задач повышения эффективности принятия управленческих решений ЛПР по ликвидации последствий ЧПС. Критерием принятия решений может служить минимальное время на ликвидацию ее последствий (либо последствий некоторого типа, например минимальное время для вывоза пострадавших из зоны поражения, минимальные материальные потери).

В общем виде типовую задачу оптимизации в терминах обобщенных сетей Петри можно записать в виде $I = \min F(I_W)$, где $I_W \in L^{T(M_z)}(N, M_0)$ – значение выбранного критерия при реализации плана ликвидации последствий ЧПС I_W . При принятии решений данного типа в условиях наступления ЧПС выделим следующие основные этапы:

- формирование информационной модели региона (выделение множеств объектов модели и их взаимосвязей);
- построение модели региона в терминах обобщенных сетей Петри (формирование сети Петри N);
- определение начальной маркировки M_0 сети N в условиях наступления аварии;
- выполнение сети и формирование терминального языка $L^{T(M_z)}(N, M_0) = \{I_W\}$, переводящего сеть в стационарное состояние с маркировкой M_z (на данном этапе используется математический аппарат обобщенных сетей Петри).

3. Заключение

Предложено использование моделей и методов с применением сетей Петри для анализа и контроля чрезвычайных природных ситуаций, которые обеспечивают *причинно-следственный вывод* эффективных *многокритериальных* решений в различных условиях *неопределенности* и *риска*, что позволило за счёт использования *вероятностной оценки* причинно-следственных связей в модели оценивания альтернатив учесть любые предпочтения ЛПР. При этом в отличие от существующих подходов в данном исследовании не применяется *обобщённый* критерий с взвешиванием *локальных* критериев.

Практическая значимость – получил дальнейшее развитие метод решения проблемы *знаниеориентированного* принятия решений с *комплексным* учётом *многокритериальности* на основе использования средств *инженерии микроситуационных квантов знаний* и *интеллектуальных* информационных технологий принятия решений, который в отличие от существующих позволяет повысить качество принимаемых решений с минимальными затратами времени и средств.

Список литературы: 1. *Сироджа И. Б.* Многокритериальная оптимизация в интеллектуальных системах поддержки принятия решений / И. Б. Сироджа, А. Я. Кузмин, М. В. Штукин. К.: Реєстрація, зберігання і обробка даних, ІПРІ НАН України. 2012, Т. 14, № 2. С. 106 – 115. 2. *Колесников Д.А.* Системная динамическая модель управления процессом ликвидации кризисных ситуаций с использованием сетей Петри / В.С. Симанков, Д.А. Колесников. Тверь.:Новые технологии. Научный журнал “Программные продукты и системы”. 2010. №1. С. 16-25.

Поступила в редколлегию 07.02.2013

Кузмин Александр Яковлевич, д-р техн. наук, профессор ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование ситуационных центров. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел\факс +38 (057) 702 15 15.

Штукин Михаил Викторович, аспирант ХНУРЭ. Научные интересы: системный анализ ситуаций. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел\факс +38 (057) 702 15 15.

Ткаченко Богдан Константинович, магистр ХНУРЭ. Научные интересы: системный анализ ситуаций. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел\факс +38 (057) 702 15 15.

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ЗАВИСИМОСТИ МОДУЛЯ ЮНГА И КОЭФФИЦИЕНТА
ПУАССОНА ОТ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ
ПОДЛОЖЕК GaAs**

Решается вопрос усовершенствования математической модели, описывающей зависимость модуля Юнга (E) и коэффициента Пуассона (ν) подложек GaAs, выращенных в кристаллографической ориентации (100), (110) и (111), от произвольного кристаллографического направления. Определяются матрицы направляющих косинусов для трех ориентаций и рассчитываются значения E и ν с шагом 1° . Разрабатывается программа, позволяющая рассчитать требуемое значение E и ν для выбранного направления. Расхождение между расчетными значениями E и ν и экспериментальными данными для главных направлений не превышает 4,7 %.

