

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 169

Харьков
2014

СОДЕРЖАНИЕ

ХАХАНОВ В.И., ЗАЙЧЕНКО С.А., МИЩЕНКО А.С., ХАХАНОВ И.В. ПРОЦЕССОРНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА BIG DATA.....	4
БАРАННИК В.В., ПОДЛЕСНЫЙ С.А. АНАЛИЗ ДЕЙСТВИЯ КИБЕРАТАК НА ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ РЕСУРС В ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ.....	16
РЯБУХА Ю.Н. МЕТОД ТРЕХМЕРНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МЕЖКАДРОВОГО КОДИРОВАНИЯ БЕЗ ПОТЕРИ ЦЕЛОСТНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО РЕСУРСА.....	23
БАРАННИК В.В., ХАРЧЕНКО Н.А., СТАСЕВ С.Ю. СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ БИТОВОЙ СКОРОСТЬЮ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРЕДСКАЗЫВАЕМЫХ КАДРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТУПНОСТИ И ЦЕЛОСТНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ.....	31
БАРАННИК В.В., СИДЧЕНКО С.А., ТУПИЦА И.М. СИНТЕЗ КОМБИНИРОВАННЫХ КРИПТОКОМПРЕССИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В ИНФОКОММУНИКАЦИЯХ.....	39
ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., ШИМАНОВИЧ Т.И. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЯ	45
ГАРЯЧЕВСКАЯ Д.В., ГАРЯЧЕВСКАЯ И.В., ЕВСЕЕВ В.В. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МЕТОДА ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА ПРОИЗВОДСТВЕ РЭС.....	50
КОВАЛЕНКО А.А., РОМАНОВА Т.Е. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ НА МИНИМАЛЬНО И МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ РАССТОЯНИЯ В ЗАДАЧАХ БАЛАНСНОЙ КОМПОНОВКИ.....	54
ДОВГАЛЬ В.В. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ПО СОВОКУПНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК.....	62
РЕФЕРАТИ	67
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СБОРНИКА	71

ПРОЦЕССОРНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА BIG DATA

Предлагается инфраструктура обеспечения параллельного анализа big data для поиска, распознавания и принятия решений на основе использования булевой метрики измерения киберпространства. Разрабатывается новая структурная модель анализа big data, которая характеризуется применением облачных сервисов, киберфизических и поисковых систем, параллельных виртуальных мультипроцессоров с минимальным набором векторно-логических операций для точного поиска информации на основе предложенной булевой метрики и нечисленных критериев качества, что дает возможность создавать семантическую инфраструктуру «чистого» киберпространства путем компетентностной классификации и метрического упорядочения big data в масштабах киберэкосистемы планеты.

1. Введение

Цель – создание метрико-семантической модели взаимодействия технологической культуры big data с интеллектуальными сенсорами мониторинга реального мира для управления киберфизическими процессами, повышения качества жизни людей и сохранения экосистемы планеты. Задачи из анализа источников [1-20]: 1) Определение актуальных рыночно-ориентированных направлений научно-образовательных исследований и дизрапторного развития киберэкосистемы планеты. 2) Рыночно ориентированные структуры киберфизических систем управления неприродными процессами. 3) Использование технологической культуры big data для создания киберфизических систем мониторинга и управления.

Почему возникла парадигма больших данных как новый рыночный тренд, раскручиваемый учеными и компаниями? Короткий ответ содержит всего два тезиса: 1) большие данные невозможно просмотреть людскими ресурсами за приемлемое время – нужны фабрики для их хранения и многократного использования; 2) большие данные невозможно осмыслить даже совокупным мозгом всего человечества – нужны мощные интеллектуальные анализаторы для извлечения полезной информации, интегрируемой в знания. Процесс получения знаний можно свести к четырем технологиям: 1) экспериментальные измерения; 2) аналитические исследования; 3) численное моделирование; 4) инновационный компонент, замыкающий все процессы в систему – data-driven science for control. Что касается эволюции киберпространства, то здесь наблюдается экспоненциальный рост объемов (удвоение каждые 1,5 года) и сложности данных, что приводит к трансформированию понимания процессов и структур: 1) от бедности данных к их перенасыщению; 2) от наборов данных к их потокам; 3) от статики данных к их динамическому развитию; 4) от обработки данных «время от времени» к их анализу в реальном масштабе времени; 5) от централизованного хранения данных к распределенным в пространстве big data; 6) от владения данными к обладанию их полезной экспертизы. Однако на пути становления киберэкосистемы планеты возникают новые научные и практические проблемы, связанные с формированием киберфизических процессов: 1) data gathering – сбор данных от сенсоров и сетей; 2) data farming – создание фабрик и распределенных структур для хранения, архивирования, индексирования, поиска, объединения и разделения данных; 3) data mining – извлечение данных по шаблонам и их суперпозициям, кластерный анализ и классификация, поиск аномалий или выбросов, гиперпространственная визуализация; 4) data understanding – семантическое понимание данных; 5) new cyber knowledge – формирование новых знаний для управления киберфизическими процессами.

Как итог сказанному выше можно констатировать, что киберфизические системы, большие данные и квантоподобные параллельные мультипроцессоры формируют сегмент рынка, предназначенный для поиска, распознавания и принятия эффективных управленческих решений.

2. Критерии и структуры для оценивания качества взаимодействия объектов в киберпространстве

Цель – разработка универсального критерия и структур оценивания качества взаимодействия объектов в детерминированном киберпространстве на основе использования только логических операций для определения расстояний между процессами и явлениями путем построения высокопроизводительных параллельных процессоров, ориентированных на эффективное решение задач поиска, распознавания и принятия решений. Задачи: 1) Разработка универсальной аналитической модели для определения бинарного взаимодействия между процессами и явлениями в многозначной логике. 2) Разработка неарифметической вычислительной параллельной структуры для метрического оценивания детерминированных процессов, явлений и выбора оптимального решения. 3) Примеры использования вычислительных логических параллельных процессоров для решения практических задач.

Для понимания последующего материала необходимо ввести некоторые допущения и определения. Входной вектор 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. 1. 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.

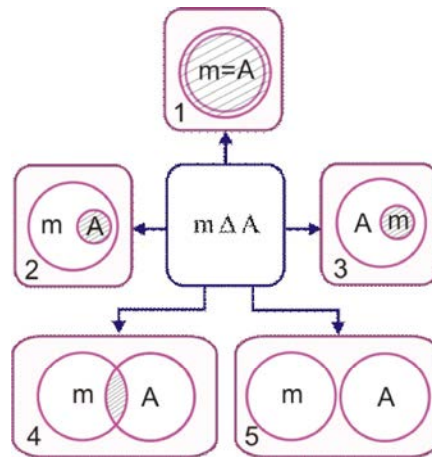


Рис. 1. Результаты взаимодействия двух векторов

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 (1) определены в алфавите Кантора $A = \{0,1\}^x = \{0,1\} \times \{0,1\} \times \dots$. 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 , равная $X: q = 2^\omega$. 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 (1) без усреднения функций принадлежности и кодового расстояния можно трансформировать к виду:

$$\begin{aligned} Q &= d(m, A) + \mu(m \in A) + \mu(A \in m), \\ d(m, A) &= \text{card}\{i : m_i \oplus A_i = U, i = 1, \dots, k\}; \\ \mu(m \in A) &= \text{card}\{i : A_i = U, i = 1, \dots, k\} - \text{card}\{i : m_i \oplus A_i = U, i = 1, \dots, k\}; \\ \mu(A \in m) &= \text{card}\{i : m_i = U, i = 1, \dots, k\} - \text{card}\{i : m_i \oplus A_i = U, i = 1, \dots, k\}; \\ U &= \begin{cases} 1 \leftarrow \{m_i, A_i\} \in \{0, 1\}; \\ x \leftarrow \{m_i, A_i\} \in \{0, 1, x\}. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

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 $U=x$ иницирует вычисления на основе использования теоретико-множественной операции симметрической разности Δ (2). Введение переменной U дает возможность уйти от написания двух формул критерия в зависимости от значности алфавита описания координат взаимодействующих векторов. Представленные в (2) 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. Первый компонент (2), составляющий критерий, формирует степень несовпадения 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 или близость. 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 (2) в одну:

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

Процедура вычисления векторного критерия качества зависит от значности алфавита:

$$Q' = \begin{cases} m \oplus A \leftarrow \{m_i, A_i\} \in \{0, 1\}; \\ m \Delta A \leftarrow \{m_i, A_i\} \in \{0, 1, x\}. \end{cases} \quad (3)$$

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

$$0 \oplus 0 = 0, 0 \oplus 1 = 1, 1 \oplus 0 = 1, 1 \oplus 1 = 0.$$

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

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 введенной 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 [15], который позволяет за один такт выполнить процедуру slc (shift left bit crowding) – сдвиг влево с одновременным уплотнением 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 квазиоптимальной 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 (3) представлено в виде следующих процедур (нулевые координаты отмечены точками):

$m \exists$	1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0
$A \exists$	0 0 0 0 1 1 1 1 0 1 0 1
$Q^* \exists m \exists A$	1 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0 1
$Q \exists \text{slc}(Q^*)$	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 параллельного сравнения группы сдвинутых влево единиц, неарифметически формирующих скалярные оценки критериев, необходимые для убеждения человека.

Что касается формулы кибервыбора, то важно при рассмотрении практически ориентированных задач найти лучшее решение из конечного числа вариантов взаимодействия $m \in A_i$ для его последующей реализации без арифметических операций, которые на один-два порядка снижают быстродействие. Пусть, например, имеются два вектора A, B , относительно которых необходимо выполнить операции: $a = m \oplus A$, $b = m \oplus B$, чтобы оценить близость каждого из них к вектор-запросу m :

$A =$	1 0 1 0 0 1 0 1	$A =$	0 0 0 1 0 0 0 1	$A =$	1 0 1 0 0 1 1 1
$B =$	0 1 0 0 1 0 1 1	$B =$	0 1 0 0 1 1 0 0	$B =$	0 1 0 0 1 0 0 1
$m =$	1 1 1 1 1 1 0 0	$m =$	1 1 1 1 1 1 0 0	$m =$	1 1 1 1 1 1 0 0
$\mu_a(m \in A) = m \oplus A$	0 1 0 1 1 0 0 1	$\mu_a(m \in A) = m \oplus A$	1 1 1 0 1 1 0 1	$\mu_a(m \in A) = m \oplus A$	0 1 0 1 1 0 1 1
$\mu_b(m \in B) = m \oplus B$	1 0 1 1 0 1 1 1	$\mu_b(m \in B) = m \oplus B$	1 0 1 1 0 0 0 0	$\mu_b(m \in B) = m \oplus B$	1 0 1 1 0 1 0 1
$a = \text{slc}(\mu_a)$	1 1 1 1 0 0 0 0	$a = \text{slc}(\mu_a)$	1 1 1 1 1 1 0 0	$a = \text{slc}(\mu_a)$	1 1 1 1 1 0 0 0
$b = \text{slc}(\mu_b)$	1 1 1 1 1 1 0 0	$b = \text{slc}(\mu_b)$	1 1 1 0 0 0 0 0	$b = \text{slc}(\mu_b)$	1 1 1 1 1 0 0 0

Далее предлагается простая и доступная для понимания и реализации структура параллельного вычисления лучшего варианта на основе нечисленного сравнения двух альтернативных векторов a и b , полученных на основе использования однократной операции slc – сдвиг всех единиц влево с уплотнением [15]. После параллельного сдвига за один такт всех единиц в регистрах векторного критерия качества, оценивающих взаимодействия объектов в киберпространстве, теоретически возможны три варианта соотношения единиц, представленных ниже (взаимодействие ранее полученных векторов a и b):

$a =$	1 1 1 1 0 0 0 0	$a =$	1 1 1 1 1 1 0 0	$a =$	1 1 1 1 1 0 0 0
$b =$	1 1 1 1 1 1 0 0	$b =$	1 1 1 0 0 0 0 0	$b =$	1 1 1 1 1 0 0 0
$a \wedge b$	1 1 1 1 0 0 0 0	$a \wedge b$	1 1 1 0 0 0 0 0	$a \wedge b$	1 1 1 1 1 0 0 0
$q^b = (a \wedge b) \oplus b$	0 0 0 0 1 1 0 0	$q^b = (a \wedge b) \oplus b$	0 0 0 0 0 0 0 0	$q^b = (a \wedge b) \oplus b$	0 0 0 0 0 0 0 0
$q^a = (a \wedge b) \oplus a$	0 0 0 0 0 0 0 0	$q^a = (a \wedge b) \oplus a$	0 0 0 1 1 1 0 0	$q^a = (a \wedge b) \oplus a$	0 0 0 0 0 0 0 0
$Q^b = \bigvee_{i=1}^k q_i^b = 1$		$Q^b = \bigvee_{i=1}^k q_i^b = 0$	w i n n e r	$Q^b = \bigvee_{i=1}^k q_i^b = 0$	w i n n e r
$Q^a = \bigvee_{i=1}^k q_i^a = 0$	w i n n e r	$Q^a = \bigvee_{i=1}^k q_i^a = 1$		$Q^a = \bigvee_{i=1}^k q_i^a = 1$	w i n n e r

Пояснения: Нулевое значение Q -критерия означает лучшую альтернативу из рассмотренных, которая используется далее для сравнения с другими оценками или в качестве конечного варианта решения проблемы. Логическая структура для реализации кибервыбора имеет следующий вид:

$$\left\langle \begin{matrix} Q^b = \bigoplus_{i=1}^k q_i^b \\ Q^a = \bigoplus_{i=1}^k q_i^a \end{matrix} \right\rangle \leftarrow \left\langle \begin{matrix} q^b = (a \wedge b) \oplus b \\ q^a = (a \wedge b) \oplus a \end{matrix} \right\rangle \leftarrow (a \wedge b) \leftarrow \left\langle \begin{matrix} a \\ b \end{matrix} \right\rangle \leftarrow \left\langle \begin{matrix} a = \text{slc}(\mu_a) \\ b = \text{slc}(\mu_b) \end{matrix} \right\rangle \leftarrow \left\langle \begin{matrix} \mu_a(m \in A) = m \oplus A \\ \mu_b(m \in B) = m \oplus B \end{matrix} \right\rangle \leftarrow \left\langle \begin{matrix} m \\ A \\ B \end{matrix} \right\rangle.$$

Регистровые переменные a и b , обозначающие векторы сжатых влево единичных значений, объединяются и инвертируются для одновременного выполнения хог-операций. Затем результаты в виде состояний регистров подаются на входы двух логических элементов or , которые уже формируют состояния двух булевых переменных, создающих три сочетания: 00, 01, 10. Нулевое значение одной из двух переменных означает лучшее решение, которое необходимо выбрать. Два нулевых состояния означают, что оба решения равнозначны по уровню предпочтения. Единичная комбинация булевых переменных невозможна. Схемная реализация кибервыбора из двух альтернатив, соответствующая приведенной выше логической структуре, представлена на рис. 2.

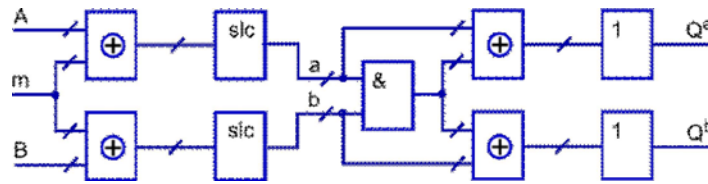


Рис. 2. Схемная реализация выбора оптимального решения

Если учесть, что выбор лучшего решения должен идентифицироваться логическим сигналом 1 (вместо 0), что соответствует максимальному значению функции принадлежности, определенной ранее, тогда схемная структура для определения лучшего варианта из двух альтернатив может быть незначительно модифицирована с помощью дополнительных

инверторов на выходах логических or элементов, формирующих $\{Q^a, Q^b\} \in Q$. В этом случае на выходах цифровой структуры возможны следующие пары состояний: 10, 01 и 11, где выбор решения (a или b) осуществляется по единичному значению одного из выходов. Пара сигналов 00 на внешних выходах схемы с инверторами невозможна. Таким образом, точный поиск заказанной информации в *big data* можно и нужно выполнять на основе только логических операций and , or , not , xor , slc без использования арифметических функций, что позволяет проектировать быстродействующие векторно-логические физические и/или виртуальные мультипроцессоры для существенного уменьшения времени исполнения сервисов облачными приложениями. Вычислительная процедура поиска лучшего варианта из двух возможных сводится к параллельному выполнению 4-х векторных операций и одной логической, в результате которых на одном или нескольких выходах формируется значение нуля, которое идентифицирует лучшее решение:

$$Q^a = \bigvee_i \{[\text{slc}(m \oplus A) \wedge \text{slc}(m \oplus B)] \oplus A\}, \quad Q^b = \bigvee_i \{[\text{slc}(m \oplus A) \wedge \text{slc}(m \oplus B)] \oplus B\}.$$

Предложенная дискретная булева метрика, векторные критерии качества хог-взаимодействия объектов в киберпространстве, нечисленное ранжирование полученных критериев для выбора объекта по запросу дают основания полагать о рыночном внедрении программно-аппаратной реализации метрики и основанной на ней вычислительной структуры в облачные сервисы анализа *big data*.

Векторно-логический SIMD-мультипроцессор характеризуется отсутствием арифметических операций, параллельным вычислением расстояния между запросом и информационными квантами, а также одновременным определением лучшего из возможных n -решений по минимуму функции принадлежности, что дает возможность на порядок повысить быстродействие максимально точного поиска данных в *big data*. Его структура изображена на рис. 3, где представлены только логические примитивы для выполнения векторных и булевых (битовых) операций. Процессор работает следующим образом: вектор-запрос m , состоящий из k -битов, взаимодействует по хог-функции с матрицей M , имеющей n строк или векторов. В результате выполнения хог-операций формируется n функций принадлежности, определяющих степень близости или расстояние между запросом и каждой вектор-

строкой матрицы M . Для оценивания расстояний и выбора лучшего (минимального) взаимодействия выполняется регистровая операция slc , которая осуществляет уплотнение всех единиц со сдвигом влево за один автоматный такт, что дает возможность оценивать минимальное расстояние $m \oplus M_i$ номером бита, в котором находится правая крайняя единица. Для определения номера вектор-строки, формирующей минимум функции принадлежности, осуществляется параллельная поразрядная операция логического умножения над всеми векторами, содержащими сдвинутые влево единичные значения, что дает возможность вычислить вектор с минимальным числом единиц A_{min} . Последний используется для определения номера или индекса вектор-строки матрицы M , имеющей лучшее значение функции принадлежности, путем выполнения векторной хог-операции между A_{min} и всеми сдвинутыми функциями принадлежности $A_i (i=1,n)$. В результате формируются векторы $q_i (i=1,n)$, биты которых определяют входные значения каждого из n логических элементов og . Выход каждого og -элемента равен единице, если существует хотя бы одно единичное значение в результатах сравнения $A_i \oplus A_{min}$. Если таких единиц нет, то минимальное расстояние между $m \oplus M_i$ идентифицируется 0-состоянием одного или, возможно, нескольких выходов $Q_i (i=1,n)$. Аналитическая модель поиска оптимального решения в киберпространстве по вектор-запросу оперирует пятью параллельными логическими операциями, выполняемыми последовательно:

$$Q^i = \bigvee_{j=1,k} \{ \bigwedge_{p=1,n} slc(m \oplus M_i) \oplus M_i \}_{i=1,n}$$

Структурная модель векторного логического процессора, соответствующая аналитической модели формирования оптимального решения, имеет вид, представленный на рис. 3.

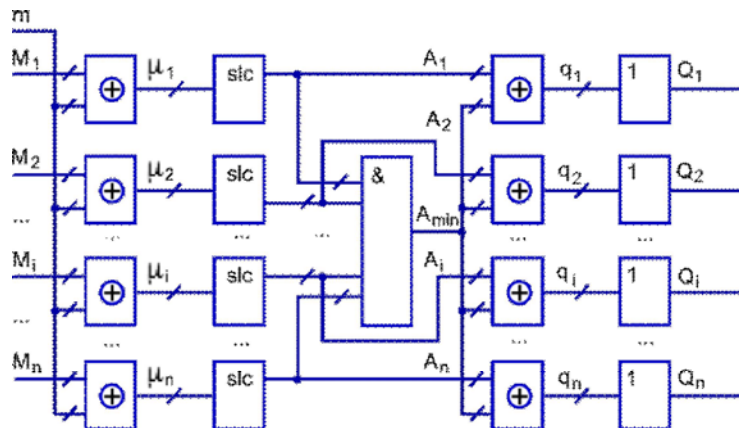


Рис. 3. Векторно-логический мультипроцессор

Три примера вычисления состояний выходов векторно-логического процессора, как реакции на запрос m для матрицы M , состоящей из двух вектор-строк, представлены ниже. Первая фаза иллюстрирует формирование векторов единичных значений, сдвинутых влево: $\{A_1, A_2\} \rightarrow A$:

$M_1 =$	1 0 1 0 0 1 0 1	$M_1 =$	0 0 0 1 0 0 0 1	$M_1 =$	1 0 1 0 0 1 1 1
$M_2 =$	0 1 0 0 1 0 1 1	$M_2 =$	0 1 0 0 1 1 0 0	$M_2 =$	0 1 0 0 1 0 0 1
$m =$	1 1 1 1 1 1 0 0	$m =$	1 1 1 1 1 1 0 0	$m =$	1 1 1 1 1 1 0 0
$\mu_1(m \in M_1) = m \oplus M_1$	0 1 0 1 1 0 0 1	$\mu_1(m \in M_1) = m \oplus M_1$	1 1 1 0 1 1 0 1	$\mu_1(m \in M_1) = m \oplus M_1$	0 1 0 1 1 0 1 1
$\mu_2(m \in M_2) = m \oplus M_2$	1 0 1 1 0 1 1 1	$\mu_2(m \in M_2) = m \oplus M_2$	1 0 1 1 0 0 0 0	$\mu_2(m \in M_2) = m \oplus M_2$	1 0 1 1 0 1 0 1
$A_1 = sl(\mu_1)$	1 1 1 1 0 0 0 0	$A_1 = sl(\mu_1)$	1 1 1 1 1 1 0 0	$A_1 = sl(\mu_1)$	1 1 1 1 1 0 0 0
$A_2 = sl(\mu_2)$	1 1 1 1 1 1 0 0	$A_2 = sl(\mu_2)$	1 1 1 0 0 0 0 0	$A_2 = sl(\mu_2)$	1 1 1 1 1 0 0 0

Вторая фаза иллюстрирует формирование состояний выходов процессора: $\{Q_1, Q_2\} \rightarrow Q$, где в первом и втором случаях существует только один «победитель» с нулем на выходе, а в третьем случае обе вектор-строки матрицы M являются оптимальными решениями для запроса m :