1. Введение

Арсенид галлия (GaAs) как полупроводник является третьим по масштабам использования в промышленности после кремния и германия. В то же время по физическим характеристикам GaAs – более хрупкий материал, чем кремний. Подложки из арсенида галлия гораздо сложнее для изготовления и примерно в пять раз дороже, чем кремниевые, что ограничивает применение этого материала.

Характеристики приборов, которые изготавливаются на основе GaAs, во многом превышают параметры приборов, изготавливаемых на основе кремния и германия. В настоящее время проявляется значительный интерес к влиянию механических свойств GaAs, таких как модуль Юнга (E) и коэффициент Пуассона (ν), на параметры и надежность полупроводниковых приборов. Знание механических свойств GaAs имеет важное значение для многих практических применений, которые определяются этими свойствами, например изгиб, термоупругие напряжения, внутренние деформации и хрупкость [1].

Вопросу исследования влияния механических свойств на параметры арсенида галлия было посвящено достаточно большое количество работ [2 - 4]. Однако вопрос определения влияния кристаллографических направлений на механические свойства GaAs, связанные с модулем Юнга, коэффициентом Пуассона, фотоупругими и пьезооптическими константами, остается открытым.

Существующие модели [5,6] позволяют определить значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для главных кристаллографических направлений. В то же время весьма актуальным является определение этих значений для произвольного кристаллографического направления.

Цель данной работы – усовершенствование математической модели определения зависимости модуля Юнга и коэффициента Пуассона от кристаллографического направления в подложках арсенида галлия.

Для достижения цели необходимо решить следующие *задачи*:

- усовершенствовать математическую модель, позволяющую определить зависимость модуля Юнга и коэффициента Пуассона от произвольного кристаллографического направления;
- разработать алгоритм и программное обеспечение для вычисления значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона для подложек GaAs;
- выполнить оценку отклонения рассчитанных данных от экспериментальных значений.

2. Постановка задачи

Как известно, арсенид галлия является анизотропным кристаллом. Рассмотрим влияние анизотропии на механические свойства GaAs. В общем случае константы упругости и модули упругости анизотропного материала являются компонентами тензора 4-го порядка, который связывает два тензора второго ранга.

Запишем закон Гука, определяющий соотношение между напряжением и деформацией:

$$\varepsilon = s\sigma, \quad (1)$$

где s – константа упругой податливости.

В то же время можно записать (1) в следующем виде:

$$c = \frac{1}{s}, \sigma = c\varepsilon, \quad (2)$$

здесь c – константа упругой жесткости.

В общем случае при воздействии возмущающих факторов однородное напряжение и однородная деформация определяются тензорами второго ранга. Для произвольного однородного напряжения можно установить связь между компонентами деформации и напряжения как:

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijkl}\sigma_{kl}, \quad (3)$$

или в виде:

$$\sigma_{kl} = c_{ijkl}\varepsilon_{ij}, \quad (4)$$

при этом справедливо следующее равенство для симметричных кристаллов:

$$c_{ijkl} = c_{ijlk} = c_{klij}. \quad (5)$$

Константы упругой податливости s_{ijkl} и константы упругой жесткости c_{klij} представляют собой тензор 4-го ранга. Для этого тензора полное число констант равно 81 ($3^4 = 81$). С учетом того, что тензор напряжения и тензор деформации симметричны, тензоры упругой податливости и упругой жесткости также симметричны. Следовательно, допустима перестановка i и j , а также k и l . Таким образом, можно утверждать что в нашем случае тензор 4-го ранга c имеет в общем 21 независимый компонент. С учетом симметрии кристалла цинковой обманки, которая представляет собой арсенид галлия, это число снижается до 3 (c_{11}, c_{12}, c_{44}):

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Арсенид галлия является анизотропным материалом, следовательно, упругие константы также анизотропны. Они являются функциями упругих констант в требуемой ориентации. При этом компоненты тензора упругих констант в произвольной ориентации могут быть получены из известного тензора путем поворота вдоль одной из кристаллической оси. В декартовой системе координат тензор упругой податливости арсенида галлия представляется матрицей (6).