$A_1 =$	1 1 1 1 0 0 0 0	$A_1 =$	1 1 1 1 1 1 0 0	$A_1 =$	1 1 1 1 1 0 0 0
$A_2 =$	1 1 1 1 1 1 0 0	$A_2 =$	1 1 1 0 0 0 0 0	$A_2 =$	1 1 1 1 1 0 0 0
$A_{min} = M_1 \wedge M_2$	1 1 1 1 0 0 0 0	$A_{min} = M_1 \wedge M_2$	1 1 1 0 0 0 0 0	$A_{min} = M_1 \wedge M_2$	1 1 1 1 1 0 0 0
$q_2 = (M_1 \wedge M_2) \oplus M_2$	0 0 0 0 1 1 0 0	$q_2 = (M_1 \wedge M_2) \oplus M_2$	0 0 0 0 0 0 0 0	$q_2 = (M_1 \wedge M_2) \oplus M_2$	0 0 0 0 0 0 0 0
$q_1 = (M_1 \wedge M_2) \oplus M_1$	0 0 0 0 0 0 0 0	$q_1 = (M_1 \wedge M_2) \oplus M_1$	0 0 0 1 1 1 0 0	$q_1 = (M_1 \wedge M_2) \oplus M_1$	0 0 0 0 0 0 0 0
$Q_2 = \bigvee_{i=1}^k q_i^2 = 1$		$Q_2 = \bigvee_{i=1}^k q_i^2 = 0$	w i n n e r	$Q_2 = \bigvee_{i=1}^k q_i^2 = 0$	w i n n e r
$Q_1 = \bigvee_{i=1}^k q_i^1 = 0$	w i n n e r	$Q_1 = \bigvee_{i=1}^k q_i^1 = 1$		$Q_1 = \bigvee_{i=1}^k q_i^1 = 0$	w i n n e r

Интерес представляет формирование запросов в многозначном алфавите (например, Кантора) описания переменных взаимодействующих векторов. На первый взгляд, существуют проблемы подсчета расстояния между запросом и информационным компонентом киберпространства с недвоичным кодированием. Но если многозначные символы булеана примитивов, участвующие в формировании векторов, обозначить двоичными кодами (0 = 10, 1 = 01, X = 11, B = 00), то расстояние «запрос – компонент» можно оценивать с помощью ранее описанной процедуры сдвига всех единиц влево с уплотнением:

$M_1 =$	1 0 1 0 0 1 0 1	$M_1 =$	0 0 0 0 0 0 0 1	$M_1 =$	X 0 1 X 0 X 1 X
$M_2 =$	0 1 0 0 1 0 1 1	$M_2 =$	0 1 1 1 1 1 0 0	$M_2 =$	0 X X 0 X 0 X 1
$m =$	1 X 1 1 X 1 X 0	$m =$	X X 1 1 X 1 X X	$m =$	X X 1 1 X X 0 1
$\mu_1(m \in M_1) = m \oplus M_1$	\emptyset 1 \emptyset X 1 \emptyset 1 X	$\mu_1(m \in M_1) = m \oplus M_1$	1 1 X X 1 X 1 0	$\mu_1(m \in M_1) = m \oplus M_1$	\emptyset 1 \emptyset 0 1 \emptyset X 1
$\mu_2(m \in M_2) = m \oplus M_2$	X 0 X X 0 X 0 X	$\mu_2(m \in M_2) = m \oplus M_2$	1 0 \emptyset \emptyset 0 \emptyset 1 1	$\mu_2(m \in M_2) = m \oplus M_2$	1 \emptyset 0 X \emptyset 1 1 X
$A_1 = sl(\mu_1)$	11 11 11 1 0 0 0 0	$A_1 = sl(\mu_1)$	11 11 11 11 11 11 1 0	$A_1 = sl(\mu_1)$	11 11 11 0 0 0 0 0 0
$A_2 = sl(\mu_2)$	11 11 11 11 11 11 1 0	$A_2 = sl(\mu_2)$	11 11 1 0 0 0 0 0	$A_2 = sl(\mu_2)$	11 11 11 11 0 0 0 0

Победителями в трех, приведенных выше, номинациях становятся соответственно: M_1, M_2, M_1 , как имеющие минимальное число единиц или максимальное количество нулевых координат. Таким образом, не существует принципиальных ограничений для оценивания взаимодействия объектов в киберпространстве путем использования нечисленных метрик, исключающих арифметические операции. Более того, все расстояния в информационном мире можно измерять с помощью хог-операции или симметрической разности, которые обеспечивают выбор лучшего решения на основе векторно-логических критериев качества взаимодействия.

Следующий пример иллюстрирует работу мультипроцессора в многозначном алфавите описания логических переменных, ориентированном на компетентностное рейтингование учащейся молодежи. Пусть имеется группа студентов, получившая сессионные оценки по восьми экзаменам в метрике A,B,C,D, которые кодируются соответствующими векторами: 1000, 1100, 1110, 1111. Необходимо определить лучшего студента, который интегрально получил максимальные баллы за сессию. Результаты вычислений представлены ниже:

$M_1 =$	A B D D B A C C	$M_1 =$	A B D D B A C C
$M_2 =$	C C D A B B A D	$M_2 =$	C C D A B B A D
$M_3 =$	B C C B A A C D	$M_3 =$	B C C B A A C D
$m =$	A B C A A A C	$m =$	A A A A A A A
$\mu_1(m \in M_1) = m \oplus M_1$	0000 0000 0001 0111 0100 0000 0110 0000	$\mu_1(m \in M_1) = m \oplus M_1$	0000 0100 0111 0111 0100 0000 0110 0110
$\mu_2(m \in M_2) = m \oplus M_2$	0110 0010 0001 0000 0100 0100 0000 0001	$\mu_2(m \in M_2) = m \oplus M_2$	0110 0110 0111 0000 0100 0100 0000 0111
$\mu_3(m \in M_3) = m \oplus M_3$	0100 0010 0000 0100 0000 0000 0110 0001	$\mu_3(m \in M_3) = m \oplus M_3$	0100 0110 0110 0100 0000 0000 0110 0111
$A_1 = sl(\mu_1)$	1111 111	$A_1 = sl(\mu_1)$	1111 1111 1111 1
$A_2 = sl(\mu_2)$	1111 111	$A_2 = sl(\mu_2)$	1111 1111 1111 1
$A_3 = sl(\mu_3)$	1111 11	$A_3 = sl(\mu_3)$	1111 1111 111
$M_3 =$	w i n n e r	$M_3 =$	w i n n e r

Здесь в верхней таблице вектор-эталон m приведен к лучшим фактическим оценкам, полученным студентами по каждому экзамену. Нижняя таблица оперирует вектором-эталонном с теоретически возможными лучшими (A=1000) значениями тестирования знаний. В обоих случаях интегральный критерий качества сессии определяет лучшим – студента под номером 3. Для кодирования всех пяти градаций болонской метрики оценивания знаний предлагается использовать и нулевую комбинацию: A=0000, B=1000, C=1100, D=1110, E=1111. В этом случае две последующие таблицы дают аналогичный предыдущему результат выбора лучшего студента по итогам сессии:

$M_1 =$	A B D D B A C C	$M_1 =$	A B D D B A C C
$M_2 =$	C C D A B B A D	$M_2 =$	C C D A B B A D
$M_3 =$	B C C B A A C D	$M_3 =$	B C C B A A C D
$m =$	A B C A A A A C	$m =$	A A A A A A A A
$\mu_1(m \in M_1) = m \oplus M_1$	0000 0000 0010 1110 1000 0000 1100 0000	$\mu_1(m \in M_1) = m \oplus M_1$	0000 1000 1110 1110 1000 0000 1100 1100
$\mu_2(m \in M_2) = m \oplus M_2$	1100 0100 0010 0000 1000 1000 0000 0010	$\mu_2(m \in M_2) = m \oplus M_2$	1100 1100 1110 0000 1000 1000 0000 1110
$\mu_3(m \in M_3) = m \oplus M_3$	1000 0100 0000 1000 0000 0000 1100 0100	$\mu_3(m \in M_3) = m \oplus M_3$	1000 1100 1100 1000 0000 0000 1100 1110
$A_1 = slc(\mu_1)$	1111 111	$A_1 = slc(\mu_1)$	1111 1111 1111
$A_2 = slc(\mu_2)$	1111 111	$A_2 = slc(\mu_2)$	1111 1111 1111
$A_3 = slc(\mu_3)$	1111 11	$A_3 = slc(\mu_3)$	1111 1111 111
$M_3 =$	w i n n e r	$M_3 =$	w i n n e r

Если примитивы оценок неравнозначны по весу в метрике сравнения, то их нельзя обозначать унитарными кодами, которые выполняют лишь роль идентификаторов элементов в универсальном множестве равных примитивов. Поэтому для обозначения весов в кодах оценок был использован фактор количества единиц. Тем не менее, последующие действия, ориентированные на определение интегрального качества знаний студентов для выбора лучшего из них путем сравнения с идеальным результатом, не связаны с какими-либо арифметическими операциями, а используют только логические процедуры. Стратегически задача линейной вычислительной сложности решалась в рамках следующей формулировки – найти студента, который имеет минимальное расстояние к заранее известному идеальному результату, в виде вектор-эталона m . Альтернативная стратегия предполагает поиск лучшего из n студентов путем последовательного сравнения каждого из них друг с другом, на что будет затрачено существенно больше времени, поскольку вычислительная сложность такой процедуры – $(n^2/2)\Delta n$. Для ранжирования всех студентов относительно идеального результата необходимо выполнить $(n^2/2)\Delta n$ векторно-логических операций. После определения на каждом шаге лучшего студента соответствующую ему строку матрицы M (экзаменационной компетенции академической группы учащихся) следует исключить из последующего рассмотрения путем занесения в ее разряды единичных значений сигналов.

Для эффективной работы логического мультипроцессора необходимо сформировать M -матрицу (рис. 4) возможных вариантов решения проблемы, которая, в частности, может быть продуктом применения поисковой системы Google (Hadoop) к киберпространству Internet (big data), используемой для грубой и широкой выборки, когда количество найденных информационных фрагментов достигает сотен или тысяч вариантов. Затем наступает очередь функционирования мультипроцессора, формирующего точное решение по запросу m , которое должно быть сохранено в структурированной, специализированной части киберпространства для последующего многократного использования. Поэтому входом и выходом логического мультипроцессора следует считать формы киберпространства: Internet of Things, Big Data, Cyber-Physical Systems. Рыночная привлекательность предложенного мультипроцессора заключается в возможности его использования для: повышения качества и быстродействия поисковых процедур в big data, создания встроенных автоматических, автономных систем диагностирования и восстановления работоспособности, средств целеуказания и распознавания образов. Типичной для киберфизических систем, использующих информационное пространство, является функциональность, когда по запросу возникают многоальтернативные варианты его исполнения в векторно-логической форме описания компонентов киберпространства (субъектов, процессов или явлений), которые необходимы для управления социальными, биологическими и неприродными производственно-технологическими процессами без участия человека.

Перспективное направление будущего исследования – «Образные транзакции больших данных» – «Big Data Image Transactions». Образная культура мышления, общения или транзакций: перевод компонентов описания объекта из времени в пространство. Возможно ли такое? «Красный (100), синий (010), зеленый (001)» – записано во времени; если слова совместить, заменив их образами и исключив время, получится принципиально новый, но уже сгенерированный образ белого цвета (111). «Мама (100) мыла (010) раму (001)», – если обозначить слова примитивами, то их суперпозиция дает код параллельного образа (111),

который легко представить фотографией женщины со щеткой, моющей окно. Художник Леонардо да Винчи создает параллельный образ Моны Лизы путем суперпозиции последовательностных визуальных фрагментов. Но результат не имеет параметра времени и тем он ценен. Если разбить его картину на суперпозиционные фрагменты, то она потеряет свою привлекательность. Джоконду невозможно описать словами! Любая картина лучше ее текстуального описания. Тем не менее, на рынке электронных технологий уже существуют автоматические программные приложения как прямого синтеза «вербальное описание – картина», так и обратного анализа «картина – вербальное описание». Здесь можно начинать с голосового и/или мануального синтеза и анализа простых геометрических фигур (треугольник, квадрат, круг).

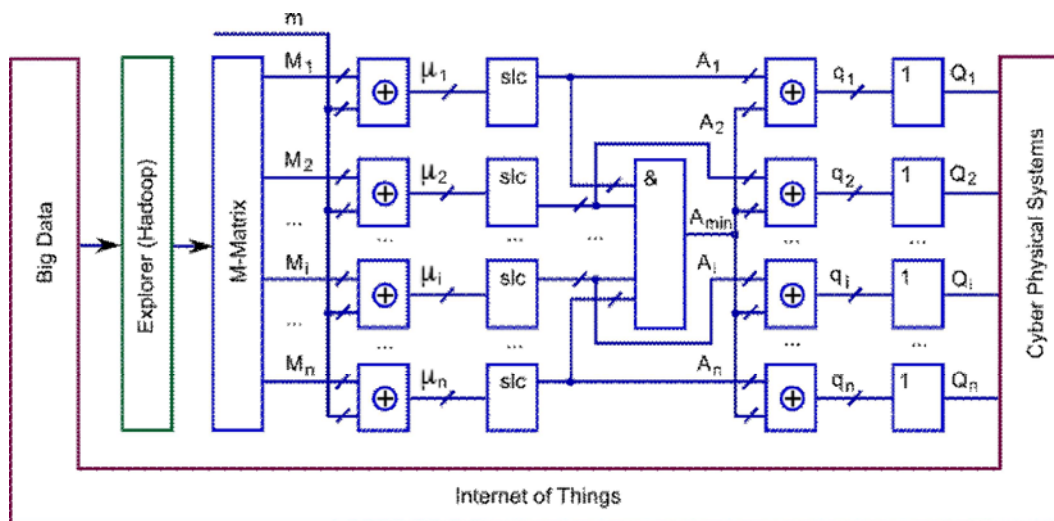


Рис. 4. Взаимодействие мультипроцессора с киберпространством

Еще одно направление исследования – «Образный транзакционный процессор», «Image Transactions Processor». Имеется в виду процессор, создающий билатеральную симметрию «образ – транзакция – образ», которая разбивается на два типа транзакторов: «вербальное (мануальное, голосовое) описание – транзакция-синтез – образ» и «образ – транзакция-анализ – вербальное (мануальное, голосовое) описание».

Язык последовательных символов, используемый человечеством, несовершенен по своим временным затратам, связанным с транзакциями информации между приемником и передатчиком. Поэтому ученые вынуждены сегодня констатировать факт, что рынку необходим дизаптор новой культуры параллельного, суперпозиционного, образного мышления, общения, генерирования, приема-передачи и восприятия информации и действительности без параметра времени. Следует переводить киберпространство в параллельные образы для осуществления транзакций на основе квантовых структур данных (свойства: суперпозиция, перепутывание, параллелизм). Этим можно существенно сэкономить память, время обучения, приема-передачи и восприятия информации в непосредственно взаимодействующих парах: «человек – компьютер», «компьютер – компьютер», «человек – человек» без традиционных интерфейсов (клавиатура, голос, тактильность). История знает аналоги в форме иероглифов, клинописи, настенных рисунков, где наши предки старались убрать несущественность времени при описании фактов прошлой действительности, чтобы минимизировать время нашего внимания на познание сущности, а не на процесс, который уже не очень интересен. Образ эффективнее для восприятия, чем вербальное описание, поэтому PR-акции всегда оперируют фотографиями с короткими слогами. Образное мышление – компрессия или сжатие процесса в одно фотографическое мгновение или явление. Фильм – в картину, слова и предложения – в образ. Последовательность логических элементов в один информационный «квантовый» примитив – кубит.

3. Выводы

Разработан универсальный критерий и структуры оценивания качества взаимодействия объектов в детерминированном киберпространстве на основе использования только логических операций для определения расстояний между процессами и явлениями путем построения высокопроизводительных параллельных процессоров, ориентированных на эффективное решение задач поиска, распознавания и принятия решений. Предложена универсальная аналитическая модель для определения бинарного взаимодействия между процессами и явлениями в многозначной логике. Разработана неарифметическая вычислительная параллельная структура для метрического оценивания детерминированных процессов, явлений и выбора оптимального решения. Приведены примеры использования вычислительных логических параллельных процессоров для решения практических задач.

1. Новая модель векторно-логического SIMD-мультипроцессора, который характеризуется отсутствием арифметических операций, параллельным вычислением расстояния между запросом и информационными квантами, а также одновременным определением лучшего из возможных n -решений по минимуму функции принадлежности, что дает возможность на порядок повысить быстродействие максимально точного поиска данных в big data.

2. Практическая значимость предложенных моделей заключается в необходимости реструктуризации киберпространства путем замены концепции аморфных big data на семантически классифицируемую информационную инфраструктуру полезных данных, предназначенных для управления киберфизическими процессами. В связи с этим предложены направления формирования технологической культуры big data для постепенного повышения уровня полезной информации от 0,4 до 10% путем компетентностной инфраструктуризации киберпространства больших данных.

Список литературы: 1. Hasan Alkhatib, Paolo Faraboschi, Eitan Frachtenberg, Hironori Kasahara, Danny Lange, Phil Laplante, Arif Merchant, Dejan Milojicic, Karsten Schwan. IEEE CS 2022 Report. IEEE Computer Society. 2014. 163 p. 2. [http://www.tsonline.ru/articles2/fix-corp/rost-obema-informatsii—realiitsifrovoy-vselennoy#sthash.rpNOdQLF.dpuf]. 3. Mayer-Schönberger V. Big Data: A Revolution that Will Transform How We Live, Work / V. Mayer-Schönberger, K. Cukie / Виктор Майер-Шенбергер, Кеннет Кукьер. Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живем, работаем и мыслим. Изд-во Манн, Иванов и Фербер. 2013. 240 с. 4. Demchenko Y., de Laat C., Membrey P. Defining architecture components of the Big Data Ecosystem // International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS). 2014. P. 104 – 112. 5. Grolinger K., Hayes M., Higashino W.A., L'Heureux A., Allison D.S., Capretz M.A.M. Challenges for MapReduce in Big Data // IEEE World Congress on Services (SERVICES). 2014. P. 182 – 189. 6. Lichen Zhang. A framework to specify big data driven complex cyber physical control systems // International Conference on Information and Automation (ICIA). 2014. P. 548 – 553. 7. Zhang Lichen. Designing big data driven cyber physical systems based on AADL // International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC). 2014. P. 3072 – 3077. 8. Michalik P., Stofa J., Zolotova I. Concept definition for Big Data architecture in the education system // 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII). 2014. P. 331 – 334. 9. Munoz M. Space systems modeling using the Architecture Analysis & Design Language (AADL) // International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW). 2013. P. 97 – 98. 10. Курс высшей алгебры. М.: Наука. 1968. 426с. 11. Michael A. Nielsen & Isaac L. Chuang. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press. 2010. 676p. 12. Stenholm Stig, Kalle-Antti Suominen. Quantum approach to informatics.– John Wiley & Sons, Inc. 2005. 249p. 13. Hahanov V.I., Litvinova E.I., Chumachenko S.V. et al. Qubit Model for solving the coverage problem // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium. Kharkov. 14-17 September, 2012. P.142- 144. 14. Горбатов В.А. Основы дискретной математики. М.: Высшая школа, 1986. 311 с. 15. Бондаренко М.Ф., Хаханов В.И., Литвинова Е.И. Структура логического ассоциативного мультипроцессора// Автоматика и телемеханика. 2012. № 10. С. 71-92. 16. Ariane Hellinger, Ariane Hellinger, Heinrich Seeger. Cyber-Physical Systems. Driving force for innovation in mobility, health, energy and production. Acatech. National Academy of Science and Engineering. 2011. 48p. 17. Vladimir Hahanov, Wajeb Gharibi, Kudin A.P., Ivan Hahanov, Ngene Cristopher (Nigeria), Tiekura Yeve (Côte d'Ivoire), Daria Krulevska, Anastasya Yerchenko, Alexander Mishchenko, Dmitry Shcherbin, Aleksey Priymak. Cyber Physical Social Systems – Future of Ukraine?// Proceedings of 12th IEEE EWDT Symposium, Kiev, Ukraine, September 26-29. 2014. P. 67-81. 18. Han Hu, Yonggang Wen, Tat-Seng Chua, Xuelong LiP. Toward Scalable Systems for Big Data Analytics: A Technology Tutorial. IEEE Explore: 2014. ISSN: 2169-3536. P. 652

– 687. **19.** *Fadi H. Gebara, H. Peter Hofstee, and Kevin J. Nowka*, IBM Research–Austin. Second-Generation Big Data Systems. IEEE Computer magazine. 2015, January. P. 36-41. **20.** *PureData System for Analytics*: http://www-01.ibm.com/common/ssi/cgi-bin/ssialias?subtype=SP&infotype=PM&appname=SWGE_WA_UZ_USEN&htmlfid=WAS12385USEN&attachment=WAS12385USEN.PDF#loaded

Поступила в редколлегию 11.12.2014

Хаханов Владимир Иванович, декан факультета КИУ ХНУРЭ, д-р техн. наук, профессор кафедры АПВТ ХНУРЭ, IEEE Senior Member, IEEE Computer Society Golden Core Member. Научные интересы: техническая диагностика цифровых систем, сетей и программных продуктов. Увлечения: баскетбол, футбол, горные лыжи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +380 57 70-21-326. E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua.

Зайченко Сергей Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: автоматизированное проектирование и верификация цифровых систем. Увлечения: технологии онлайн-образования. Адрес: Украина, 61045, Харьков, ул. Космическая, 23а, тел. (057)-760-47-25.

Мищенко Александр Сергеевич, аспирант кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: облачные технологии, web-программирование. Увлечения: путешествия. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +380 57 70-21-326, E-mail: santific@gmail.com.

Хаханов Иван Владимирович, студент факультета КИУ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых систем, программирование. Увлечения: горные лыжи, английский язык. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +380 57 70-21-326.

АНАЛИЗ ДЕЙСТВИЯ КИБЕРАТАК НА ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ РЕСУРС В ИНФОРМАЦИОННО- ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ

Анализируются современные угрозы в информационно-телекоммуникационных системах. Обосновывается актуальность защиты видеоинформационного ресурса. Описывается проявление атаки типа “распределенные атаки на отказ” при воздействии на видеоинформационный ресурс. Рассматриваются существующие методы борьбы с атаками типа “DDoS-атака”. Предлагается разработка нового метода повышения устойчивости видеоинформационного ресурса относительно действий кибератак в информационно-телекоммуникационных сетях.

Введение

Стремительное развитие информационных технологий дало возможность широкому распространению передачи мультимедийных данных по информационно-телекоммуникационным сетям. Применение мультимедиа для передачи данных позволяет увеличить качество восприятия информации и человек уделяет наибольшее внимание визуальной информации. В настоящее время передача мультимедийных файлов в одном направлении используется в системах видеомониторинга, а двухнаправленная передача применяется в системах видеоконференцсвязи. На сегодняшний момент данные системы очень широко применяются в государственных ведомственных структурах для повышения качества управления по соответствующим направлениям деятельности. Сфера использования передачи видеоданных в современной обстановке на территории нашего государства расширилась из-за применения беспилотных летательных аппаратов для осуществления наблюдения в режиме реального времени в условиях ведения боевых действий.