В выражении (6) константы упругой податливости вычисляются как:

$$s_{11} = \frac{c_{11} + c_{12}}{(c_{11} - c_{12}) \times (c_{11} + 2c_{12})}, \quad s_{12} = -\frac{c_{11}}{(c_{11} - c_{12}) \times (c_{11} + 2c_{12})}, \quad s_{44} = \frac{1}{c_{44}}. \quad (7)$$

Для арсенида галлия значения констант упругой податливости [7] соответственно равны: $s_{11} = 1.17 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, $s_{12} = -0.37 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, $s_{44} = 1.68 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

Как принято в кристаллографии, в декартовой системе координат оси, обозначенные X, Y, Z, соответствуют главным кристаллографическим направлениям. Для арсенида галлия ориентации (100) и (111) такое соответствие показано на рис. 1.

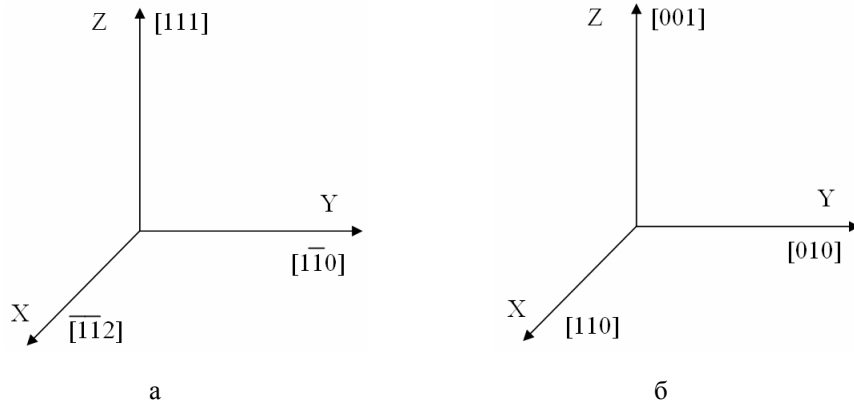


Рис. 1. Совмещение декартовых осей и главных кристаллографических направлений для GaAs ориентации: а – (100) и б – (111)

Для заданного поворота осей на произвольный угол φ можно записать матрицу абсолютных углов между осями:

$$\Phi_{ij} = \begin{bmatrix} \varphi & \frac{\pi}{2} - \varphi & \frac{\pi}{2} \\ \frac{\pi}{2} + \varphi & \varphi & \frac{\pi}{2} \\ \frac{\pi}{2} & \frac{\pi}{2} & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где Φ_{ij} – угол между базовой и новой системой координат.

При повороте системы относительно оси X ([100]) координаты любой точки в новой системе будут определяться уравнениями:

$$X' = X, \quad Y' = Y \cos \varphi - Z \sin \varphi, \quad Z' = Y \sin \varphi + Z \cos \varphi. \quad (9)$$

На основании (9) можно записать матрицу направляющих косинусов при вращении оси относительно кристаллографического направления [100] в виде:

$$Q_{ij}[100] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Соответственно, для двух оставшихся направлений можно записать следующие матрицы:

$$Q_{ij}[010] = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad Q_{ij}[001] = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Рассчитать значение модуля Юнга и коэффициента Пуассона в произвольном направлении можно путем вычисления тензора упругой податливости в повернутой системе координат относительно базовой.

Перепишем выражение (4) в виде:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 c_{ijkl} \varepsilon_{kl}. \quad (12)$$

В свою очередь при выполнении поворота обратный тензор упругой жесткости может быть вычислен как:

$$c'_{ijkl} = \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^3 \sum_{r=1}^3 \sum_{s=1}^3 Q_{pi} Q_{qj} Q_{rk} Q_{sl} c_{pqrs}, \quad (13)$$

где Q_{ij} – элементы матрицы направляющих косинусов.

Тогда тензор упругой податливости в соответствии с (2) может быть найден как:

$$S = \text{inv}(c')^{-1}, \quad (14)$$

откуда модуль Юнга и коэффициент Пуассона можно определить по следующим выражениям:

$$E'_i = \frac{\sigma'_i}{\varepsilon'_i} = \frac{1}{s'_{ii}}, \quad \nu'_{ij} = -\frac{\varepsilon'_j}{\varepsilon'_i} = -\frac{s'_{ij}}{s'_{ii}} = -\frac{s'_{ji}}{s'_{ii}}. \quad (15)$$

3. Практические результаты

Для вычисления модуля Юнга и коэффициента Пуассона в произвольном кристаллографическом направлении нами была разработана программа, интерфейс которой позволяет задавать значения констант упругой жесткости c_{11} , c_{12} , c_{44} , рассчитывать значение для заданного кристаллографического направления или для всех направлений в заданной ориентации. Программа позволяет представлять полученные данные в графическом виде и имеет средства для настройки графического отображения данных. Интерфейс программы показан на рис. 2.

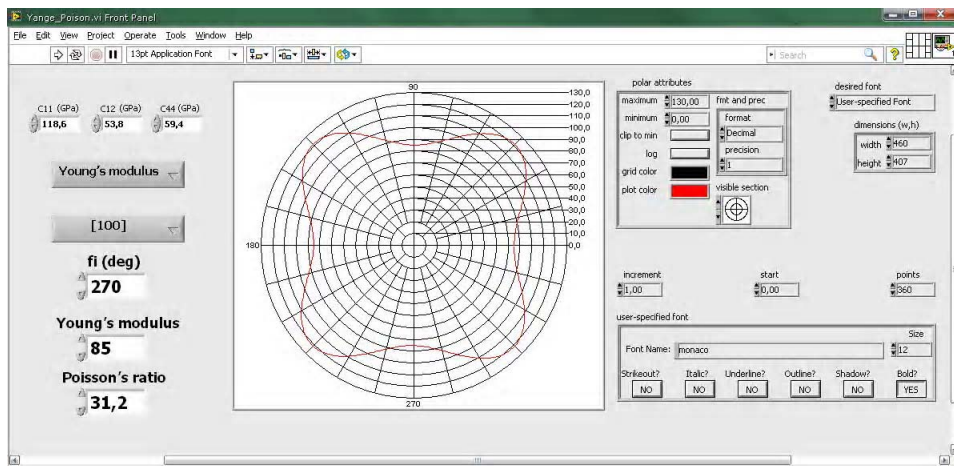


Рис. 2. Интерфейс программы вычисления модуля Юнга и коэффициента Пуассона в произвольной кристаллографической ориентации

Рассчитанные значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для подложек арсенида галлия ориентации (100) в произвольном направлении представлены на рис. 3.