Цель данной работы – проанализировать существующие методы кибернетических атак на видеоинформационный ресурс и действующие на данный момент способы кибернетической защиты от перечисленных угроз.

Актуальность исследования связана с тем фактом, что из-за важности передаваемой информации видеоинформационный ресурс может подвергаться кибератакам, поэтому необходимо проанализировать существующие методы проведения кибератак и киберзащиты от данных угроз для повышения информационной безопасности видеоинформационного ресурса государства.

1. Описание существующих угроз

На данный момент существует несколько способов [1] разделения атак в соответствии со следующими характеристиками: достигаемая цель, объект атаки, используемая уязвимость, сложность, способ, место и уровень реализации. Разделение атак по типам наглядно представлено на рис. 1.

Один из примеров реализации атаки приведен на рис. 2.

Для централизованного взаимодействия по обеспечению киберзащиты информационно-телекоммуникационных систем во всем мире создаются специализированные организации типа CERT (Computer Emergency Response Team of Ukraine – команда реагирования на компьютерные чрезвычайные события).

В 2007 году было создано специализированное структурное подразделение Государственного центра защиты информационно-телекоммуникационных систем (ГЦЗ ИТС) Государственной службы специальной связи и защиты информации Украины (Госспецсвязи) CERT-UA. Основная цель CERT-UA – обеспечить защиту государственных информационных ресурсов и информационных и телекоммуникационных систем от несанкционированного доступа, неправомерного использования, а также нарушений их конфиденциальности, целостности и доступности. Вместе с тем, принимая во внимание трансграничность киб-

угроз, сфера деятельности CERT-UA включает, в том числе, меры, направленные на ликвидацию инцидентов информационной безопасности, возникающие в информационном киберпространстве украинского сегмента сети Интернет.

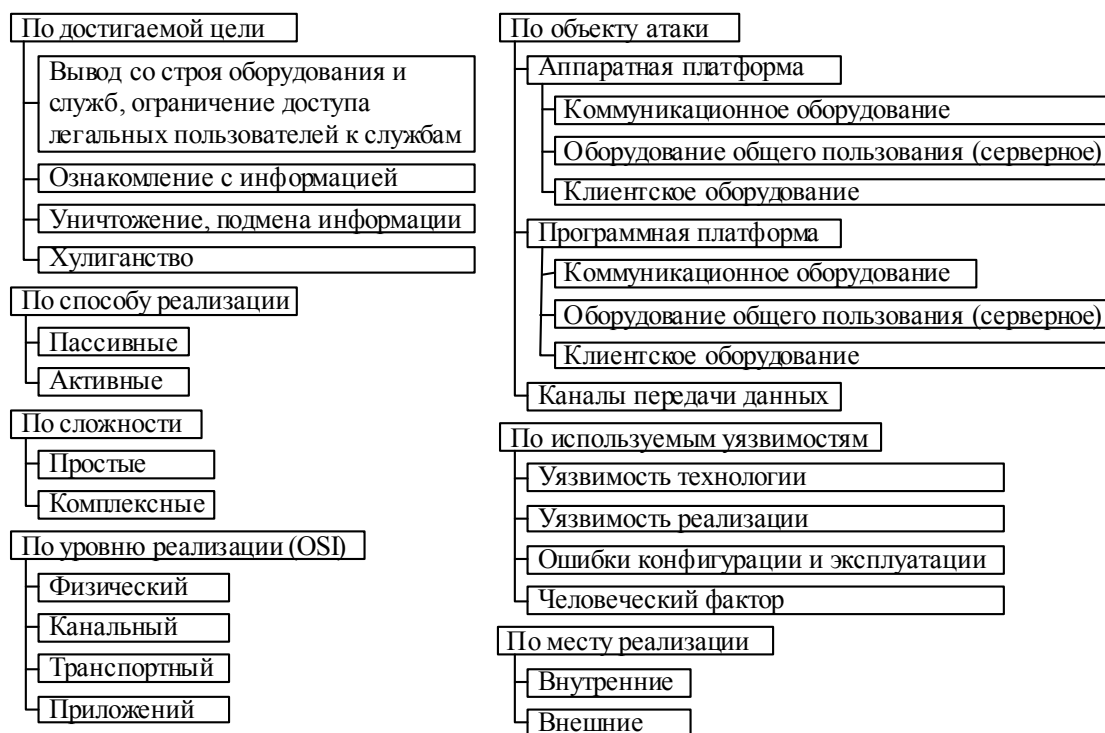


Рис. 1. Разделение атак в соответствии с характеристиками

В 2014 году приняты меры по реагированию на 216 компьютерных инцидентов [2]. Статистика по типам угроз и секторам возникновения приведена в табл. 1, 2. Отметим, что данные приводятся в отношении тех инцидентов, по поводу которых CERT-UA было сообщено в установленном порядке.

Как видно из указанных таблиц, наиболее распространенными видами кибератак (43 для украинского государственного сектора, 2 для украинского коммерческого сектора, 3 для зарубежного государственного сектора, 3 для зарубежного коммерческого сектора) являются атаки типа DDoS-атака. Это связано прежде всего с легкостью реализации данного типа атаки.

Таблица 1
Количественное соотношение угроз

Типы угроз	Количество	Доля %
DDoS	51	24
Несанкционированный доступ	39	18
Фишинг	30	14
Malware	25	12
Advanced Persistent Threat (APT)	25	12
Другое	46	21
Итого	216	100

Таблица 2
Сектора возникновения

Типы угроз	Принадлежность сектора				
	UAGOV	UACOM	FGOV	FCOM	UACTZ
DDoS	43	2	3	3	0
Несанкционированный доступ	33	3	3	0	0
Фишинг	0	6	1	23	0
Malware	7	10	0	1	7
Advanced Persistent Threat (APT)	21	3	1	0	0
Бот-сети	5	6	2	2	1
Уязвимости	13	1	1	0	2
Мошенничество	2	6	0	0	0
Утечка информации	0	3	0	0	0
Другое	0	2	0	0	0
Итого	124	42	11	29	10

2. Суть атак типа DDoS-атака

Атаки на отказ заключаются в блокировании доступа пользователей к сервису, что предоставляется целевым объектом [3]. Данная атака может быть произведена двумя способами. Первый способ возможен при наличии уязвимостей программного обеспечения, установленного на клиенте объекта атаки, позволяет обрушить систему путем пересылки вредных пакетов. Второй способ предполагает использование больших объемов бессмысленного трафика для загрузки ресурсов системы, которые необходимы для обработки запросов легитимных пользователей.

И если от первого способа атаки можно защититься, устраняя уязвимости путем обновления программного обеспечения, то предупредить атаку второго типа уже не так просто. Если трафик атаки на отказ направляется из многих источников, то такие атаки называются распределенными атаками на отказ. При использовании многих источников сила атаки усиливается, и проблема защиты от нее осложняется еще больше. Еще один негативный фактор заключается в применении эффекта отражения трафика, что еще больше усложняет идентификацию источников атаки.

Кроме того, последние тенденции указывают на появление новых типов атак - скрытых. В этом случае подконтрольные атакующему компьютеры получают доступ к целевому сервису на вполне законных основаниях (например, посещают веб-сайт компании) и загружают канал ресурсоемкими операциями (ухудшение качества) или в определенный момент «взрываются» бессодержательным трафиком. Это ставит перед системами защиты новые нетривиальные задачи выявления и противодействия.

Описание и проявление атаки типа «распределенные атаки на отказ» схематически показаны на рис. 3.

3. Методы борьбы с атаками типа DDoS-атака

Для борьбы с атаками типа DDoS могут применяться системы обнаружения и предупреждения вторжений, управляемые коммутаторы со списками контроля доступа и резервирование линий связи между отдельными узлами.

Применение систем обнаружения и предупреждения вторжений позволяет контролировать сетевую активность как на периметре сети, так и локально, защищать локальную сеть извне и является наиболее универсальным способом защиты из-за широкого функционала.

Данные системы работают:

- на сетевом уровне, когда фильтрация происходит на основе адресов отправителя и получателя пакетов, номеров портов транспортного уровня модели OSI и статических правил, заданных администратором;

- на сеансовом уровне (также известные как stateful) — отслеживающие сеансы между приложениями, не пропускающие пакеты нарушающих спецификации TCP/IP, часто ис-

пользуемые в злонамеренных операциях — сканировании ресурсов, взломах через неправильные реализации TCP/IP, обрыв/замедление соединений, инъекции данных;

- на уровне приложений, фильтрации на основании анализа данных приложения, передаваемых внутри пакета. Такие типы экранов позволяют блокировать передачу нежелательной и потенциально опасной информации на основании политик и настроек.

Некоторые решения, относимые к сетевым экранам уровня приложения, представляют собой прокси-серверы с некоторыми возможностями сетевого экрана, реализуют прозрачные прокси-серверы, со специализацией по протоколам. Возможности прокси-сервера и многопротокольная специализация делают фильтрацию значительно более гибкой, чем на классических сетевых экранах, но такие приложения имеют все недостатки прокси-сервера (например, анонимизация трафика).



Рис. 2. Типовая реализация атаки

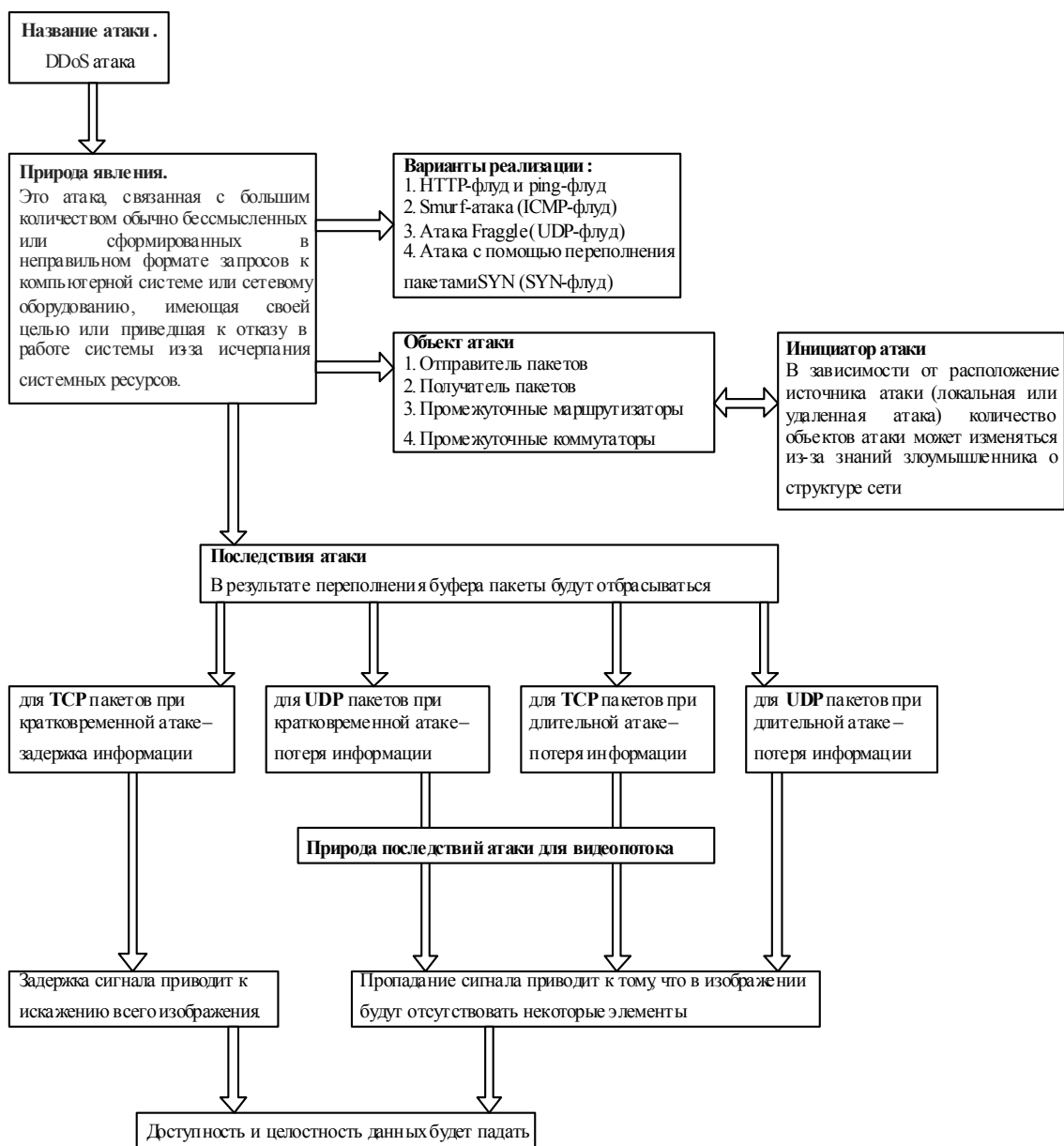


Рис. 3. Описание и проявление атаки типа DDoS-атака

Применение управляемых коммутаторов со списками контроля доступа позволяет локализовать атаку и блокировать атакующие сегменты вплоть до отдельного хоста. Современные коммутаторы позволяют защититься от простейших DDoS-атак типа land attack, blat attack, TCP null scan, TCP xmasscan, tcp syn srcport less 1024, ping death attack, tcp tiny frag attack. Данный метод эффективный при защите от локальной атаки. Такие коммутаторы работают на сетевом уровне, когда фильтрация происходит на основе адресов отправителя и получателя пакетов, номеров портов транспортного уровня модели OSI и статических правил, заданных администратором.

Для предотвращения перегрузки сетевых устройств применяется алгоритм Weighted Random Early Detection (WRED) для управления переполнением очередей.

Теория очередей позволяет оценить среднюю длину очереди и среднее время ожидания заявки в зависимости от характеристик входного потока и времени обслуживания телекоммуникационного устройства.

Будем считать, что среднее время между поступлениями заявок известно и равно T . Это значит, что интенсивность поступления заявок равна $\lambda = \frac{1}{T}$. Будем считать, что среднее время обслуживания заявки равно b . Это означает, что телекоммуникационное устройство способно продвигать заявки на выход с интенсивностью $\mu = \frac{1}{b}$. Принятие таких предположений дает простой результат для среднего времени ожидания заявки на очередь, которое мы обозначим через ω : $\omega = b \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$. Очевидно, что при увеличении среднего времени поступления заявок происходит резкое увеличение среднего времени их выполнения и при сопоставимости времени между поступлениями заявок с временем их обслуживания очередь обслуживаться не будет.

Алгоритм Weighted Random Early Detection (WRED) позволяет отслеживать длину очереди и отбрасывает некоторый процент пакетов в очереди для улучшения производительности сети (табл.3).

Для того чтобы определить, достаточно ли полна очередь, и принять решение касательно отбрасывания пакетов, WRED измеряет среднюю глубину очереди (average queue depth). Затем значение average depth сравнивается с minimum threshold и maximum threshold. В зависимости от результата сравнения выполняются различные действия.

Таблица 3

Состояние алгоритма отбрасывания конца очереди

Значение average depth относительно threshold	Действие	Название действия в WRED
average < min threshold	Пакеты не отбрасываются	No drop
min threshold < average < max threshold	Процент пакетов отбрасывается. Процент пакетов, которые отбрасываются, возрастает от 0 до максимального процента по мере приближения значения average к max threshold	Random drop
average > max threshold	Все новые пакеты отбрасываются	Full drop

Mark probability denominator (MPD) — на основании этого значения вычисляется процент пакетов, которые будут отброшены.

WRED дает больший приоритет пакетам с определенными значениями IPP и DSCP. Для того чтобы сделать это, WRED использует разные профили трафика (traffic profile) для пакетов с разными значениями IPP и DSCP.

WRED traffic profile состоит из настроек для трёх переменных:

- minimum threshold,
- maximum threshold,
- MPD.

Профили WRED, заданные по умолчанию для DSCP-based WRED (табл. 4):

Таблица 4

Значения переменных WRED алгоритма для разного класса обслуживания

DSCP	Min threshold	Max threshold	MPD	1/MPD
AFx1	33	40	10	10%
AFx2	28	40	10	10%
AFx3	24	40	10	10%
EF	37	40	10	10%

Зависимость вероятности потери пакета для разной средней длины очереди показана на рис. 4.



Рис. 4. Зависимость вероятности потери пакета для разной средней длины очереди

Резервирование линий связи между отдельными узлами является самым простым решением. Применение протокола RSTP (Rapid spanning tree protocol, быстрый протокол разворачивающегося дерева) ускоренной реконфигурации дерева, использующегося для исключения петель (исключения дублирующих маршрутов) в соединениях коммутаторов Ethernet с дублирующими линиями, позволяет в случае выхода из строя телекоммуникационного устройства произвести перестройку маршрута прохождения сигнала за время до 2 с.

Недостатками перечисленных методов являются вносимые из-за обработки пакетов задержки, в результате чего ограничивается скорость передачи сигнала в сети, увеличивается стоимость оборудования и подписки на сигнатуры, не обеспечивается защита от замаскированных вирусных атак.

Заключение

На данный момент существующие методы защиты от кибератак на видеоинформационный ресурс имеют ряд недостатков: вносимые из-за обработки пакетов задержки; ограниченное количество выявляемых угроз; при отбрасывании пакетов для предотвращения переполнения буфера возможна потеря информации. Поэтому необходимо разработать новый метод повышения устойчивости видеоинформационного ресурса относительно действий кибератак в информационно-телекоммуникационных сетях на основании кодирования источника.

Список литературы: 1. Мартынюк И. Материалы технического тренинга «Построение безопасных сетей на оборудовании D-Link», <http://service.d-link.ua/sites/default/files/files/Security.zip>, Киев, 2012. 190с. 2. Звіт CERT-UA за 2014 рік, <http://cert.gov.ua/?p=2019>, 2015 3. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. СПб.: Питер, 2006. 958 с.

Поступила в редколлегию 19.12.2014

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. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79. E-mail: barannik_v_v@mail.ru.

Подлесный Сергей Анатоліевич, начальник отделения Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: кодирование и защита информации для передачи в телекоммуникационных системах. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79. E-mail: serg380638472732@gmail.com.

МЕТОД ТРЕХМЕРНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МЕЖКАДРОВОГО КОДИРОВАНИЯ БЕЗ ПОТЕРИ ЦЕЛОСТНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО РЕСУРСА

Обосновывается проблематичность обеспечения безопасности видеоинформационного ресурса в системах кризисного аэромониторинга. Формулируются и доказываются теоремы о нумерации межпараллелепипедных трехмерных дифференциальных чисел. На основе доказанных теорем организуется вычисление кода трехмерным структурам данных. Разрабатывается метод обработки трехмерных структур данных на основе трехмерного дифференциального кодирования. Обосновывается повышение степени информативности синтаксического представления информации без потери целостности. В результате этого формируется эффективное синтаксическое описание семантического содержания государственных видеоинформационных ресурсов.

1. Введение

На современном этапе развития информационного общества становится очевидным ключевая роль видеоинформационных ресурсов в процессе решения общегосударственных задач [1 – 3]. Требуется решать вопросы, связанные с обеспечением доступности, целостности и достоверности видеоинформации. При этом особая проблематичность проявляется для приложений доставки видеоданных с использованием дистанционных систем кризисного аэромониторинга [4]. Здесь ключевым механизмом являются интегрируемые на борту технологии обработки статических и динамических видеоинформационных ресурсов (ВИР) [4 – 6].

В то же время реализация процессов устранения избыточности в изображениях имеет сложную структуру. Отсюда *актуальная научно-прикладная задача* состоит в повышении эффективности технологий обработки ВИР для бортовых комплексов дистанционного аэромониторинга кризисных ситуаций.

Проведенный анализ различных подходов относительно процессов устранения избыточности выявил, что дополнительное увеличение степени эффективности синтаксического описания семантического содержания ВИР обеспечивается за счет учета структурных закономерностей одновременно по трем координатам [6; 7]. Это обусловлено: необходимостью обрабатывать последовательности кадров изображений; представлением цветовой модели изображений в виде трех цветовых плоскостей; возможностью дополнительного снижения избыточности на основе одновременного учета структурных закономерностей по трем координатам. Однако в работах [6; 7] представлено кодирование трехмерных структур на основе абсолютного базиса оснований. Такой подход имеет ряд недостатков, а именно:

1. Снижается коэффициент сжатия для фрагментов изображений с: большим динамическим диапазоном $\psi_{jiz} \rightarrow 2^M - 1$; равномерно распределенными значениями максимальных величин (всплесков) в разных частях фрагмента изображения; равномерно распределенными и большими значениями динамических диапазонов для нескольких плоскостей в составе трехмерной структуры данных. При этом для изображений с такими свойствами увеличиваются удельные затраты разрядов на представления оснований ТПЧ, снижается степень сжатия служебной информации.

2. Не учитываются структурные особенности трехмерного представления данных, чьи физические свойства в зависимости от направления будут различными, т.е. не учитываются случаи, когда трехмерные структуры данных имеют по разным направлениям различные физические свойства. Другими словами, не устраняются виды избыточности, специфические для обрабатываемой трехмерной структуры.

Для того чтобы избежать уменьшения степени сжатия, вызванной равномерным и большим значением динамического диапазона, предлагается представлять ТПЧ в дифференциальном виде. Поэтому *цель исследования* заключается в разработке метода трехмерного дифференциального межкадрового кодирования без потери целостности информационного ресурса.

2. Определение трехмерного дифференциального числа

Дифференциальное представление ТПЧ состоит в замене исходных разрядов ТПЧ a_{jiz} на разность $\Delta a_{jiz}^{(\min)}$ или $\Delta a_{jiz}^{(\max)}$ соответственно относительно максимального или минимального уровней ТПЧ. При этом в качестве отсчетов максимального уровня ТПЧ используются значения оснований Ψ_{jiz} , вычисленные по формулам

$$\Psi_{jiz} = \min \{ \lambda_j^{(z)}; \lambda_i^{(z)}; \lambda_{ji}^{(z)} \}; \quad (1)$$

$$\psi_{jiz} = \min \{ \lambda_j^{(z)}; \lambda_i^{(z)} \}. \quad (2)$$

Отличие формулы (1) от (2) состоит в том, что в первом случае минимальное значение выбирается дополнительно с учетом выявленного максимума по ji -й вертикали.

В зависимости от присущих трехмерной структуре данных свойств, а именно, в каком направлении наблюдается наибольшая степень равномерности динамического диапазона, то в том направлении осуществляется поиск минимальных значений, т.е. относительно того направления разряды ТПЧ будут рассматриваться как разряды ТДПЧ. Отсюда следует, что значения отсчетов минимального уровня ТПЧ могут находиться для всей трехмерной структуры μ_{jiz} :

$$\mu_{jiz} = \max \{ \mu_j^{(z)}; \mu_i^{(z)}; \mu_{ji}^{(z)} \}; \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mu_j^{(z)} = \min_{1 \leq i \leq n_{\text{стр}}} \{ a_{jiz} \}; \\ 1 \leq j \leq n_{\text{стр}}; 1 \leq z \leq n_c; \end{cases} \quad \begin{cases} \mu_i^{(z)} = \min_{1 \leq j \leq n_{\text{стр}}} \{ a_{jiz} \}; \\ 1 \leq i \leq n_{\text{стр}}; 1 \leq z \leq n_c; \end{cases} \quad \begin{cases} \mu_{ji}^{(z)} = \min_{1 \leq z \leq n_c} \{ a_{jiz} \}; \\ 1 \leq j \leq n_{\text{стр}}; 1 \leq i \leq n_{\text{стр}}; \end{cases} \quad (4)$$

или для отдельных сечений $\mu_{ji}^{(z)}$:

$$\begin{cases} \mu_{ji}^{(z)} = \min_{1 \leq z \leq n_c} \{ a_{jiz} \}; \\ 1 \leq j \leq n_{\text{стр}}; 1 \leq i \leq n_{\text{стр}}; \end{cases} \quad (5)$$

где μ_{jiz} – минимальный уровень диапазона, в котором может находиться значение jiz -го разряда ТДПЧ с учетом выявленных минимумов: $\mu_j^{(z)}, \mu_i^{(z)}$ – минимальные значения соответственно для j -го столбца и i -й строки для z -го сечения, а $\mu_{ji}^{(z)}$ – минимальное значение для ji -й вертикали.

Отличие формулы (3) от (5) заключается в том, что значение jiz -го отсчета минимального ТПЧ выбирается как максимум на пересечении трех минимумов i -й строки, j -го столбца и z -го сечения.

В зависимости от того, какие формулы используются при вычислении значений отсчетов максимального и минимального уровней ТПЧ, существуют следующие направления формирования разрядов дифференциальных трехмерных чисел:

1. Отсчеты максимального и минимального уровней ТПЧ находятся соответственно по формулам (1) и (3), тогда

$$\Delta a_{jiz}^{(\max)} = \Psi_{jiz} - 1 - a_{jiz}; \quad (6)$$

$$\Delta a_{jiz}^{(\min)} = a_{jiz} - \mu_{jiz}. \quad (7)$$

В соответствии с этим направлением сформулируем определение: ТДПЧ, разряды которого определяются по формулам (6) и (7), называются межпараллелепипедными.

2. Отсчеты минимального уровня находятся по формуле (5), а отсчеты максимального уровня вычисляются с помощью (1) или (2). Следовательно, разряд ТДПЧ относительно минимального уровня равен

$$\Delta a_{jiz}^{(\min)} = a_{jiz} - \mu_{ji}^{(z)}, \quad (8)$$

а относительно максимального уровня находится по формуле (6), где для Ψ_{jiz} используются формулы (1) или (2).

В общем случае согласно определениям разряды трехмерного дифференциального числа находятся в интервале

$$0 \leq \Delta a_{jiz}^{(\max)}, \Delta a_{jiz}^{(\min)} \leq \Psi_{jiz} - \mu_{jiz} - 1. \quad (9)$$

Обозначим в соотношении (9) разность между Ψ_{jiz} и μ_{jiz} как S_{jiz} :

$$S_{jiz} = \Psi_{jiz} - \mu_{jiz}. \quad (10)$$

Тогда в соответствии с определением трехмерного числа величины S_{jiz} являются основаниями разрядов $\Delta a_{jiz}^{(\max)}, \Delta a_{jiz}^{(\min)}$ ТДПЧ. Поэтому для количества различных перестановок с повторениями трехмерных структур данных, на которые наложены ограничения сверху S_{jiz} , суммарное количество ΔV различных ТДПЧ, удовлетворяющих неравенству (9), равно

$$\Delta V = \prod_{j=1}^{n_{\text{стр}}} \prod_{i=1}^{n_{\text{стр}}} \prod_{z=1}^{n_c} S_{jiz}. \quad (11)$$

Величина ΔV является мощностью трехмерного дифференциального пространства, равная количеству ТДПЧ, разряды которых удовлетворяют неравенству (9).

Для обоснования эффективности перехода от ТПЧ к ТДПЧ требуется показать, что количество V различных ТПЧ больше количества различных ТДПЧ, удовлетворяющих неравенству (9). Для этого сформулируем и докажем теорему о сравнении мощности абсолютного и дифференциального трехмерных пространств.

Теорема 1 сравнения пространств. *Если максимальные уровни разрядов ТПЧ и ТДПЧ совпадают и равны Ψ_{jiz} , а разряды ТДПЧ ограничены снизу величинами μ_{jiz} , из которых хотя бы одна не равна 0, то выполняется неравенство*

$$\Delta V < V. \quad (12)$$

Доказательство. Выразим величины ΔV и V через основания соответствующих

разрядов трехмерных чисел $\prod_{j=1}^{n_{\text{стр}}} \prod_{i=1}^{n_{\text{стр}}} \prod_{z=1}^{n_c} (\Psi_{jiz} - \mu_{jiz})$ и $\prod_{j=1}^{n_{\text{стр}}} \prod_{i=1}^{n_{\text{стр}}} \prod_{z=1}^{n_c} \Psi_{jiz}$. Из сравнения приве-

денных выражений вытекает, что если найдется хотя бы одна величина $\mu_{jiz} \geq 1$, то неравенство (12) выполняется. *Теорема 1 доказана.*

Из доказанного следует, что дифференциальное ТПЧ имеет большее количество комбинаторной избыточности, чем абсолютное ТПЧ. Для устранения такой избыточности необходимо разработать метод трехмерного дифференциального кодирования.

3. Разработка метода обработки данных на основе трехмерного дифференциального кодирования

Суть метода заключается в формировании кода для трехмерной структуры данных (параллелепипеда), рассматриваемой как трехмерное дифференциальное число. В общем виде такой процесс задается выражением:

$$R = f(x, y, z), \quad (13)$$

где R – значение кода, полученного для трехмерной структуры данных, описываемой функционалом $f(x, y, z)$.

Поскольку равномерность диапазонов может изменяться или вообще отсутствовать для различных направлений в трехмерной структуре данных (ТСД), а значения кода номера ТДПЧ может превышать диапазон машинного слова, то для разработки метода обработки требуется:

1. Вывести правило выбора части параллелепипеда, для которой можно образовать один код и исключить переполнение разрядной сетки машинного слова.

2. Выбрать, по каким направлениям трехмерной структуры разряды ТПЧ будут рассматриваться как разряды ТДПЧ.

3. Вывести системы правил, позволяющие вычислить значение кода для трехмерной структуры данных, удовлетворяющих ограничениям (9) и (14) (для межпараллелепипедного ТДПЧ).

4. Определить выражения, организующие конвейерную и параллельную схемы ТДПК.

В качестве правила отбора части параллелепипеда предлагается использовать правило применяемое в случае абсолютного трехмерного кодирования. Суть его состоит в сравнении значения основания укрупненного разряда с максимальным значением в машинном слове.

Разработаем кодирование для межпараллелепипедных ТДПЧ. Для вывода выражения, на основе которого вычисляется значение кода для трехмерной структуры данных, удовлетворяющих ограничению (9), сформулируем и докажем теорему о нумерации межпараллелепипедных трехмерных дифференциальных чисел.

Теорема 2 о трехмерной дифференциальной нумерации. *Всякой целочисленной структуре данных, представленной как межпараллелепипедное ТДПЧ*

$D_v = \{d_{jiz}\}; 1 \leq j \leq n_{стр}; 1 \leq i \leq n_{стб}; 1 \leq z \leq n_c$, значения разрядов которого удовлетворяют неравенству (9), можно присвоить код R_v , равный

$$R_v = \{R_{min,v}, R_{max,v}\}; \quad (14)$$

$$R_{min,v} = \sum_{j=1}^{n_{стб}} \sum_{i=1}^{n_{стр}} \sum_{z=1}^{n_c} d_{jiz} \delta_{jiz}, \text{ если } d_{jiz} = \Delta a_{jiz}^{(min)}; \quad (15)$$

$$R_{max,v} = \sum_{j=1}^{n_{стб}} \sum_{i=1}^{n_{стр}} \sum_{z=1}^{n_c} d_{jiz} \delta_{jiz}, \text{ если } d_{jiz} = \Delta a_{jiz}^{(max)}; \quad (16)$$

$$\delta_{jiz} = \prod_{\gamma=z+1}^{n_c} s_{ji\gamma} \prod_{k=i+1}^{n_{стр}} \prod_{\gamma=1}^{n_c} s_{jk\gamma} \prod_{\eta=j+1}^{n_{стб}} \prod_{k=1}^{n_{стр}} \prod_{\gamma=1}^{n_c} s_{\eta k\gamma}, \quad (17)$$

где R_v – код межпараллелепипедного трехмерного дифференциального числа с системой оснований $S = \{s_{jiz}\}, 1 \leq j \leq n_{стб}; 1 \leq z \leq n_c; 1 \leq i \leq n_{стр}$; $R_{min,v}, R_{max,v}$ – коды трехмерных дифференциальных чисел, вычисленные соответственно относительно нижнего и верхнего уровней ТДПЧ; $n_{стб}, n_{стр}$ – соответственно количество столбцов и количество строк в одном сечении трехмерной структуры, а n_c – количество сечений (длина вертикали); δ_{jiz} – накопленное произведение оснований s_{jiz} .

Доказательство. В соответствии с неравенством (9) трехмерное дифференциальное число является абсолютным трехмерным числом, заданным в системе оснований S . В этом случае основаниями разрядов d_{jiz} являются величины s_{jiz} . Обозначим накопленное произведение оснований s_{jiz} , образованного для $n_c - z + n_c(n_{стр} - i) + (n_{стб} - j)n_c n_{стр}$ элементов, через величину δ_{jiz} (формула (17)). Тогда по аналогии с абсолютной нумерацией ТПЧ коды $R_{\min,v}$, $R_{\max,v}$ для ТДПЧ относительно минимального и максимального уровней находится соответственно по выражениям (15) и (16). Но поскольку в общем случае $\Delta a_{jiz}^{(\max)} \neq \Delta a_{jiz}^{(\min)}$, то $R_{\min,v} \neq R_{\max,v}$. Следовательно, код для всего межпараллелепипедного ТДПЧ равен минимальному значению из двух кодов.

Теорема 2 доказана.

Из теоремы 2 вытекает выполнение неравенства, состоящего в том, что максимальное значение $R(\max)$ межпараллелепипедного ТДПЧ с основаниями s_{jiz} не будет превышать величину разности между значениями кодов $N_{\max,v}$ и $N_{\min,v}$, соответствующих максимальному и минимальному ТПЧ:

$$N_{\max,v} - N_{\min,v} \geq R(\max) = \prod_{j=1}^{n_{стб}} \prod_{i=1}^{n_{стр}} \prod_{z=1}^{n_c} s_{jiz} - 1, \quad (18)$$

Поскольку разрядами максимального и минимального ТПЧ являются соответственно основания ТПЧ ψ_{jiz} и минимальные значения μ_{jiz} , то

$$N_{\max,v} = \left(\prod_{j=1}^{n_{стб}} \prod_{i=1}^{n_{стр}} \prod_{z=1}^{n_c} \psi_{jiz} \right) - 1 = \sum_{j=1}^{n_{стб}} \sum_{i=1}^{n_{стр}} \sum_{z=1}^{n_c} (\psi_{jiz} - 1) \omega_{jiz}; \quad (19)$$

$$N_{\min,v} = \sum_{j=1}^{n_{стб}} \sum_{i=1}^{n_{стр}} \sum_{z=1}^{n_c} \mu_{jiz} \omega_{jiz}. \quad (20)$$

Тогда величина разности между $N_{\max,v}$ и $N_{\min,v}$, численно равная количеству различных ТПЧ, на значения разрядов которых наложены только ограничения ψ_{jiz} сверху, находится по формуле:

$$\begin{aligned} N_{\max,v} - N_{\min,v} &= \sum_{j=1}^{n_{стб}} \sum_{i=1}^{n_{стр}} \sum_{z=1}^{n_c} (\psi_{jiz} - 1) \omega_{jiz} - \sum_{j=1}^{n_{стб}} \sum_{i=1}^{n_{стр}} \sum_{z=1}^{n_c} \mu_{jiz} \omega_{jiz} = \\ &= \sum_{j=1}^{n_{стб}} \sum_{i=1}^{n_{стр}} \sum_{z=1}^{n_c} (\psi_{jiz} - \mu_{jiz} - 1) \omega_{jiz} = \sum_{j=1}^{n_{стб}} \sum_{i=1}^{n_{стр}} \sum_{z=1}^{n_c} (s_{jiz} - 1) \omega_{jiz}. \end{aligned} \quad (21)$$

Из анализа формулы (21) следует, что количество ТПЧ, номера которых находятся в диапазоне между $N_{\max,v}$ и $N_{\min,v}$, численно равно номеру трехмерного числа, разряды которого ограничены сверху основаниями ψ_{jiz} и равны основаниям межпараллелепипедного ТДПЧ, уменьшенным на 1. Запишем выражение для вычисления номера $R(\max)$ максимального ТДПЧ через взвешенную сумму его разрядов, равных s_{jiz} :

$$R(\max) = \prod_{j=1}^{n_{стб}} \prod_{i=1}^{n_{стр}} \prod_{z=1}^{n_c} s_{jiz} - 1 = \sum_{j=1}^{n_{стб}} \sum_{i=1}^{n_{стр}} \sum_{z=1}^{n_c} (s_{jiz} - 1) \delta_{jiz}. \quad (22)$$

Значит, для доказательства неравенства (18) необходимо сравнить значения весовых коэффициентов ω_{jiz} и δ_{jiz} . Для этого запишем соотношения для них, выраженные через значения оснований ТПЧ и ТДПЧ:

$$\omega_{jiz} = \prod_{\gamma=z+1}^{n_c} \Psi_{ji\gamma} \prod_{k=i+1}^{n_{стр}} \prod_{\gamma=1}^{n_c} \Psi_{jk\gamma} \prod_{\eta=j+1}^{n_{стб}} \prod_{k=1}^{n_{стр}} \prod_{\gamma=1}^{n_c} \Psi_{\eta k\gamma}; \quad (23)$$

$$\delta_{jiz} = \prod_{\gamma=z+1}^{n_c} (\Psi_{ji\gamma} - \mu_{ji\gamma}) \prod_{k=i+1}^{n_{стр}} \prod_{\gamma=1}^{n_c} (\Psi_{jk\gamma} - \mu_{jk\gamma}) \prod_{\eta=j+1}^{n_{стб}} \prod_{k=1}^{n_{стр}} \prod_{\gamma=1}^{n_c} (\Psi_{\eta k\gamma} - \mu_{\eta k\gamma}). \quad (24)$$

Сравнение формул (23) и (24) показывает, что выполняется неравенство $\delta_{jiz} < \omega_{jiz}$. Отсюда следует выполнение неравенства:

$$\sum_{j=1}^{n_{стб}} \sum_{i=1}^{n_{стр}} \sum_{z=1}^{n_c} (s_{jiz} - 1) \delta_{jiz} \leq \sum_{j=1}^{n_{стб}} \sum_{i=1}^{n_{стр}} \sum_{z=1}^{n_c} (s_{jiz} - 1) \omega_{jiz},$$

а следовательно, выполняется неравенство (18). При этом равенство между левой и правой частями (18) достигается только тогда, когда все $\mu_{jiz} = 0$ (для всех jiz выполняется

равенство $\delta_{jiz} = \omega_{jiz}$): $N_{\max,v} - N_{\min,v} = \prod_{j=1}^{n_{стб}} \prod_{i=1}^{n_{стр}} \prod_{z=1}^{n_c} s_{jiz} - 1$. Кроме того, поскольку в об-

щем случае $\Delta a_{jiz}^{(\max)} \neq \Delta a_{jiz}^{(\min)}$ (это объясняется различным положением кода обрабатываемого ТДПЧ относительно его максимальной и минимальной границы), то $R_{\min,v} \neq R_{\max,v}$.

Тогда, выбирая в качестве R_v минимум из двух значений $R_{\min,v}$, $R_{\max,v}$:

$$R_v = \min(R_{\min,v}, R_{\max,v}),$$

получим неравенство

$$R_v \leq \frac{R(\max)}{2} = \frac{\prod_{j=1}^{n_{стб}} \prod_{i=1}^{n_{стр}} \prod_{z=1}^{n_c} s_{jiz} - 1}{2}. \quad (25)$$

Обобщая неравенства (13), (18) и (25), получаем соотношение

$$\frac{\Delta V_1 - 1}{2} \geq R_v \leq R_{\min,v}, R_{\max,v} \leq \Delta V_1 - 1 \leq (N_{\max,v} - N_{\min,v}) \leq V - 1. \quad (28)$$

Проведем анализ соотношения (26):

– поскольку величина V равна $V = N_{\max,v} - 1$, то в случае $N_{\min,v} > 0$ будет выполняться неравенство $N_{\max,v} - N_{\min,v} \leq V - 1$. Значит, выполнение этого неравенства объясняется

отбрасыванием тех трехмерных чисел, которые имеют номера меньше, чем $N_{\min,v}$. В этом случае сокращается комбинаторная избыточность, обусловленная наличием хотя бы одного ненулевого минимального значения μ_{jiz} . Со структурного подхода такая избыточность будет больше 0, если не все элементы фрагмента изображения имеют черный цвет;

– выполнение неравенства между $\Delta V_1 - 1$ и $(N_{\max,v} - N_{\min,v})$ доказано выше. Его выполнение обусловлено тем, что пространство ТДПЧ получается из подпространства ТПЧ, ограниченного величинами $N_{\max,v}$ и $N_{\min,v}$ путем дополнительного его прореживания, т.е.

не все ТПЧ, номера которых находятся в промежутке между $N_{\max,v}$ и $N_{\min,v}$, будут принадлежать пространству ТДПЧ. В этом случае дополнительно исключается комбина-

торная избыточность, вызванная неравенством нулю хотя бы одного минимума μ_{jiz} , а также ограниченной величиной разности между значениями разрядов ТПЧ, имеющих максимальный и минимальный номер;

– выполнение неравенства между величинами $R_{\min,v}$, $R_{\max,v}$ и $\Delta V_1 - 1$ обосновывается тем, что эти номера получены для трехмерных структур данных, принадлежащих пространству ТДПЧ. В данном случае дополнительное снижение комбинаторной избыточности вызвано тем, что разряды конкретного ТДПЧ имеют меньшие значения, чем разряды того порогового (минимального или максимального) ТПЧ, относительно которого вычисляется код ($R_{\min,v}$ или $R_{\max,v}$);

– неравенство между величиной R_v и номерами $R_{\min,v}$, $R_{\max,v}$ выполняется на основе выражения (14), а неравенство между R_v и $\frac{\Delta V_1 - 1}{2}$ объясняется тем, что максимальное

значение минимума между $R_{\min,v}$, $R_{\max,v}$ равно $\frac{\Delta V_1 - 1}{2}$. Поэтому $R_v = \frac{\Delta V_1 - 1}{2}$, когда

$R_{\min,v} = R_{\max,v}$, т.е. $\Delta a_{jiz}^{(\max)} = \Delta a_{jiz}^{(\min)}$ для всех jiz . Выполнение последнего неравенства свидетельствует о том, что в результате выбора минимума из $R_{\min,v}$, $R_{\max,v}$ дополнительно сокращается комбинаторная избыточность, обусловленная ограниченным расстоянием конкретного ТДПЧ относительно минимального, максимального или центрального уровней ТПЧ в пространстве ТДПЧ.

Отсюда вытекает, что:

1. В результате формирования кода трехмерному дифференциальному числу устраняются следующие виды избыточности:

– комбинаторная избыточность, определяемая отбрасыванием перестановок с повторениями, чьи номера не принадлежат интервалу $[N_{\min,v}; N_{\max,v}]$. С точки зрения комбинаторики такая избыточность вызвана неравенством нулю номера $N_{\min,v}$. С точки зрения структурных свойств изображений такая избыточность вызвана тем, что в фрагменте не все элементы имеют черный цвет. Значит количество отбрасываемых комбинаций (количество данного вида комбинаторной избыточности) будет тем больше, чем ярче (светлее) обрабатываемые фрагменты изображения;

– комбинаторная избыточность, определяемая отбрасыванием перестановок с повторениями трехмерных чисел, чьи номера хотя и принадлежат интервалу $[N_{\min,v}; N_{\max,v}]$, но разряды не удовлетворяют неравенству (9). С точки зрения комбинаторики такая избыточность обусловлена переходом от абсолютного трехмерного пространства к дифференциальному. В этом случае количество отбрасываемых перестановок с повторениями будет тем больше, чем меньше значения оснований (разности между отсчетами максимального и минимального ТПЧ) ТДПЧ. С точки зрения изображений снижается структурная избыточность, обусловленная ограниченным перепадом яркости как внутри фрагмента, так и между отдельными фрагментами изображения. Поэтому количество устраняемой структурной избыточности будет тем больше, чем меньше яркостный (цветовой) перепад внутри или между фрагментами. С точки зрения статистического подхода такая избыточность обусловлена коррелированностью элементов изображения внутри и между фрагментами;

– комбинаторная избыточность, определяемая неравномерным положением обрабатываемого ТДПЧ относительно минимального и максимального уровней. В этом случае дополнительно уменьшается количество перестановок с повторениями, что вызвано выбором наименьшего расстояния от максимального и минимального уровней. В данном случае

количество устраняемой избыточности будет расти по мере приближения позиции ТДПЧ к его минимальному и максимальному уровню.

2. Величины $R_{\min, v}$, $R_{\max, v}$ можно интерпретировать как расстояния по натуральной шкале, заданной в трехмерном дифференциальном пространстве, от обрабатываемого параллелепипеда до ТДПЧ соответственно с минимальным и максимальным кодом-номером в системе оснований S (формула (9)).

3. Значение номера R_v трехмерного дифференциального числа не зависит от позиции трехмерной структуры данных в абсолютном пространстве; не зависит от абсолютных значений номеров $N_{\max, v}$ и $N_{\min, v}$, а также от величины разности между ними. Величина R_v зависит от разности между разрядами ТДПЧ и отсчетами максимального или минимального уровня. Поэтому значение R_v является минимальным расстоянием от позиции обрабатываемого ТДПЧ до его максимального или минимального уровня.

4. Выводы

1. Сформулированы и доказаны теоремы о нумерации межпараллелепипедных трехмерных дифференциальных чисел. На основе доказанных теорем организуется вычисление кода трехмерным структурам данных.

2. Разработан метод компактного представления трехмерных структур данных на основе трехмерного дифференциального кодирования, включающий в себя: организацию фрагментов изображений в виде трехмерной структуры, которая в свою очередь представляется как ТДПЧ; выбор направления кодирования по строкам, по столбцам и по сечениям; выбор правила отбора разрядов ТДПЧ для формирования кода; систему правил для кодирования межпараллелепипедных ТДПЧ.

3. Сжатие данных разработанным методом достигается путем устранения: комбинаторной избыточности, определяемой отбрасыванием перестановок с повторениями, чьи номера не принадлежат интервалу $[N_{\min, v}; N_{\max, v}]$; комбинаторной избыточности, определяемой отбрасыванием перестановок с повторениями трехмерных чисел, чьи номера хотя и принадлежат интервалу $[N_{\min, v}; N_{\max, v}]$, но разряды не удовлетворяют неравенству (9); комбинаторной избыточности, определяемой неравномерным положением обрабатываемого ТДПЧ относительно минимального и максимального уровней. В этом случае дополнительно уменьшается количество перестановок с повторениями, что вызвано выбором наименьшего расстояния от максимального и минимального уровней.