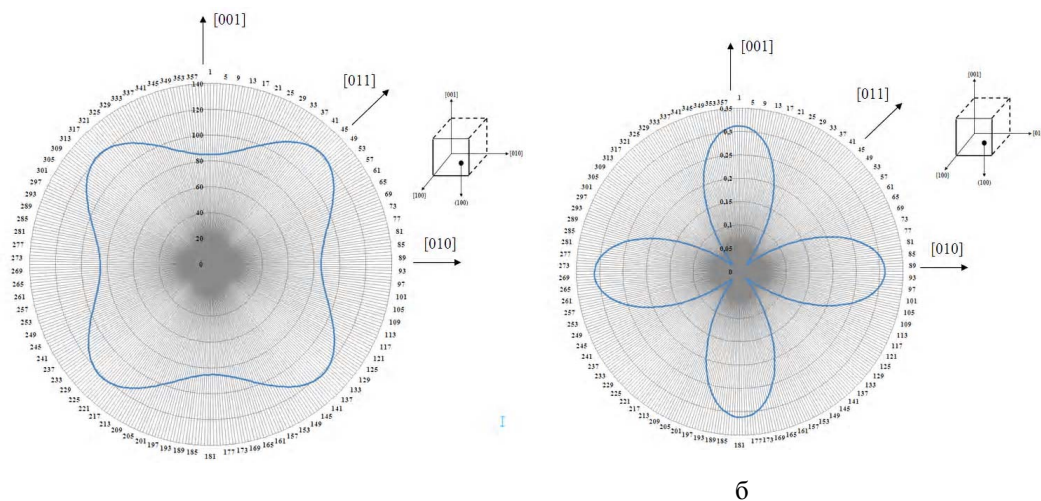


Рис. 3. Значение модуля Юнга подложек GaAs (а) ориентации (100) и коэффициента Пуассона (б) для произвольного кристаллографического направления

В результате выполненных расчетов были получены модуль Юнга и коэффициент Пуассона (рис. 4) для главных кристаллографических направлений ориентации (100): для направления [011] $E=121,28$ ГПа, $\nu=0,312$ (максимальное значение); для направления [001] $E=85,26$ ГПа, $\nu=0,02$ (минимальное значение).

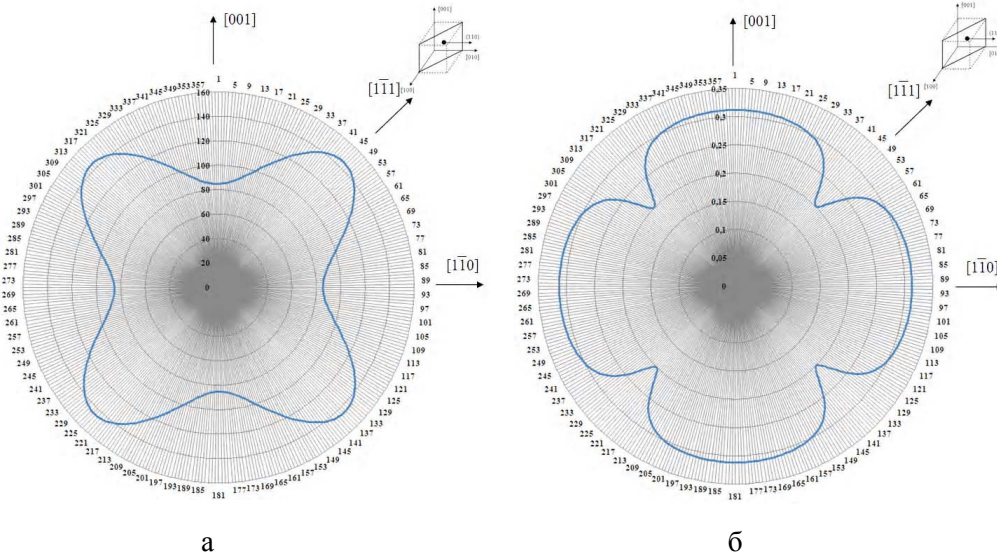


Рис. 4. Значение модуля Юнга подложек GaAs (а) ориентации (110) и коэффициента Пуассона (б) для произвольного кристаллографического направления

4. Выводы

Для оценки адекватности усовершенствованной модели мы выполнили сравнение экспериментальных данных, полученных различными авторами [5 – 8], с полученными нами расчетными данными. Результаты приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1
Экспериментальные и рассчитанные значения модуля Юнга, МПа

Ориентация (100)			Ориентация (111)	Ориентация (110)			Источ.
[001]	[011]	[010]	[111], [1 $\bar{1}$ 0], [$\bar{1}$ $\bar{1}$ 2]	[001]	[1 $\bar{1}$ 1]	[1 $\bar{1}$ 0]	
85,3	121,3	85,3	121,3	85,3	141,2	85,3	[3]
85	122	85	122	85	142	85	[2]
85,29	121,5	85,29	121,5	85,29	141,1	85,29	[7]
85,26	121,28	85,26	121,1	85,26	145,013	85,26	Модель