Список литературы: 1. Горбулін В.П. Актуальні проблеми системного забезпечення інформаційної безпеки України / В.П. Горбулін, М.М. Биченок, П.М. Копка // Матер. міжнар. наук.-практ. конф. "Форми та методи забезпечення інформаційної безпеки держави". К.: Національна академія СБ України, 2008. С. 79 – 85. 2. Бурячок В.Л. Основи формування державної системи кібернетичної безпеки: Монографія. К.: НАУ, 2013. 432 с. 3. Льяшов О.А. До питання захисту інформаційно-телекомунікаційної сфери від стороннього кібернетичного впливу / О.А. Льяшов, В.Л. Бурячок // Наука и оборона. 2010. №4. С.35 – 41. 4. Богущ В.М. Інформаційна безпека держави / В.М. Богущ, О.К. Юдин. К.: МК-Прес, 2005. 432 с. 5. Гонсалес Р.С., Вудс Р.Э. Цифровая обработка изображений / Р.С. Гонсалес, Р.Э. Вудс. М.: Техносфера, 2006. 1072 с. 6. Баранник В.В. Метод компрессии видеопотока на основе полиадического кодирования предсказываемых кадров / В.В. Баранник, Ю.Н. Рябуха, Н.А. Харченко // Радиоэлектроника и информатика. 2013. № 2. С. 23 - 28. 7. Рябуха Ю.Н. Метод кодирования трехмерных структур данных по вертикально-горизонтальной архитектуре // Сучасна спеціальна техніка. К.: ДНД МВС України. 2014. № 1. С. 12 - 21.

Поступила в редколлегию 19.11.2014

Рябуха Юрий Николаевич, канд. техн. наук, соискатель кафедры «Боевого применения и эксплуатации АСУ» Харьковского университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба. Научные интересы: методы и технологии обработки и обеспечения безопасности информации. Адрес. Украина, 61000, Харьков, ул. Сумская, 77/79.

СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ БИТОВОЙ СКОРОСТЬЮ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРЕДСКАЗЫВАЕМЫХ КАДРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТУПНОСТИ И ЦЕЛОСТНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ

Разрабатывается стратегия управления битовой скоростью при обработке Р-кадра видеопоследовательности. В рамках предложенной стратегии управления в процессе работы алгоритма компрессии могут быть выбраны варианты обработки блоков Р-кадра для каждой составляющей цветовой модели Y_C, C_b . При реализации алгоритма компрессии предлагается изменять следующие параметры: формат цветовой субдискретизации, пороговое значение для выбора типа обработки блока данных, фактор качества. Ввиду того, что яркостная составляющая несет полезную нагрузку, в кадре предлагается также применять разные значения для порогов и факторов качества при их применении к составляющим Y_C, C_b . Комбинация выбранных параметров позволяет гибко адаптироваться к требуемой пропускной способности канала связи и выбирать необходимое качество передаваемого изображения в реальном масштабе времени.

1. Введение

Системы передачи видеоинформации по проводным и беспроводным каналам связи широко применяются во многих сферах жизнедеятельности. При этом подобные системы требуют высоких затрат как памяти, так и вычислительных ресурсов. Также при обработке видеопотока количество кодовых бит для каждого кадра на выходе кодера будет меняться в зависимости от его содержания, что приводит к варьированию битовой скорости выходного потока. Такие скачки битовой скорости могут породить большие проблемы для многих протоколов транспортировки и хранения данных. Так, сети на основе коммутации пакетов могут поддерживать переменную скорость передачи, но средняя пропускная способность в любой момент времени ограничена определенными факторами, зависящими от скорости передачи и перегруженности канала [1].

Поэтому совершенствование технологий и методов обработки видеоданных в целях снижения битовой скорости кодера для ее соответствия скоростям транспортировки в сети передачи данных является актуальной научно-прикладной задачей.

Для организации своевременной доставки потока видеоданных широко применяются методы компрессии, базирующиеся на дискретно-косинусных преобразованиях (JPEG, MPEG2 и H.264), а также алгоритмы, базирующиеся на дискретном вейвлетом преобразовании (JPEG2000). Рекомендация MPEG не специфицирует и не предлагает алгоритма контроля скорости, поэтому решение этого вопроса зависит от самих разработчиков. Стандарт JPEG2000 является более адаптированным решением для задачи компрессии видеопотока, так как обеспечивает управление битовой скоростью с достаточно высокой степенью точности (в отличие от алгоритмов, основанных на дискретном косинусном преобразовании). Кроме того, при реализации JPEG2000 возникают следующие сложности. Стандарт JPEG2000 обеспечивает примерно одинаковые битовые затраты на каждый сегмент. Но, так как статистические свойства сегментов могут существенно отличаться, возможен вариант, когда некоторые сегменты сжимаются с высоким визуальным качеством, а некоторые сжимается с плохим качеством, что в итоге приведет к снижению общего визуального качества видеоизображения.

Отсюда цель исследований заключается в разработке такой стратегии управления параметрами компрессии видеопотока, которая будет обеспечивать максимально возможное качество изображения для заданной пропускной способности канала.

2. Синтез общей стратегии управления битовой скоростью при обработке Р-кадров

Разрабатываемая стратегия управления битовой скоростью в MPEG-поток при обработке блоков текущего Р-кадра будет формироваться на основе предложенного метода компрессии Р-кадров в работах [2,4].

На первом этапе управления производится выбор формата цветовой субдискретизации блоков яркостной и цветоразностных составляющих Р-кадра. Эта технология представляет собой кодирование изображений со снижением цветового разрешения, при которой частота выборки цветоразностных сигналов может быть меньше частоты выборки яркостного сигнала. Она основана на особенности человеческого зрения, выраженной большей чувствительностью к перепадам яркости, чем цвета.

Применяют три основных формата цветовой субдискретизации видеокadra в зависимости от его назначения: 4:4:4, 4:2:2 и 4:1:1 (обозначают также как 4:2:0).

Таким образом, объем цифрового описания $d(t)_{стр}^{(\xi,\gamma)}$ для структурной единицы $S(t)_{стр}^{(\xi,\gamma)}$ кадра зависит от объемов входящих в нее макроблоков и соответственно объемов цифрового описания входящих в структурную единицу блоков (рис. 1). Здесь (ξ, γ) – координаты макроблока в кадре.

Для формата представления цветовой субдискретизации 4:4:4 количество элементов яркостной и цветоразностных составляющих кадра видеопотока сохранены в полном составе (рис. 1,а), поэтому при $m_c = 2$, $n_c = 2$ объем цифрового описания будет определяться выражением:

$$d(t)_{стр}^{(\xi,\gamma)} = \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \left(d(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(t, C_r)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(t, C_b)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} \right), \quad (1)$$

где $d(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$, $d(t, C_r)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$ и $d(t, C_b)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$ – соответственно объемы в битах для блоков $V(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$, $V(t, C_r)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$ и $V(t, C_b)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$ для (ξ, γ) -х макроблоков яркостной и цветоразностных составляющих Р-кадра; (ξ, γ) – координаты макроблока в кадре, $\xi = \overline{1, m_{mc}}$; $\gamma = \overline{1, n_{mc}}$, здесь m_{mc} и n_{mc} - количество макроблоков в кадре по горизонтали и вертикали; t – номер текущего обрабатываемого кадра; (k, l) – координаты блока в макроблоке; m_c – количество блоков в макроблоке по горизонтали; n_c – количество блоков в макроблоке по вертикали.

Общий объем $D(t)$ потока видеоданных в расчете на один кадр соответствует выражению:

$$D(t) = \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} \left(\sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \left(d(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(t, C_r)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(t, C_b)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} \right) \right). \quad (2)$$

Для формата представления цветовой субдискретизации 4:2:2 (рис. 1,б), горизонтальная выборка цветоразностных составляющих изображения уменьшится в два раза по сравнению с яркостной составляющей. В этом случае объем цифрового описания структурной единицы определяется как:

$$d(t)_{стр}^{(\xi,\gamma)} = d(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + \sum_{l=1}^2 \left(d(t, C_r)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(t, C_b)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} \right). \quad (3)$$

С учетом особенностей формата представления цветового пространства 4:2:2, когда из макроблоков обеих цветовых составляющих исключается вторая строка, т.е. $m_c = 1$, $n_c = 2$, выражение для объема $D(t)$ потока в расчете на кадр примет вид:

$$D(t) = \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} \left(\sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \left(d(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + d(t, C_r)_{1,l}^{(\xi,\gamma)} + d(t, C_b)_{1,l}^{(\xi,\gamma)} \right) \right). \quad (4)$$

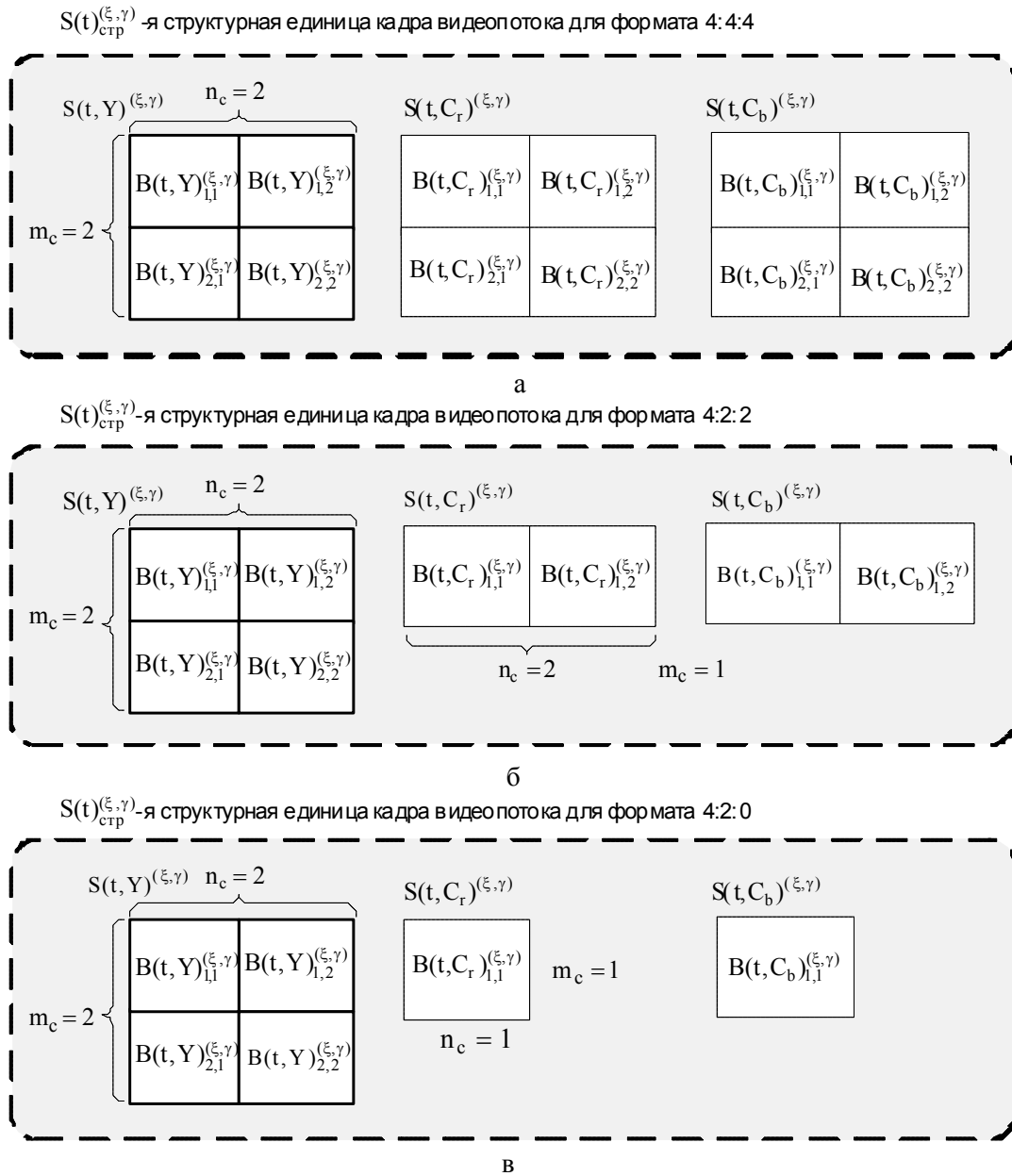


Рис. 1. Формирование структурной единицы кадра видеопотока с учетом форматов субдискретизации: а – представление структурной единицы в формате 4:4:4; б – представление структурной единицы в формате 4:2:2; в – представление структурной единицы в формате 4:1:1

При использовании формата цветовой субдискретизации 4:2:0 цветоразностные составляющие C_r и C_b представлены одним блоком первой четверти, в макроблоке отбрасывается вторая строка и второй столбец, т.е. $m_c = n_c = 1$ (рис. 1,в). Для данного формата объем цифрового описания структурной единицы определится следующей формулой:

$$d(t)_{\text{стр}}^{(\xi, \gamma)} = d(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} + d(t, C_r)_{1,1}^{(\xi, \gamma)} + d(t, C_b)_{1,1}^{(\xi, \gamma)}. \quad (5)$$

Выражение $D(t)$ для формата представления цветного пространства 4:2:0 примет вид

$$D(t) = \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} \left(\sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 d(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)} + d(t, C_r)_{1,1}^{(\xi, \gamma)} + d(t, C_b)_{1,1}^{(\xi, \gamma)} \right). \quad (6)$$

Таким образом, выбор формата цветовой субдискретизации видеоданных позволяет сократить не только общий объем передаваемых данных на один кадр, но и влияние в процентном соотношении цветоразностных составляющих относительно яркостной (таблица).

В случае с P-кадрами было принято решение использовать цветовую субдискретизацию формата 4:2:2. Далее необходимо выбрать исходные параметры кодирования для алгоритма компрессии.

Влияние в процентном соотношении составляющих $Y C_r C_b$ по заполнению макроблоками

Формат цветовой субдискретизации	Y составляющая, %	C_r составляющая, %	C_b составляющая, %
4:4:4	100%	100%	100%
4:2:2	100%	50%	50%
4:1:1	100%	25%	25%

Вторым этапом управления является выбор порогового значения ΔD для блоков текущего кадра.

Для MPEG-технологии кадры видеопоследовательности делятся на несколько типов. Наиболее существенный вклад в суммарную интенсивность видеопотока оказывают P-кадры, которые формируются путем адаптивного кодирования с предсказанием (ДИКМ). Общая схема ДИКМ показана на рис. 2, где $b(t, w)$ и $b(t-1, w)$ – значения пикселей блока текущего t и предыдущего $t-1$ кадров; $e(t, w)$ – кодированное значение пикселя блока текущего t кадра; $e'(t, w)$ – принятое кодированное значение пикселя блока текущего t кадра; $b'(t, w)$ и $b'(t-1, w)$ – принятые декодированные значения пикселей текущего и предыдущего кадров; w – компонент, представляющий одну из плоскостей цветовой модели изображения $Y C_r C_b$.

После процедуры адаптивного кодирования с предсказанием, показанной на рис. 2 [3], формируются двумерные массивы $E(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$, $E(t, C_r)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$, $E(t, C_b)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$. Элементами данных массивов являются $e(t, Y)_{i,j}$, $e(t, C_r)_{i,j}$, $e(t, C_b)_{i,j}$, которые определяются по формулам:

$$e(t, Y)_{i,j} = b(t, Y)_{i,j} - b(t-1, Y)_{i,j}; \quad e(t, C_r)_{i,j} = b(t, C_r)_{i,j} - b(t-1, C_r)_{i,j}; \quad (7)$$

$$e(t, C_b)_{i,j} = b(t, C_b)_{i,j} - b(t-1, C_b)_{i,j},$$

где $b(t, Y)_{i,j}$, $b(t, C_r)_{i,j}$, $b(t, C_b)_{i,j}$ - (i, j) -е компоненты блоков яркостной и цветоразностных составляющих изображения текущего t -го P-кадра; $b(t-1, Y)_{i,j}$, $b(t-1, C_r)_{i,j}$, $b(t-1, C_b)_{i,j}$ - (i, j) -е компоненты блоков яркостной и цветоразностных составляющих изображения предыдущего $(t-1)$ -го кадра.

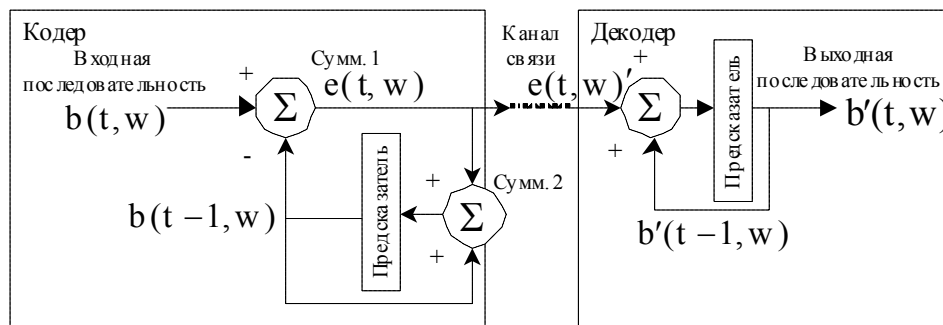


Рис. 2. Структурно-функциональная схема адаптивного кодирования с предсказанием

Возможны варианты, когда между кадрами будет резкий динамический переход. В этом случае эффективность обработки Р-кадра будет снижаться. Для выхода из этой ситуации предлагается такие блоки обрабатывать как I-кадры. Поэтому для выбора варианта дальнейшей обработки предлагается механизм адаптации [5]. Ключевой составляющей данного механизма является классификация блока Р-кадра на тип дальнейшей его обработки. Для выбора типа предлагается оценивать информативность $f(E(t, w)_{k,l}^{(\xi, \gamma)})$ каждого блока по соответствующему порогу $\Delta D(w)$. Информативность блоков $E(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$, $E(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$, $E(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ будем определять с помощью функционалов $f(E(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)})$, $f(E(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)})$, $f(E(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)})$, значения которых сравнивают с соответствующими значениями порогов $\Delta D(Y)$, $\Delta D(C_r) = \Delta D(C_b) = \Delta D(C_a)$, где C_a - представляет компоненты одной из цветоразностных плоскостей: $C_a = C_r$ или $C_a = C_b$. Так как яркостная составляющая при восстановлении изображения несет большую информационную нагрузку, чем цветоразностные составляющие C_r , C_b , то значение порога при обработке блоков яркостной составляющей будем выбирать меньшим, чем при обработке цветоразностных составляющих.

Значение порогов $\Delta D(Y)$ и $\Delta D(C_a)$ предлагается определять как

$$\Delta D(Y) = \frac{\sum_{j=1}^n \log_2 \prod_{i=1}^m \lambda(t, Y)_i}{n_{\max}} \cdot 100\% \leq 30\%; \quad \Delta D(C_a) = \frac{\sum_{j=1}^n \log_2 \prod_{i=1}^m \lambda(t, C_a)_i}{n_{\max}} \cdot 100\% \leq 50\%, \quad (8)$$

где $\lambda(t, Y)_i$, $\lambda(t, C_a)_i$ – основания i -й строки блоков $V(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$, $V(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$, $V(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ текущего Р-кадра; m – количество строк в блоке ($m = 8$); n – количество столбцов в блоке ($n = 8$); n_{\max} – максимальная длина машинного слова (максимальное число разрядов, которое отводится для хранения одномерного блочного кода для одной строки из 8-ми элементов).

3. Разработка механизма адаптации параметров компрессии предсказываемых кадров к характеристикам телекоммуникационной среды передачи

Рассмотрим детально работу предложенного механизма адаптации (рис. 3).

Если условие выполняется и значения функционалов $f(E(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)})$, $f(E(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)})$, $f(E(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)})$ не превышают заданный порог:

$$f(E(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}) \leq \Delta D(Y); \quad f(E(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}) \leq \Delta D(C_a); \quad f(E(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}) \leq \Delta D(C_a), \quad (9)$$

то далее блокам присваивается тип дальнейшей обработки Р.

В этом случае разностные массивы $E(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$, $E(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$, $E(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ поступают на кодер, где для блоков Р-типа проводится формирование одномерных блочных кодов $N(P, Y)_{t,j}^{(\xi, \gamma)}$, $N(P, C_r)_{t,j}^{(\xi, \gamma)}$, $N(P, C_b)_{t,j}^{(\xi, \gamma)}$ для j -го столбца блоков $V(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$, $V(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$, $V(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}$ соответственно.

Если условие не выполняется, что значит в блоке появился динамический объект и значение функционалов $f(E(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)})$, $f(E(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)})$, $f(E(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)})$ превышает порог:

$$f(E(t, Y)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}) > \Delta D(Y); \quad f(E(t, C_r)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}) > \Delta D(C_a); \quad f(E(t, C_b)_{k,l}^{(\xi, \gamma)}) > \Delta D(C_a), \quad (10)$$

то такому блоку присваивается тип обработки I и он будет обрабатываться по алгоритмам, используемым для кодирования I-кадров.

В этом случае разностные массивы $E(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$, $E(t, C_r)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$, $E(t, C_b)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$ проходят этап трансформирования, с помощью дискретного косинусного преобразования (ДКП). Проводится процедура квантования, после чего полученная матрица преобразуется зигзаг-сканированием и также кодируется одномерным блочным кодом.

Третьим этапом стратегии управления является определение значения фактора качества, который используется при формировании матрицы квантования.

Расчет матрицы квантования состоит в следующем: задается одно значение фактора качества (Quality Factor - QF) обычно в диапазоне от 1 до 25 и производится расчет значений матрицы по формуле:

$$q(t, Y)_{i,j} = 1 + (1 + i + j) \cdot QF(Y); \quad q(t, C_r)_{i,j} = 1 + (1 + i + j) \cdot QF(C_a); \quad (11)$$

$$q(t, C_b)_{i,j} = 1 + (1 + i + j) \cdot QF(C_a).$$

При этом, так же как и в случае со значениями порогов, факторы качества для яркостной и цветоразностных составляющих будут выбираться с разными величинами.

На следующем этапе стратегии управления проводится оценка итоговой битовой скорости $D(t)$ и среднеквадратической ошибки $\sigma(t)$ видеопотока обрабатываемого кадра при исходных параметрах обработки блоков: порогов $\Delta D(Y)_{in}$, $\Delta D(C_a)_{in}$ и факторов качества $QF(Y)_{in}$, $QF(C_a)_{in}$.

Исходные параметры выбираются из соображений достижения наилучшего качества изображения, однако они задаются в пределах:

$$\Delta D_{min} \leq \Delta D(Y)_{in}, \Delta D(C_a)_{in} \leq \Delta D_{max}; \quad QF_{min} \leq QF(Y)_{in}, QF(C_a)_{in} \leq QF_{max}.$$

Проверка видеоданных на качество изображения проводится путем определения среднеквадратической ошибки выражением:

$$\sigma(t) = \sum_{\xi=1}^{m_{mc}} \sum_{\gamma=1}^{n_{mc}} \left(\sum_{k=1}^{m_c} \sum_{l=1}^{n_c} \sigma(t, Y)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + \sigma(t, C_r)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} + \sigma(t, C_b)_{k,l}^{(\xi,\gamma)} \right), \quad (12)$$

где $\sigma(t, w)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$ – среднеквадратическая ошибка блока $B(t, w)_{k,l}^{(\xi,\gamma)}$; $b'_{i,j}{}^{(\xi,\gamma)}$ – восстановленный элемент блока изображения; $b_{i,j}{}^{(\xi,\gamma)}$ – исходный элемент блока изображения; m – количество элементов в блоке по горизонтали; n – количество элементов в блоке по вертикали.

В случае, если среднеквадратическая ошибка $\sigma(t)$ будет превышать требуемое значение $\sigma(t) \geq \sigma_{req}$, т.е. качество восстановленного изображения меньше заданного или итоговая битовая скорость $D(t)$ превышает требуемую: $D(t) \geq d_{req}$, в соответствии со стратегией управления проводится изменение параметров значений факторов качества и порога ΔD для всех составляющих цветовой модели [6]. В случае, если перебор возможных вариантов параметров сжатия не позволил достичь требуемых параметров скорости и качества, принимается решение об изменении формата цифровой субдискретизации.

Оценка итоговой битовой скорости $D(t)$ и среднеквадратической ошибки $\sigma(t)$ проводится после изменения каждого параметра. Если после всех изменений не удалось достичь заданной скорости в течение времени обработки, которое было отведено на сжатие одного кадра, может быть принято решение о пропуске текущего Р-кадра.

4. Выводы

Разработана стратегия управления итоговой битовой скоростью видеопотока при обработке Р-кадров, позволяющая реализовать возможность контроля среднеквадратической ошибки при интенсивности видеопотока, не превышающей требуемой пропускной способности канала связи. Разработанная стратегия включает в себя следующие этапы:

1. Выбор формата цветовой субдискретизации к предсказываемому кадру. Это позволит сократить не только общий объем передаваемых данных на один кадр, но и влияние в процентном соотношении цветоразностных составляющих относительно яркостной.

2. Применение дифференциальной обработки блока в зависимости от порога, в соответствии с которым определяется уровень информативности каждого блока. Это позволит в Р-блоках с незначительными изменениями производить меньшее количество математических операций, что значительно снизит время их обработки. В то же время, при обработке I-блока с большими дифференцированными значениями, соответствующими динамическому изменению объекта в обрабатываемой области, будут выбраны такие параметры компрессии, которые обеспечат наилучшее качество. Такой метод обработки позволяет без изменения качества изображения уменьшать количество вычислительных операций и соответственно уменьшать время обработки, что особенно актуально для мультимедийного трафика реального масштаба времени.

3. Использование адаптивного механизма изменения следующих параметров компрессии блока: цветовой субдискретизации, порогового значения, а также фактора качества. Их комбинирование позволяет быстро адаптироваться к пропускной способности канала связи и выбирать необходимое качество передаваемого изображения.

Параметры компрессии для разных цветовых составляющих кадра будут выбираться отдельно для каждой составляющей. Значения порога и фактора качества выбираются таким образом, чтобы яркостная составляющая, несущая наибольшую информативность, обрабатывалась с лучшим качеством, чем цветоразностные составляющие.

Список литературы: 1. *Ричардсон Ян*. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 - стандарты нового поколения / Ян Ричардсон. М.: Техносфера, 2005. 368 с. 2. *Баранник В.В.* Метод компрессии видеопотока на основе полиадического кодирования предсказываемых кадров / В.В. Баранник, Н.А. Харченко, В.Н. Кривонос // АСУ и приборы автоматики. 2013. Вып. 163. С. 47 – 52. 3. *Ватолин Д.* Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М.Смирнов, В. Юкин М.: Диалог-Мифи, 2003. 381с. 4. *Баранник В.В.* Методологическая база управления битовой скоростью при формировании предсказанных кадров / В.В. Баранник, Н.А. Харченко, А.Э. Бекиров // Радиоэлектроника и информатика. 2013. №1. С. 25-30. 5. *Баранник В.В.* Метод оценки битовой скорости в процессе кодирования макроблока для видеоинформационного потока в телекоммуникационной сети / В.В. Баранник, Н.А. Харченко, К.Н. Юрченко, В.В. Твердохлеб // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 2014. №4. С.52-59. 6. *Баранник В.В.* Метод контроля битовой скорости при компрессии предсказанных кадров в видеопоследовательности / В.В. Баранник, Д.Э. Двухглавов, Н.А. Харченко // СОИ. 2014. №5. С. 40-45.

Поступила в редколлегию 18.12.2014

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, начальник кафедры боевого применения и эксплуатации АСУ Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: обработка и передача информации. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79, Barannik_V_V@mail.ru.

Харченко Наталия Андреевна, ст. преподаватель ХНУРЭ. Научные интересы: обработка и сжатие видеоданных. Адрес: Украина, Харьков, ул. Слинко, 20а, кв. 60, тел. 066-135-03-68.

Стасев Сергей Юрьевич, аспирант ХНУРЭ. Научные интересы: технологии кодирования и обеспечения информационной безопасности государства. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79.

СИНТЕЗ КОМБИНИРОВАННЫХ КРИПТОКОМПРЕССИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В ИНФОКОММУНИКАЦИЯХ

Разрабатывается комбинированный метод формирования стойких к дешифрированию преобразований изображений, базирующийся на скрытии их смысловой информации, описываемой в пространственно-временной области на основе яркостных и структурных характеристик. Изменение стандартного процесса сжатия, позволяющего создать возможность для скрытия смыслового содержания изображения, достигается на основе совместного использования в одном процессе обработки изображения следующих подходов: сжатие по ключевой информации, в качестве которой применяются служебные данные; сжатие с последствием, базирующееся на криптографическом преобразовании вектора служебных данных. **Ключевые слова:** стойкие к несанкционированному дешифрированию, комбинированные криптокомпрессионные системы.

Введение

Важным подходом к дополнительной обработке, направленной на изменение стандартного процесса сжатия и создание стойких к несанкционированному дешифрированию (СНД) систем с ключом, является интегрирование криптографического преобразования (шифрования) [1-4].

Для такого подхода можно использовать следующие варианты [1-4]:

1) ключ в процессе сжатия, т.е. сжатие с ключом. Криптографические преобразования осуществляются в процессе формирования сжатого представления изображения;

2) ключ после сжатия информации, т.е. сжатие с последствием. Вначале применяется процесс сжатия и формируются информационная и служебная составляющие компактного представления. После этого используются специальные механизмы криптографического трансформирования. Например, криптографическая шифровка служебных данных и/или информационной части кодовой конструкции;

3) комбинированный подход, когда оба варианта используются в одном процессе обработки изображения.

Первые два варианта имеют ряд недостатков. Так, недостаток сжатия по ключу заключается в том, что для известных алгоритмов сжатия и разжатия ключевая последовательность не может передаваться открытым каналом, т.е. она должна либо передаваться закрытым каналом, либо быть заранее известной авторизированному получателю на приемной стороне.

Если ключ по сжатию определяется на основе характеристик фрагмента изображения, и является количественной составляющей тех закономерностей, которые используются для сокращения избыточности, то возникает вопрос: как на приемной стороне сделать его известным для авторизованного пользователя и неизвестным для злоумышленника. Кроме того, для такого подхода проявляется уязвимость, а именно тогда, когда фрагменты изображения являются однородными. В этом случае количественные характеристики для фрагментов могут быть одинаковыми. Это служит причиной появления идентичных ключей сжатия.

Для устранения недостатков СНД систем с ключом сжатия и организации закрытого канала предлагается создавать системы, стойкие к дешифрированию на основе ключа последствия.

Реализация данного варианта скрытия видеoinформации возможна по трем следующим направлениям в зависимости от шифрования структурных частей кодограмм сжатого представления, а именно [1-4]:

- криптографическое шифрование служебной части;
- криптографическое шифрование информационной части;

– криптографическое шифрование сразу обеих частей.

Третий вариант представляет собой не что иное, как последовательную схему обработки изображений, включающую сжатие и шифрование. Такое направление отличается наибольшими временными затратами на обработку, т.е. на шифрование информационной и служебной составляющих.

Наоборот, наименьшее время достигается для первого варианта, когда на криптографическое шифрование подается только служебная составляющая. Главное достоинство выбранного направления заключается в сокращении времени на обработку. В свою очередь, недостаток такого подхода заключается в том, что информационная составляющая кодограммы сжатого представления изображения передается в открытом виде. Отсюда возникает возможность осуществления несанкционированного доступа.

Для выхода из такой ситуации предлагается строить функцию компрессии с учетом требований относительно криптокомпрессионных систем на основе сжатия с ключом, т.е. использовать комбинированные криптокомпрессионные системы с ключом.

Основная часть

Данный подход базируется на совмещении систем с СНД на основе сжатия с ключом и систем с СНД на основе криптографического шифрования служебных данных.

Система с СНД на основе компрессии с ключом позволяет учесть особенности процессов сокращения избыточности на уровне кодирования источников видеоинформации для скрытия информационной части в зависимости от ключа сжатия, в то время как система с СНД на основе ключа последействия обеспечивает передачу ключа сжатия закрытым каналом и позволяет сократить количество операций на обработку за счет шифрования только служебных данных. Структурная схема комбинированной системы с СНД с дополнительным шифрованием только служебных данных представлена на рис. 1.

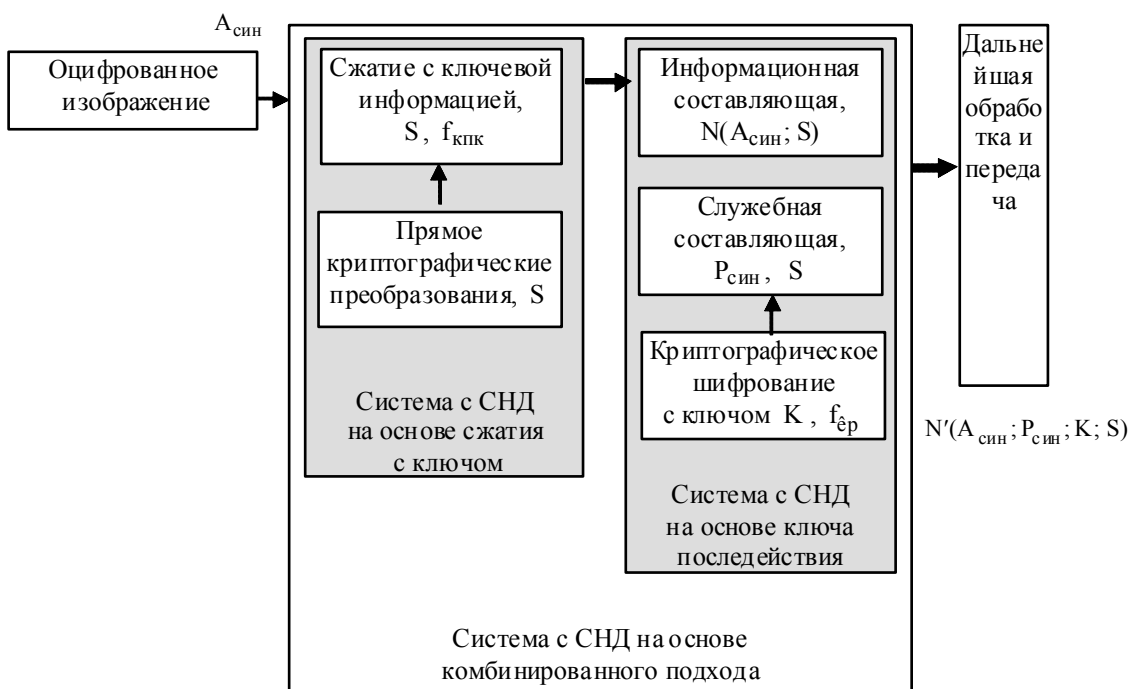


Рис. 1. Структурная схема формирования криптокомпрессионной системы на основе комбинированного подхода

Для комбинированных криптокомпрессионных систем, т.е. стойкого к несанкционированному дешифрированию представления открытого фрагмента изображения на основе комбинирования ключей, обеспечивается:

1) скрытие фрагмента $A_{\text{син}}$ изображения (семантического содержания $A_{\text{сем}}$) с использованием функции компрессии $f_{\text{кпк}}$ с ключом сжатия S :

$$N(A_{\text{син}}; S) = f_{\text{кпк}}(A_{\text{син}}; P_{\text{син}}; S), \quad (1)$$

2) защита ключа сжатия S на основе криптографического преобразования $f_{\text{кр}}$ по ключу K :

$$N'(A_{\text{син}}; P_{\text{син}}; K; S) = N(A_{\text{син}}; S) + f_{\text{кр}}(S; K), \quad (2)$$

где $N'(A_{\text{син}}; P_{\text{син}}; K; S)$ – скрытое представление фрагмента изображения на основе комбинированной криптокомпрессионной системы; $f_{\text{кр}}(S; K)$ – функция криптографического преобразования ключа S сжатия с использованием ключа последействия K (допускается шифрование служебных данных $P_{\text{син}}$).

Обобщенно выражения (1) и (2) для комбинированной криптокомпрессионной системы можно представить так:

$$N'(A_{\text{син}}; P_{\text{син}}; K; S) = f_{\text{кдп}}(A_{\text{син}}; P_{\text{син}}; f_{\text{кр}}(S; K)) = f_{\text{кпк}}(A_{\text{син}}; P_{\text{син}}; S) + f_{\text{кр}}(S; K), \quad (3)$$

здесь $f_{\text{кдп}}(A_{\text{син}}; P_{\text{син}}; f_{\text{кр}}(S; K))$ – обобщенный функционал комбинированной криптокомпрессионной системы.

Для комбинированной системы с СНД существует возможность использовать при построении ключа сжатия вектор $P_{\text{син}}$ служебных данных. В случае, если ключевая информация по сжатию формируется на основе вектора параметров $P_{\text{син}}$, то соотношение (3) с учетом того, что $P_{\text{син}} = \{S; \Delta P_{\text{син}}\}$, примет вид

$$N'(A_{\text{син}}; P_{\text{син}}; K) = f_{\text{кпк}}(A_{\text{син}}; \Delta P_{\text{син}}; S) + f_{\text{кр}}(S; K). \quad (4)$$

Данный подход относительно построения систем с СНД позволяет передавать информационную часть $N(A_{\text{син}}; S)$ скрытого представления фрагмента изображения открытым каналом. Закрытым каналом осуществляется передача ключевой информации по сжатию.

Суммарный объем $W_{\text{кдшп}}$ на описание скрытого $N'(A_{\text{син}}; P_{\text{син}}; K; S)$ формата компактно представленного фрагмента изображения с использованием комбинированной системы с СНД определяется по формуле

$$W_{\text{кдшп}} = V(N(A_{\text{син}}; S)) + V(P_{\text{син}}) + V(S), \quad (5)$$

где $V(S)$ – количество двоичных разрядов на представление шифрограммы ключа сжатия S .

В результате комбинированного преобразования стойкого к несанкционированному дешифрированию по ключу формируются: скрытое представление $N'(A_{\text{син}}; P_{\text{син}}; K; S)$, шифрограмма $f_{\text{кр}}(S; K)$ ключа S сжатия.

Определение. Комбинированной криптокомпрессионной системой с ключом называется система, задаваемая следующим вектором (см.рис. 1):

$$\{N'(A_{\text{син}}; P_{\text{син}}; K; S); f_{\text{кпк}}(A_{\text{син}}; P_{\text{син}}; S); f_{\text{кр}}(S; K)\}.$$

Структурная схема системы защиты видеoinформации на основе комбинированной криптокомпрессии с ключом приведена на рис. 2.

Процесс защиты видеoinформации включает в себя этап ее скрытия на основе системы с СНД по ключу сжатия S с последующим его шифрованием на базе симметричных криптографических преобразований. Ключ сжатия S формируется с использованием количественных характеристик $P_{\text{син}}$, отображающих закономерности обрабатываемых фрагментов $A_{\text{син}}$. Информационная составляющая, представляющая собой скрытое представление $N(A_{\text{син}}; S)$ исходного фрагмента, и зашифрованный ключ сжатия S передаются открытым каналом. Ключ последействия K формируется специальным генератором ключей и передается закрытым каналом.

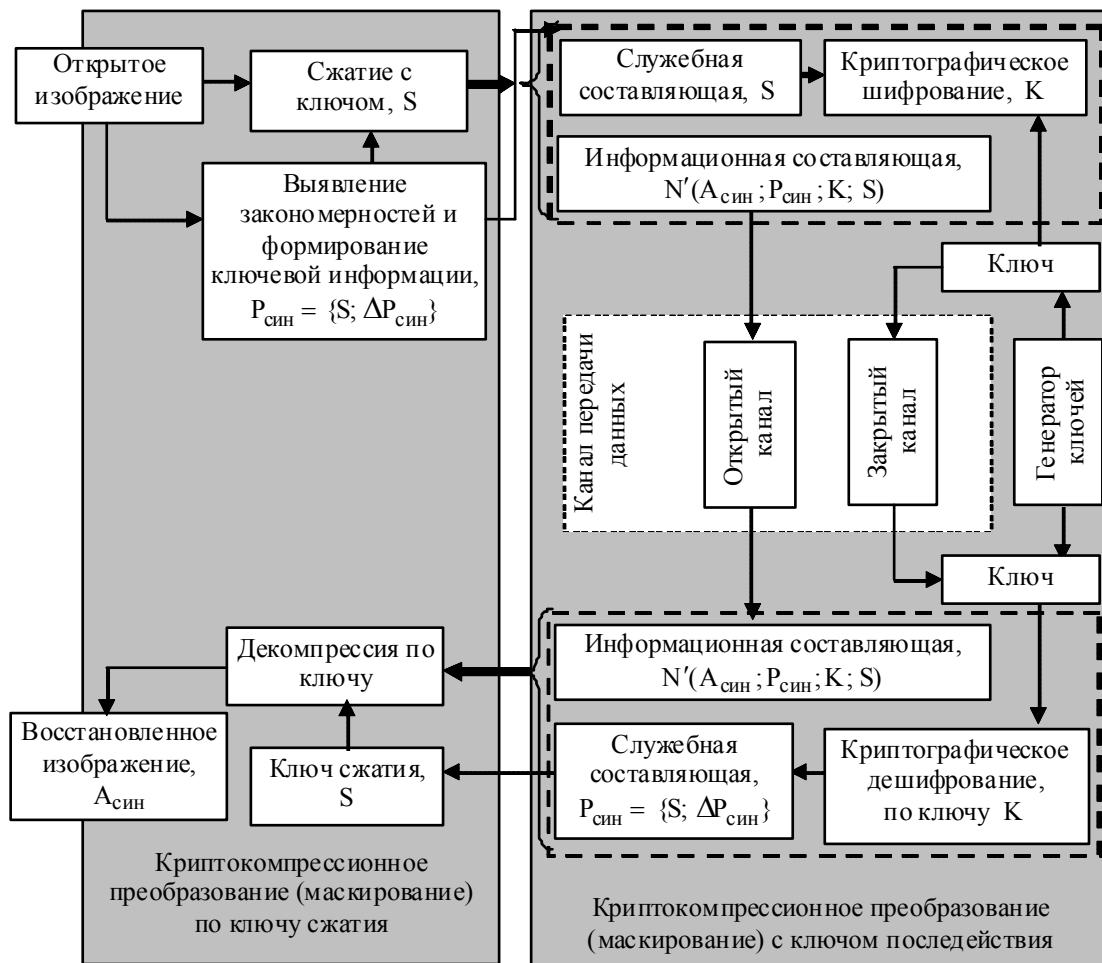


Рис. 2. Структурная схема системы защиты видеoinформации на основе комбинированных СНД-преобразований с ключом

На приемной стороне осуществляется раскрытие ключа сжатия с использованием обратного криптографического преобразования симметричного шифра с применением ключа последствия K . После этого расшифрованный ключ сжатия S применяется для декомпрессии кодовых конструкций информационной части $N(A_{\text{син}}; S)$. В результате этого происходит восстановление исходных изображений $A_{\text{син}}$ (см. рис. 2).

Для комбинированной системы СДШП существует возможность использовать для построения ключа сжатия вектор $P_{\text{син}}$ служебных данных. В случае, если ключевая информация по сжатию формируется на основе вектора параметров $P_{\text{син}}$, то соотношение (3) с учетом того, что $P_{\text{син}} = \{S; \Delta P_{\text{син}}\}$, примет вид

$$N'(A_{\text{син}}; P_{\text{син}}; K) = f_{\text{кпк}}(A_{\text{син}}; \Delta P_{\text{син}}; S) + f_{\text{кр}}(S; K).$$

Данный подход относительно построения систем с СНД позволяет передавать:

- информационную часть $N(A_{\text{син}}; S)$ скрытого представления фрагмента изображения открытым каналом с помощью ключа сжатия;
- служебную часть (ключ сжатия S) открытым каналом с использованием ключа последствия;

Закрытым каналом осуществляется передача ключа последствия K , который используется для шифрования ключа сжатия.

На основе особенностей построения комбинированных криптокомпрессионных систем можно сформулировать следующие требования к их функциональным составляющим.

1. Относительно функции компрессии $f_{\text{кпк}}$ с ключом сжатия S требуется обеспечить:

- 1) возможность сокращения избыточности и уменьшения объема цифрового описания;
- 2) обработку (сжатие и восстановление) без потерь, т.е. взаимнообратимость прямого и обратного преобразований;
- 3) приемлемую сложность процессов реализации.

С учетом того, что информационная составляющая передается открытым каналом, то на процесс ее формирования (на процесс компрессии $f_{\text{кпк}}$) и на формирование ключа сжатия S накладываются дополнительные ограничения, которые состоят в том, что необходимо обеспечить стойкость скрытого представления информационной части относительно скрытия семантического содержания фрагмента изображения. Здесь требуется, чтобы:

– информационная часть зависела от ключа сжатия, т.е. расшифровка (декомпрессия) скрытой части осуществлялась только при знании ключа сжатия;

– отсутствовала возможность определения ключа сжатия и открытого фрагмента изображения на основе знания алгоритмов преобразования и скрытого представления фрагмента. Определить открытую часть и ключ можно только полным перебором ключей;

– информационная часть не предоставляла визуальных предпосылок для вскрытия семантического содержания исходного фрагмента;

– существовала возможность отделить семантически важную информацию от второстепенной, т.е. возможность выделения из исходного фрагмента наиболее семантически важной информации. Например, выделение объектов на основном фоне;

– степень изменения (скрытия) семантической структуры фрагмента изображения в процессе сжатия не зависела от корреляции, насыщенности мелкими объектами, характеристиками областей когерентности, областей, окрашенных одним цветом, и наличия интегрированных вставок искусственных объектов.