Таблица 2
Экспериментальные и рассчитанные значения коэффициента Пуассона

Ориентация (100)			Ориентация (111)	Ориентация (110)			Источ.
[001]	[011]	[010]	[111], [1 $\bar{1}$ 0], [$\bar{1}$ $\bar{1}$ 2]	[001]	[1 $\bar{1}$ 1]	[1 $\bar{1}$ 0]	
0,312	0,021	0,312	0,303	0,312	0,189	0,312	[3]
0,32	0,024	0,32	0,31	0,32	0,194	0,32	[2]
0,32	0,022	0,32	0,31	0,32	0,19	0,32	[8]
0,312	0,02	0,312	0,312	0,312	0,2	0,312	Модель

Сопоставление рассчитанных значений с полученными экспериментальными данными для углов, кратных 45° , показывает хорошее совпадение между расчетными и экспериментальными данными. Отклонение между ними не превышает 4,7 %.

4. Выводы

1. Усовершенствована математическая модель зависимости модуля Юнга и коэффициента Пуассона от кристаллографической ориентации подложек GaAs, которая позволяет определить значения этих параметров в произвольном кристаллографическом направлении.

2. Разработана программа, позволяющая вычислять модуль Юнга и коэффициент Пуассона для произвольного кристаллографического направления GaAs, выращенного в кристаллографической ориентации (100), (110), (111).

3. Отклонение расчетных данных от экспериментальных значений не превышает 4,7 %.

Список литературы: 1. *Louail L., Maouche D., Roumili A., Shraoui F.* Calculation of elastic constants of 4d transition metals // *Materials Letters*. 2004. Vol. 58. P. 2975-2978. 2. *Adachi S.* GaAs and Related Materials: Bulk Semiconducting and Superlattice Properties/ World Scientific. 1994. P. 675. 3. *Brantley W.A.* Calculated elastic constants for stress problems associated with semiconductor devices/ Brantley W. A. // *J. Appl. Phys.* 1973. Vol. 44. P. 534 - 536. 4. *Louail L.* Calculation of elastic constants of 4d transition metals/ Louail L. Maouche D. Roumili A. Ali Shraoui F. // *Materials Letters*. 2004. Vol. 58. P. 2975-2978. 5. *Adachi S.* GaAs and Related Materials: Bulk Semiconducting and Superlattice Properties / World Scientific. 1994. P. 675. 6. *Оксанич А.П.* Определение влияния кристаллографической ориентации на механические свойства арсенида галлия / А.П. Оксанич, С.Э. Притчин // *Технічна електродинаміка*. Харків: НТУ «ХП», 2012. С. 209-211. 7. *Levinshtein M.E.* Handbook series on semiconductor parameters. 1. Si, Ge, C (diamond), GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb/ Levinshtein M. E., Rumyantsev S. L., Shur M. World Scientific Publishing Company. 1996. 218 p. 8. *Bateman T.B.* Elastic module of single-crystal Gallium Arsenide/ Bateman T.B., McSkimin H.J., Whelan J.M. // *J. Appl. Phys.* 1979. Vol. 30. P. 444 – 445.

Поступила в редколлегию 22.02.2013

Армамонов Владимир Владимирович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой геодезии, землеустройства и кадастра КрНУ им. М. Остроградского. Научные интересы: энерго- и ресурсосберегающие технологии. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, тел.: (05366) 30157. Email: kafius@kdu.edu.ua

Притчин Сергей Эмильевич, канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-управляющих систем КрНУ им. М. Остроградского. Научные интересы: автоматизация процессов управления производством полупроводниковых материалов. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, тел.: (05366) 30157, e-mail: pritchinse@ukr.net