2. Относительно выбора ключа сжатия важно обеспечить следующее:

1) ключевая информация не должна определяться по информационной части кодограммы;

2) ключевая информация должна формироваться адаптивно для каждого фрагмента и учитывать их закономерности в количественном виде;

3) ключевая информация (служебные данные) должна участвовать и иметь значительное влияние на формирование содержания кодограммы сжатого (скрытого) представления. Если ключ по сжатию формируется на основе служебных данных, то точное декодирование некоторой части служебных данных не приводило бы к однозначному безошибочному восстановлению соответствующих элементов изображения. Ошибочное декодирование даже одной составляющей служебных данных оказывало бы влияние и создавало возможность для ошибочного декодирования тех элементов изображения, служебные данные которых декодированы достоверно.

3. Относительно криптографического преобразования ключа сжатия S с помощью функции $f_{\text{кр}}$ на основе ключа последствия K . Здесь выдвигаются следующие требования, а именно:

1) обеспечить возможность управления длиной ключа и количеством раундов шифрования (сложностью процесса обработки), поскольку сокращается количество шифруемых данных и снижается их избыточность;

2) обеспечить гарантируемую стойкость, поскольку шифруется ключевая информация, раскрытие которой позволяет создать условия для взлома кодограммы (несанкционированной декомпрессии).

Комбинированную криптокомпрессионную систему можно классифицировать с позиции:

- 1) криптографии - как создание симметричных криптографических систем;
- 2) компрессии изображений - как разработка апостериорных систем сжатия со значимым влиянием служебных данных на результат компактного представления и качество восприятия изображения зрительной системой.

Выводы

Данный подход относительно построения систем с СНД позволяет передавать:

- информационную часть $N(A_{\text{син}}; S)$ скрытого представления фрагмента изображения открытым каналом с помощью ключа сжатия;
- служебную часть (ключ сжатия S) открытым каналом с использованием ключа последействия.

Закрытым каналом осуществляется передача ключа последействия Q , который применяется для шифрования ключа сжатия.

Список литературы: 1. *Баранник В.В.* Методология создания криптографических преобразований на базе методов, исключающих избыточность / В.В. Баранник, С.А. Сидченко, В.В. Ларин // Сучасна спеціальна техніка. 2009. №4 (9). С. 5 – 12. 2. *Баранник В.В.* Метод криптосемантического представления изображений на основе комбинированного подхода / В.В. Баранник, С.А. Сидченко, В.В. Ларин // Сучасна спеціальна техніка. 2010. №3 (22). С. 33 – 38. 3. *Королева Н.А.* Обоснование комбинированной системы сжатия и шифрования видеоданных в инфокоммуникационных системах / Н.А. Королева, С.А. Сидченко, В.В. Ларин // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. Харків: УкрДАЗТ, 2010. Вип. 116. С. 61-65. 4. *Barannik V.V.* The Model of Avalanche – relating effect in the process of images reconstruction in the combined cryptosemantic systems on the base of Polyadic presentation / Barannik V.V., Sidchenko S.A., Larin V.V. // Наукоємні технології. 2010. №1 (5). С. 68-70.

Поступила в редколлегию 12.12.2014

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры боевого применения и эксплуатации АСУ Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: обработка и передача информации. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79.

Сидченко Сергей Александрович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела научного центра Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: обработка и передача информации. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79.

Тупица Иван Михайлович, соискатель Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: обработка и передача информации. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЯ

Исследуются методы многокритериальной оценки, которые позволяют оптимизировать деятельность предприятия по нескольким критериям, где каждый из них является составляющей технологического процесса.

1. Введение

Актуальность работы. В настоящее время наблюдается широкий спрос на технологии, которые позволяют решить проблему принятия решений, их интенсивное использование во всех сферах как метод автоматизации интеллектуальной деятельности человека. Результаты исследования задач планирования и управления показывают, что в реальной постановке эти задачи являются многокритериальными. Так, часто встречающееся выражение «достичь максимального эффекта при наименьших затратах» уже означает принятие решений при двух критериях. Оценка деятельности предприятий и планирования как системы принятия решений производится на основе более десятка критериев: выполнение плана производства по объему, по номенклатуре, плана реализации, прибыли по показателям рентабельности, производительности труда.

Это предоставило дополнительный импульс изучению и формализации процессов принятия решений и широкого круга задач оптимизации.

2. Задачи и цель исследования

Задачи проектирования сложных систем актуальны в самых различных областях науки. Системное представление объектов и процессов используется в экономике, физике, но наиболее часто такой подход встречается в механике. При проектировании производственных процессов применяется их модель, представленная в виде системы уравнений, описывающих рабочие характеристики.

Математическая модель может корректироваться в процессе разработки, и для этого проектировщику необходимо производить большое количество сложных расчетов для проверки результатов изменений. Несмотря на глобальную компьютеризацию и высокий уровень информационных технологий, на данный момент большинство расчетов инженеры производят практически вручную. Компьютерные же технологии применяются только для создания чертежей уже спроектированной системы. Поэтому создание программного комплекса, позволяющего упростить расчеты на этапе проектирования системы и оптимизировать параметры уже готовой системы, является актуальным. Возникающие при этом научные и практические задачи требуют широкого применения методов теории оптимизации, ориентированных на определение и идентификацию наилучших вариантов решения, не прибегая к проверке всех возможных решений путем реализации их на практике.

Состояние проблемы. Среди многочисленных проблем, возникновение которых обусловлено бурно развивающимся научно-техническим прогрессом, пожалуй, наиболее важной является проблема совершенствования управления во всех звеньях народного хозяйства. Современные промышленные предприятия и научно-производственные комплексы, научно-исследовательские и опытно-конструкторские центры, комбинаты бытового обслуживания, т. е. самые разнообразные по характеру своей деятельности организации, представляют собой сложные системы: «человек – машина», эффективность функционирования которых зависит от качества организационного управления этими системами. При формировании как стратегических, так и многих тактических решений руководителю далеко не всегда бывает достаточно личного опыта, интуиции и организаторских способностей в их традиционном понимании. В этих случаях на помощь приходит теория оптимизации, а именно многокритериальные задачи, ведь руководитель вынужден учитывать многочисленные, нередко взаимно противоречивые соображения и опираться на сложные критерии эффективности путей достижения целей.

Целью работы является оптимизация функционирования предприятия путем создания подсистемы поддержки принятия решений с использованием информационных технологий, ЭВМ, системного программного обеспечения и математических моделей. Создать систему, которая поможет определить наилучший (оптимальный) вариант действий при наличии ограничений технико-экономического характера. При условиях неполноты нужного количества ресурсов необходимо их распределить таким образом, чтобы наилучше удовлетворить всех потребителей и при этом получить максимальный эффект (максимальная прибыль или минимальный убыток).

В данной работе проведена оценка классических и современных методологий решения многокритериальных задач, выявление их достоинств и недостатков, разработка и исследование математической модели, разработка методов и алгоритмов, позволяющих найти решение указанной выше математической модели, создание программного продукта, спроектированного как полноценная система, способная решать любые оптимизационные задачи с помощью разработанных методов и алгоритмов.

Задачей исследования является нахождение оптимального плана действий того или иного технологического процесса предприятия, который оценивается по нескольким критериям: максимизация прибыли и качества выпускаемой продукции, минимизация загрязнения окружающей среды.

3. Анализ методов исследования

Проведем анализ предметной области, представление ее с помощью методов теории принятия решений, методов математического программирования.

К основным особенностям этого класса задач можно отнести следующее:

Многокритериальность – это главное свойство. Большинство авторов старается свести многокритериальные задачи к однокритериальным. Например, производство – безусловно важный показатель. Но всегда ли нужно требовать его максимального значения? Самое главное, что при однокритериальной постановке задачи без ответа остаются важные вопросы: какой ценой это достигается, в какой мере ухудшаются при этом другие критерии и почему мы отдаем предпочтение этому, а не другому критерию, стараясь свести многокритериальную задачу к другой, которая очень отличается от начальной. Хорошо известен тот факт, что при оптимизации по одному критерию получаем одни результаты, по другому – другие, сразу по двум – третьи.

Построение допустимого множества – основной этап в постановке и решении задачи оптимального производства. Его неформальный анализ является неотъемлемой частью решения задачи.

Обычным есть то, что человек ставит задачу, а ЭВМ использует ее для решения. При этом такая система не работает, так как в очень редких случаях возможно априори, до принятия решения, поставить задачу производства. Постановка и решение – единый процесс. Определить допустимое множество возможно лишь в процессе решения задачи.

В ряде задач заказчик по тем или другим причинам не может формализовать основные критерии производства. Как правило, лишь после построения допустимого (или значительно большего) множества решений и его анализа с учетом критериев, которые нельзя формализовать, он отбирает наиболее оптимальное решение.

Математические модели – это сложные системы: линейные и нелинейные, детерминированные и стохастические, с распределенными и сосредоточенными параметрами. Параметры модели в большинстве случаев непрерывные. Область поиска может быть несвязной, отсутствует информация о гладкости функций цели, последние могут быть недифференцируемыми, хотя по обыкновению они непрерывные, размерность векторов параметров и критериев достигает иногда многих десятков. Основным преимуществом метода является то, что в ходе анализа пространства параметров поступает ценная информация о качестве математической модели. Ее корректируют, а при необходимости строят новую. В этом случае метод выступает в роли индикатора достоверности модели из позиций исследуемых показателей. Этот фактор не менее важный, чем сами результаты оптимизации, так как мы получаем ответы на ключевые вопросы: насколько содержательная модель по тем или другим критериям, какая значимость полученных результатов.

4. Формализация задачи исследования

Главная цель деятельности каждого предприятия в условиях рыночной экономики – максимизация прибыли или минимизация затрат. Эффективность работы предприятия в значительной мере зависит от информации о формировании себестоимости. Затраты на производство продукции являются базой для установления цены. Информация о себестоимости лежит в основе прогнозирования и управления производством.

Большинство задач, решаемых методами оптимизации, может быть сформулировано так: максимизировать или минимизировать $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ при ограничениях

$$\begin{aligned} g_1(x_1, \dots, x_n) &\leq b_1; \\ g_2(x_1, \dots, x_n) &\leq b_2; \\ &\dots \\ g_m(x_1, \dots, x_n) &\leq b_m; \end{aligned}$$

где $F(x_1, \dots, x_n)$ – целевая функция или критерий эффективности (например, прибыль от производства каких-либо видов продукции, стоимость перевозок); $X = (x_1, \dots, x_n)$ – варьируемые параметры; $g_1(x), \dots, g_m(x)$ – функции, которые задают ограничения на имеющиеся ресурсы. Именно при таких условиях и был промоделирован критерий максимизации прибыли для поставленной задачи.

Прибыль предприятия: с формально-математической точки зрения задача линейного программирования может быть описана таким образом: найти неизвестные величины, удовлетворяющие

$$F(x) = \sum_{j=1}^n C_j x_j \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$x_j \in Q = \{1, 2, \dots, n\}, \quad (2)$$

где Q – множество видов продукции, выпускаемых предприятием.

При условиях выполнения неравенств

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2; \\ &\dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m; \\ x &\geq 0; \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение (1) описывает функцию цели: максимизация прибыли при технико-экономических ограничениях неравенства (3)

Качество выпускаемой продукции: модель задачи квадратичного программирования имеет следующую структуру: найти максимальное значение функции (4) показателя качества продукта при линейных ограничениях (5):

$$\begin{aligned} F_2(x) &= C^t + 1/2 X^t D X = \\ &= \sum_{j=1}^n C_j X_j + 1/2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_i x_j; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2; \\ &\dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m; \end{aligned} \quad (5)$$

Уровень загрязнения окружающей среды: в связи с хозяйственной деятельностью объекта любой области в конкретном регионе непременно возникает природно-техническая система, которая включает как влияние на окружающую среду, так и изменение состояния последней. Задача минимизации загрязнения на производстве попадет под задачу минимизации функции (7) $F_3(X)$ при ограничениях.

Параметры $C_j^{(3)}$ этой функции не известны и зависят от характеристик оборудования и материальных ресурсов. Модель объекта представляется в виде

$$AX \leq B, X \geq 0; \quad (6)$$

$$F_3(X) = \sum_{j=1}^n C_j x_j \rightarrow \min, \quad (7)$$

$F_3 = X_3 C^3 + E$, где $F_3^t = \{F_{31}, F_{32}, \dots, F_{3s}\}$ – вектор наблюдений; $C^{(3)} = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ – вектор параметров, подлежащих оцениванию; $X_3 = X_{ij}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$ – матрица экспериментальных значений независимых переменных; $E^t = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n\}$ – вектор ошибок. Ограничение на выпуск продукции различных типов служат продовольственные ресурсы $V = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_m\}$. С учетом норм затрат на единицу каждого вида продукции указанные ограничения можно записать в виде: выражение (6) описывает условия, которые необходимо учесть в годовой производственной программе, строкам матрицы A соответствуют все виды ресурсов, рассматриваемые в задачах. Соответствующие строкам матрицы A компоненты вектора V указывают ограничения видов ресурсов или объектов производства, которые установлены для годовой производственной программы предприятия. Эти неравенства представляют собой обычные условия неотрицательности, вытекающие из физического смысла задач; $A = \{a_{ij}\}$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$ – матрица норм затрат ресурсов на единицу каждого вида продукции.

Общая постановка задачи состоит в следующем: определить вектор $X^{(0)}$, обеспечивающий компромисс между величиной прибыли (1), качеством выпускаемой продукции (4) и уровнем загрязнения окружающей среды (7), а также удовлетворяющий ограничениям (3), (5), (6).

Один из возможных методов решения состоит в том, что вначале находятся три оптимальных вектора производства $X^{(i)}$, $i = \overline{1, 3}$, каждый из которых соответствует одному из локальных критериев. Затем определяется выпуклая линейная комбинация $X^{(0)}$, представляющая собой оптимальную (компромиссную) программу относительно указанных критериев:

$$X^{(0)} = v_1 x^{(1)} + v_2 x^{(2)} + v_3 x^{(3)}, \sum_{i=1}^3 v_i = 1, v_i \geq 0. \quad (8)$$

Для нахождения v_1, v_2, v_3 используется игровая модель, для решения которой был выбран матричный метод

Для программной реализации разработанной модели была написана программа, которая позволяет решать любые уравнения. Данное приложение позволяет выбрать тип поставленной задачи – максимизация или минимизация, задать количество переменных в целевой функции и ввести их коэффициенты. Также приложение позволяет добавлять уравнение в систему ограничений. В основе программы лежит симплекс-метод, он основан на расчете симплекс-таблиц. Его идея заключается в последовательном продвижении по базисам опорных планов вплоть до получения оптимального решения или доказательства неразрешимости задачи. При этом значение целевой функции должно увеличиваться. Система ограничений приводится к каноническому виду. По найденной системе ограничений и целевой функции строится симплекс-таблица. Программа работает с предварительно обработанными данными, т.е. при разработке прикладной программы предполагалось, что данные по каждому из критериев подаются на вход нормализованные и приведенные к каноническому виду. Это объясняется тем, что целью данной работы было экспериментальное моделирование оптимизационной модели, а также тем, что критерии оценки в реальном технологическом процессе можно разложить на сложные математические модели. Поэтому во время исследования и разработки оптимизационной модели этот факт был отброшен, т.е. считается, что данные на входе – это готовые результаты работы каждой такой модели.

Программа загружает данные и пошагово ищет оптимальное решение для заданного критерия.

5. Выводы

При разработке проектов сложных систем, в частности автоматических систем управления АСУ, перед проектировщиком возникает проблема принятия решений при наличии одновременно нескольких показателей качества. Поэтому разработка методов принятия решений при нескольких критериях оптимальности и в условиях неопределенности по-прежнему остается одной из главных задач исследования операций.

В результате данного исследования были построены математические модели производственных процессов с их технико-экономическими ограничениями, выбраны методы решения этих моделей, разработано программное приложение.

Научной новизной результатов исследований, приведенных в работе, является метод решения полученной математической модели, наиболее полностью охватывающий ее на базе теории оптимизации. Также избранный метод легко реализуется на вычислительной машине и при этом позволяет найти оптимальное решение. Под оптимальным решением понимается один из возможных вариантов решения данной проблемы, такой, что будет иметь наивысшую оценку.

Практическим значением является информационная подсистема, позволяющая найти оптимальный план деятельности предприятия, которое оценивается по нескольким критериям.

Список литературы: 1. Уланова Г. М. и др. Методы разработки интегрированных АСУ промышленными предприятиями. М.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с. 2. Гвоздинский А. Н., Губин В. А., Шергин В. Л. Методы оптимизации в организационном управлении. Х.: ХНУРЭ 2014. 395 с. 3. Вагнер Г. Основы исследования операций. М.: Мир, 1972. 329 с. 4. Батыщев Д. И. Методы оптимального проектирования. М.: Радиосвязь, 1984. 246 с. 5. Понов И. Г. Математические методы в проектировании отраслей. М.: 1981. С. 54–83.

Поступила в редколлегию 14.12.2014

Гвоздинский Анатолий Николаевич, канд. техн. наук, профессор кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ, Научные интересы: оптимизация процедур принятия решений в сложных системах управления. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул. Акад. Ляпунова, 7, кв. 9, тел. 32-69-08.

Шиманович Татьяна Игоревна, ст. гр КН-12-6 ХНУРЭ. Научные интересы: методы принятия решений в системах искусственного интеллекта Адрес: Украина, 62304, Харьковская обл., Дергачевский р-н, пгт. Солоницевка, ул. Луговая, д. 17.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МЕТОДА ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА ПРОИЗВОДСТВЕ РЭС

Рассматривается разработка автоматизированного метода теплового неразрушающего контроля качества печатных плат на производстве РЭС, а именно усовершенствование существующих методов для того, чтобы осуществлять одновременный контроль качества 4-х печатных плат. Для усовершенствования были выбраны методы подготовки видимого изображения плат на конвейере. В ходе разработки был написан программный продукт, позволяющий автоматизировать данный контроль.

Введение

В настоящее время существует задача автоматизации определения качества сборки печатных плат (ПП) РЭС на производстве, а именно правильности монтажа отдельных элементов на печатную плату и контроль их рабочих температур.

Существует ряд методов, используемых для контроля качества печатных плат радиоэлектронных средств на этапе изготовления. Но проверить качество ПП как сборочной единицы возможно с помощью теплового неразрушающего контроля. Метод теплового неразрушающего контроля позволяет определить локализацию дефектов исследуемой поверхности. Тепловой метод имеет ряд преимуществ: бесконтактность процесса контроля, широкая область применения, мобильность регистрирующей аппаратуры, малые временные затраты на процесс диагностики и обработки данных, возможность автоматизации процесса контроля [2]. Однако изображение, полученное тепловизором, не всегда позволяет распознать выделенные области и сопоставить их с реальным видимым изображением.

Проведенный анализ тепловизоров показал, что не все существующие модели позволяют сопоставлять видимое и инфракрасное изображение [1]. Как правило, эта функция реализована в преимущественно дорогих аппаратах иностранных производителей, что затрудняет их использование различными потребителями в нашей стране.

На базе кафедры ТАПР ХНУРЭ проводятся исследования в области автоматизации процесса сопоставления видимого изображения и термограммы, полученной в результате использования тепловизора, для проверки правильности монтажа отдельных элементов ПП и контроля их рабочих температур.

Постановка задачи исследования

Целью данного исследования является усовершенствование существующего метода автоматизированного контроля качества, а именно получение возможности одновременного контроля четырех печатных плат радиоэлектронных средств на производстве.

Для этого необходимо решить такие задачи:

- провести анализ существующих методов контроля качества, необходимого для автоматизации производства 4 уровня;
- обосновать выбор метода неразрушающего контроля качества ПП;
- усовершенствовать метод фильтрации изображения плат;
- усовершенствовать метод оконтуривания элементов на ПП;
- создать систему диагностики качества ПП на производстве;
- сравнить полученные результаты контроля качества печатных плат РЭС на производстве.

Данный метод синхронного автоматизированного контроля состоит из двух основных этапов.

Первым этапом является работа с видимым изображением печатных плат.

Данный этап состоит из:

- получения видимого изображения 4-х печатных плат, находящихся на конвейере;

- подготовки видимого изображения;
- анализа и подготовки термограммы, полученной в ходе нагревания элементов платы;
- выделения на термограмме зоны интереса в кадре.

Для выделения на термограмме интересующей нас области, а именно области с превышением граничного значения интервала рабочих температур, производится нормализация видимого изображения с помощью восьми реперных точек, выделенных на термограмме и на видимом изображении.

Использование 8 реперных точек позволяет одновременно работать с четырьмя платами. Нормализация необходима для получения более точного контура интересующей области на термограмме.

После этапа подготовки изображений выделяются реперные точки на видимом изображении внутри контура одного или нескольких интересующих нас элементов. Этот этап производится и на термограмме. После этого происходит перенос контура с видимого изображения на термограмму.

Вторым этапом метода автоматизированного контроля качества является сравнение полученных результатов, а именно температур, с базой данных, в которой хранятся интервалы рабочих температур всех элементов.

В ходе выполнения поставленной цели необходимо решить задачу разработки программного продукта для автоматизации усовершенствованного метода.

Методы решения и полученные результаты

Существуют различные методы фильтрации видимого изображения, такие как: свертка, комбинированная фильтрация с дифференцированным сглаживанием областей с различной информационной ценностью, медианный метод, линейная и нелинейная фильтрация, метод SUSAN[3]. В экспериментальных исследованиях был выделен и усовершенствован метод SUSAN (уменьшение матрицы обрабатываемых пикселей, что позволит более точно обрабатывать наименьшие элементы ПП). Представлен результат обработки элемента ПП на исходном изображении 4-х печатных плат усовершенствованным методом SUSAN (рис.1).

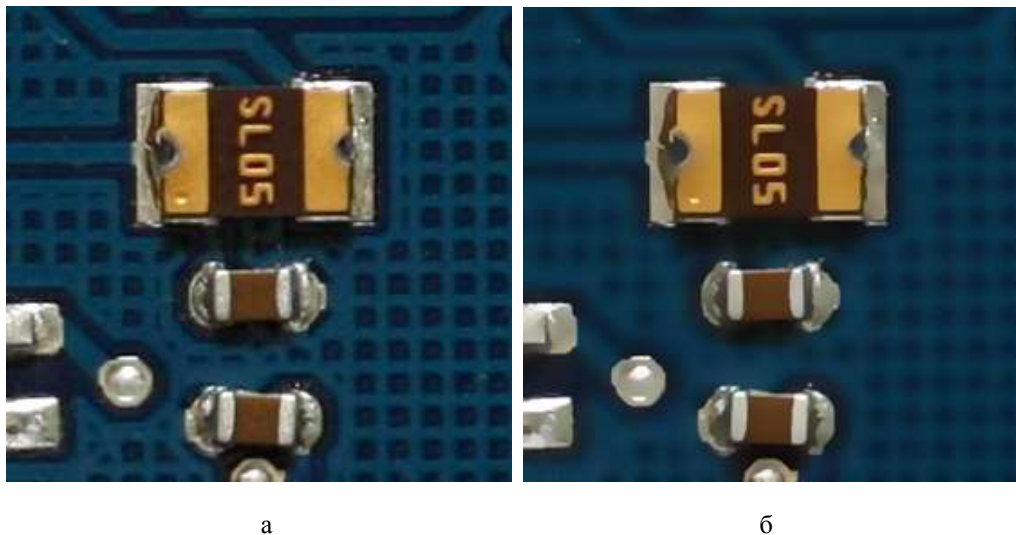


Рис. 1. Результат обработки видимого изображения методом SUSAN:

а – исходное изображение; б – обработанное

Как видно на рис. 1,б, данная фильтрация подавила текстуру поверхности ПП, а именно сгладила дорожки, что позволит упростить последующую обработку.

Следующим шагом при подготовке видимого изображения является выделение контуров. Существует ряд методов, позволяющих выделить контур на видимом изображении: метод активных контуров, оператор Робертса, оператор Лапласа, разностный метод. В разрабатываемом методе автоматизированного контроля качества для усовершенствования был выбран метод Робертса. Для этого матрица преобразований была уменьшена до

размера 3x3 пикселя и в ходе запуска формировалась лишь после предварительной фильтрации изображения печатных плат.

Результат использования стандартного и усовершенствованного оператора Робертса представлены на рис.2.

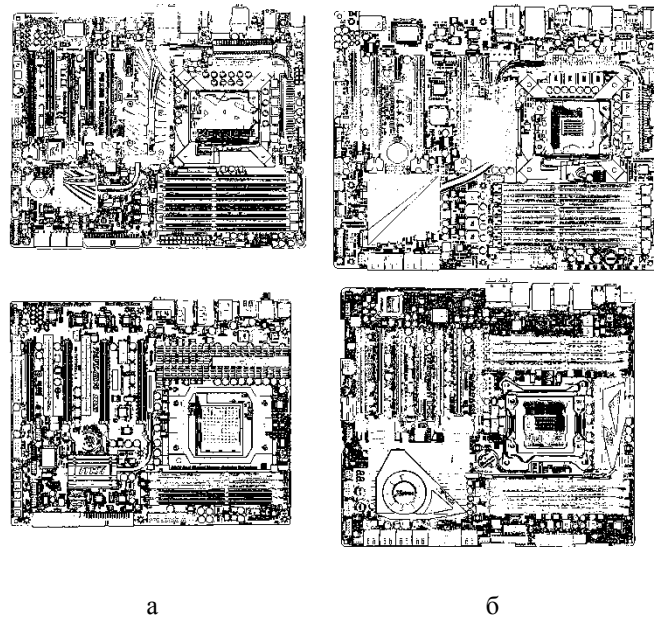


Рис. 2. Результат выделения контуров элементов на ПП с помощью метода Робертса:
а – стандартный метод; б – усовершенствованный метод

Следующим этапом является наложение выделенных контуров элементов ПП на термограмму. На рис. 3 представлен результат наложения полученного контура на термограмму.

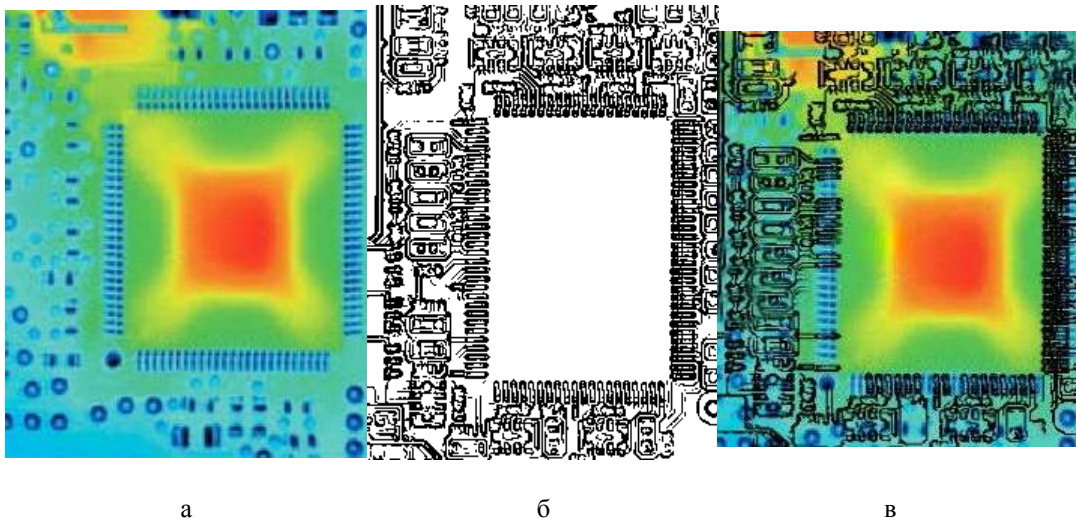


Рис. 3. Результат наложения контура на термограмму: а – часть термограммы; б – часть полученного контура; в – результат наложения полученного контура на термограмму

Данный автоматизированный метод контроля качества также производит сопоставление полученных результатов с базой данных, а именно производит обнаружение пикселей («шумовые пиксели»), которые будут отображать перегрев элементов.

«Шумовые» пиксели автоматически сверяются с ранее разработанной базой данных. Данная БД содержит в себе наименования элементов и интервалы рабочих температур для каждого из элементов. Также эта БД содержит положение каждого из элемента на плате.

Если показание температуры выходит за границы интервала рабочих температур, то разработанная программа выводит сообщение о том, что элемент бракован.

Выводы

В ходе разработки метода автоматизированного контроля качества печатных плат была написана программа, которая позволяет производить предварительную обработку видимого изображения 4-х печатных плат, выделять зоны интереса в кадре, сопоставлять зоны интереса с термограммой для дальнейшего определения рабочих температур всех элементов. В дальнейших исследованиях будет решена задача сопоставления видимого и инфракрасного изображения объекта контроля.

Список литературы: 1. *Гарячевская Д.В., Шевченко М.А.* Современные тепловизоры для теплового контроля качества// Актуальні проблеми фізики та їх інформаційне забезпечення: тези доповідей XI регіон. студ. наук. конфер. / Харків: НТУ «ХПИ», 2011. С.82-83. 2. *Смаиный Д.В., Минаев В.С.* Тепловой неразрушающий контроль и его применение// Актуальні проблеми фізики та їх інформаційне забезпечення: тези доповідей XI регіон. студ. наук. конфер. / Харків: НТУ «ХПИ», 2011. С.98-100. 3. *Поляков А.Ю., Брусенцов В.А.* Методы и алгоритмы компьютерной графики в примерах на Visual C++, 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 560 с.

Поступила в редколлегию 23.10.2014

Гарячевская Дарья Владимировна, студентка факультета автоматизации и компьютеризированных технологий ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел (057) 702-14-86, e-mail: tapr@kture.kharkov.ua.

Гарячевская Ирина Васильевна, канд. техн. наук, доцент кафедры Информационных технологий в энергетических системах Харьковского национального университета им. В.Н.Каразина. Адрес: Украина, 61022, пл. Свободы, 4, тел. (057) 707-50-20, e-mail: fef@univer.kharkov.ua.

Евсеев Владислав Вячеславович, канд. техн. наук доцент кафедры ТАПР ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел (057) 702-14-86, e-mail: tapr@kture.kharkov.ua.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ НА МИНИМАЛЬНО И МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ РАССТОЯНИЯ В ЗАДАЧАХ БАЛАНСНОЙ КОМПОНОВКИ

Строятся классы псевдонормализованных ϕ -функций и псевдонормализованных квази- ϕ -функций для моделирования ограничений на размещение 3D объектов в задачах балансировки с учетом минимально и максимально допустимых расстояний. В качестве размещаемых объектов рассматриваются цилиндры, шары, торы, сфероцилиндры, прямые призмы, а в качестве контейнера – прямой круговой цилиндр, параболоид вращения или усеченный круговой конус. Объекты размещаются на круговых стеллажах контейнера. Строится математическая модель в виде задачи математического программирования. Приводится пример решения тестовой задачи балансировки с использованием построенных ϕ -функций и квази- ϕ -функций.

Введение

Задача балансировки (*Balance Layout Problems, BLP*) принадлежит классу *NP*-сложных комбинаторных задач размещения (*Cutting and Packing Problems, C&P*) [1]. Суть ее состоит в поиске оптимального размещения заданного набора 3D-объектов в некоторой ограниченной области с учетом ограничений поведения (*behavior constraints*) [2], обеспечивающих равновесие и устойчивость рассматриваемой системы.

Особый интерес представляют задачи класса *BLP* в области ракетно-космического машиностроения. Данной тематике посвящен ряд публикаций [2-4], однако объекты и область размещения, как правило, аппроксимируются цилиндрами и параллелепипедами. К тому же для решения задач класса *BLP* чаще всего используются различные эвристические и мета-эвристические алгоритмы, что приводит к потере оптимальных решений.

В данной статье предлагаются средства математического моделирования в виде классов псевдонормализованных ϕ -функций и псевдонормализованных квази- ϕ -функций для аналитического описания основных ограничений в задачах *C&P* – *ограничения размещения* (непересечение объектов, включение объектов в область и их размещение с учетом минимально и максимально допустимых расстояний). Метод ϕ -функций позволяет строить точные математические модели задач *BLP* в виде задач нелинейного программирования и использовать для их решения методы негладкой оптимизации и нелинейного программирования.

В пределах данного исследования строятся псевдонормализованные ϕ -функции и псевдонормализованные квази- ϕ -функции для некоторых видов геометрических форм, являющихся математическими моделями реальных объектов в ракетно-космическом машиностроении. В качестве объектов компоновки (оборудования) рассматриваются цилиндры, шары, торы, сфероцилиндры, прямые призмы, а в качестве контейнера (корпуса космического аппарата) – цилиндр, параболоид вращения, или усеченный конус, разделенный стеллажами (*bearing plates*) на отсеки.

1. Постановка задачи

Имеется контейнер Ω высоты H , описанный следующим образом: $\Omega = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : G(x, y, z) \geq 0\}$. Рассматриваются такие виды контейнеров: 1) $\Omega \equiv C$, C – прямой круговой цилиндр с основаниями радиуса R , $G(x, y, z) = \min\{-x^2 - y^2 + R^2, -z + H, z\}$; 2) $\Omega \equiv \Lambda$, Λ – параболоид вращения с основанием радиуса $R = \sqrt{H}$, $G(x, y, z) = \min\{-z - x^2 - y^2 + H, z\}$; 3) $\Omega \equiv E$, E – прямой круговой усеченный конус с радиусами R_1 и R_2 нижнего и верхнего оснований, соответственно,

$G(x, y, z) = \min\{-z - H(\sqrt{x^2 + y^2} + R_1)/(R_1 - R_2), -z + H, z\}$, $R_1 > R_2$. Контейнер Ω разделен круговыми стеллажами S_k , $k = 1, 2, \dots, m+1$, на подконтейнеры Ω^k , $k = 1, 2, \dots, m$. Пусть t_k – заданное расстояние между стеллажами S_k и S_{k+1} , $Oxyz$ – собственная система координат контейнера Ω , начало O которой находится в центре симметрии нижнего основания S_1 контейнера Ω , Oz – продольная ось симметрии Ω (рис. 1).

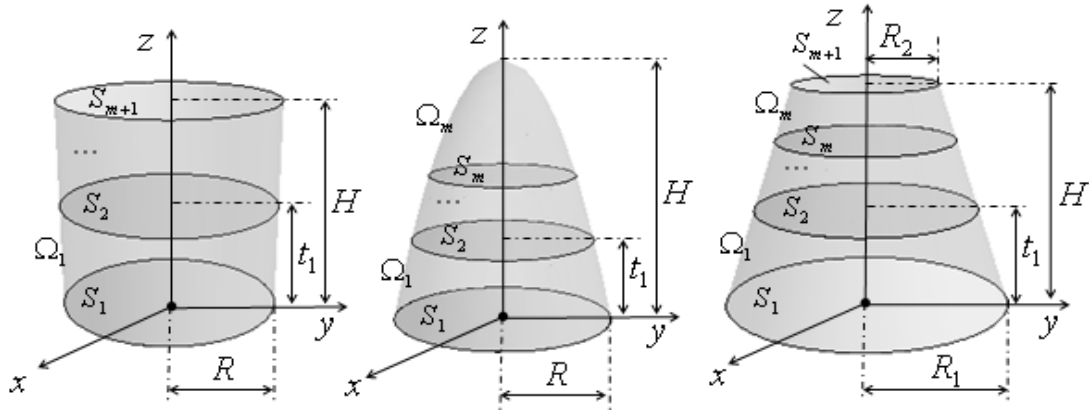


Рис. 1. Виды контейнеров

Множество объектов $A = \{A_i, i \in I_n\}$, $I_n = \{1, 2, \dots, n\}$, включает в себя шары S_i радиуса r_i , $i \in I_1$; прямые круговые цилиндры C_i радиуса r_i и полувысоты h_i , $i \in I_2$; торы T_i с метрическими характеристиками (r_i, h_i) , где r_i – расстояние от центра образующей окружности до оси вращения, h_i – радиус образующей окружности, $i \in I_3$; сфероцилиндры S_{C_i} с метрическими характеристиками (l_i, r_i, h_i) , где l_i – высота шаровых сегментов, r_i – радиус цилиндра, h_i – полувысота цилиндра, $i \in I_4$; прямые выпуклые призмы K_i (параллелепипеды или правильные призмы) с метрическими характеристиками $(h_i, \tilde{v}_{i1}, \dots)$, где h_i – полувысота, $\tilde{v}_{i1} = (\tilde{x}_{i1}, \tilde{y}_{i1})$, $l = 1, \dots, s_i$, – вершины многоугольника K_i , лежащего в основании K_i , s_i – число вершин многоугольника K_i , $i \in I_5$. При этом $I_1 \cup I_2 \cup \dots \cup I_5 = I_n$. Обозначим через $O_i x_i y_i z_i$ – собственную систему координат объекта A_i , начало O_i которой находится в центре симметрии объекта A_i ; $O_i x_i$, $O_i y_i$, $O_i z_i$ – оси симметрии объекта A_i , причем $O_i z_i \parallel Oz$ (рис. 2). Каждый объект A_i представляет собой однородное твердое тело массы m_i .

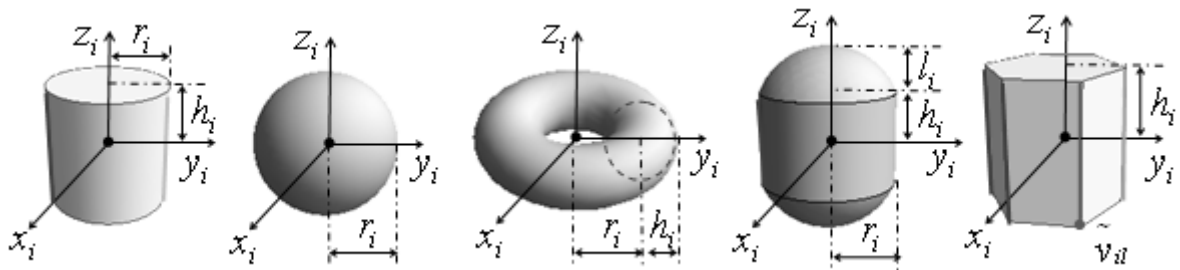


Рис. 2. Виды объектов компоновки

Полагаем, что задано разбиение множества A на подмножества $A^k = \{A_i, i \in I^k\}$, $k = 1, 2, \dots, m$, в соответствии с размещением объектов внутри соответствующих подконтейнеров Ω^k , $k = 1, 2, \dots, m$, $I^1 \cup I^2 \cup \dots \cup I^k \cup \dots \cup I^m = I_n$. Подмножество объектов A^k разбивается на два подмножества $A_+^k = \{A_i, i \in I_+^k\}$ и $A_-^k = \{A_i, i \in I_-^k\}$, где A_+^k – подмножество объектов, которые должны быть расположены *на* стеллаже S_k ; A_-^k – подмножество объектов, которые должны быть расположены *под* стеллажом S_{k+1} внутри подконтейнера Ω^k .

Контейнер Ω с упакованными в нем объектами множества A образует систему Ω_A .

Расположение объектов множества A внутри контейнера Ω определяется в общем виде переменным вектором параметров размещения $u_i = (x_i, y_i, z_i, \theta_i)$ относительно системы координат $Oxuz$, где (x_i, y_i, z_i) – вектор трансляции объекта A_i , а θ_i – угол поворота объекта A_i в плоскости $O_ix_iy_i$. Тогда вектор переменных $u = (u_1, u_2, \dots, u_n) \in \mathbb{R}^\xi$, $\xi \leq 4n$, определяет размещение объектов множества A внутри контейнера Ω .

Пусть заданы минимально и максимально допустимые расстояния ρ_{ij}^- и ρ_{ij}^+ между боковыми поверхностями каждой пары объектов $A_i, A_j \in A^k$, $i > j \in I^k$, а также минимально допустимое расстояние ρ_i^- между боковой поверхностью объекта $A_i \in A^k$, $i \in I^k$, и боковой поверхностью подконтейнера Ω^k .

Задача балансной компоновки BLP: разместить объекты множества A на стеллажах S_k , $k = 1, 2, \dots, m$, контейнера Ω так, чтобы заданная функция цели $F(u)$ достигала своего экстремального значения при учете следующих ограничений: *ограничений размещения* (непересечение объектов подмножества A^k и их включение в подконтейнер Ω^k с учетом допустимых расстояний $\rho_{ij}^-, \rho_{ij}^+, \rho_i^-$) и *ограничений поведения* (ограничения равновесия, статической устойчивости и т.п.).

Учитывая особенности задачи *BLP* (размещение объектов на стеллажах контейнера, а также непрерывные вращения объектов относительно плоскости Oxy), для моделирования ограничений размещения используем псевдонормализованные *phi*-функции [6] и псевдонормализованные квази-*phi*-функции [8] для 2D объектов. Тогда в качестве контейнеров C, Λ, E рассмотрим круг C^z радиуса R_i^z , $C^* = \mathbb{R}^2 / \text{int } C^z$, в качестве объектов S_i, C_i, T_i, S_{C_i} – круг C_i радиуса r_i' , в качестве призмы K_i – неориентированный выпуклый многоугольник K_i , заданный вершинами $\tilde{v}_{il} = (\tilde{x}_{il}, \tilde{y}_{il})$, $l = 1, \dots, s_i$. Координаты вершин \tilde{v}_{il} после поворота K_i на угол θ_i и трансляции на вектор (x_i, y_i) преобразуются так:

$\tilde{x}'_{il} = x_i + \tilde{x}_{il} \cos \theta_i + \tilde{y}_{il} \sin \theta_i$, $\tilde{y}'_{il} = y_i - \tilde{x}_{il} \sin \theta_i + \tilde{y}_{il} \cos \theta_i$. При этом координата z_i вектора параметров размещения объекта A_i принимает фиксированные значения

$$z_i = \sum_{l=1}^k t_{l-1} + d_i \text{ для } i \in I_+^k \text{ и } z_i = \sum_{l=1}^k t_l - d_i \text{ для } i \in I_-^k, \text{ где } d_i = h_i \text{ для } C_i, T_i, K_i, d_i = r_i \text{ для } S_i \text{ и } d_i = h_i + l_i \text{ для } S_{C_i}.$$

Тогда $u_i = (x_i, y_i)$ – вектор переменных для круга C_i и $u_i = (x_i, y_i, \theta_i)$ – вектор переменных для многоугольника K_i .

2. Средства математического моделирования

Пусть заданы минимально и максимально допустимые расстояния ρ^- и ρ^+ между объектами $T_1(u_1)$ и $T_2(u_2)$, т.е. $\rho^- \leq \text{dist}(T_1, T_2) \leq \rho^+$, где $\text{dist}(T_1, T_2) = \min_{t_1 \in T_1, t_2 \in T_2} d(t_1, t_2)$, $d(t_1, t_2)$ – евклидово расстояние между точками t_1 и t_2 . Тогда ограничения размещения с учетом допустимых расстояний могут быть описаны с помощью *псевдонормализованной phi-функции* $\widehat{\Phi}(u_1, u_2)$.

Как известно [6], непрерывная всюду определенная функция $\widehat{\Phi}^-(u_1, u_2)$ (или $\widehat{\Phi}^+(u_1, u_2)$) называется *псевдонормализованной phi-функцией* для *phi*-объектов $T_1(u_1)$ и $T_2(u_2)$, если выполняются следующие условия:

$$\widehat{\Phi}^-(u_1, u_2) > 0, \text{ если } \text{dist}(T_1, T_2) > \rho^-,$$

$$\widehat{\Phi}^-(u_1, u_2) = 0, \text{ если } \text{dist}(T_1, T_2) = \rho^-,$$

$$\widehat{\Phi}^-(u_1, u_2) < 0, \text{ если } \text{dist}(T_1, T_2) < \rho^-,$$

$$\widehat{\Phi}^+(u_1, u_2) > 0, \text{ если } \text{dist}(T_1, T_2) < \rho^+,$$

$$\widehat{\Phi}^+(u_1, u_2) = 0, \text{ если } \text{dist}(T_1, T_2) = \rho^+,$$

$$\widehat{\Phi}^+(u_1, u_2) < 0, \text{ если } \text{dist}(T_1, T_2) > \rho^+.$$

С помощью псевдонормализованных *phi*-функций не всегда удается описать размещение объектов с учетом их непрерывных вращений и допустимых расстояний (в частности, ограничения на максимально допустимые расстояния). С этой целью для описания ограничений на минимально и максимально допустимые расстояния используется класс псевдонормализованных *квази-phi*-функций.

По определению [8] функция $\widehat{\Phi}'(u_1, u_2, u')$ называется *псевдонормализованной квази-phi-функцией* для объектов $T_1(u_1)$ и $T_2(u_2)$, если функция $\max_{u' \in \mathbb{R}^d} \widehat{\Phi}'(u_1, u_2, u')$ является псевдонормализованной *phi*-функцией для объектов $T_1(u_1)$ и $T_2(u_2)$. Здесь u' – вектор дополнительных переменных, \mathbb{R}^d – арифметическое евклидово пространство размерности d .

Аналогично понятиям псевдонормализованных *phi*-функций будем различать псевдонормализованные квази-*phi*-функции $\widehat{\Phi}'^-$ для моделирования ограничений $\text{dist}(T_1, T_2) \geq \rho^-$ и псевдонормализованные квази-*phi*-функции $\widehat{\Phi}'^+$ для моделирования ограничений $\text{dist}(T_1, T_2) \leq \rho^+$.

Тогда $\max_{u' \in U} \widehat{\Phi}'^- \geq 0 \Leftrightarrow \text{dist}(T_1, T_2) \geq \rho^-$, $\max_{u' \in U} \widehat{\Phi}'^+ \geq 0 \Leftrightarrow \text{dist}(T_1, T_2) \leq \rho^+$. Используя свойства квази-*phi*-функции [8], имеем $\widehat{\Phi}'^- \geq 0 \Rightarrow \text{dist}(T_1, T_2) \geq \rho^-$, $\widehat{\Phi}'^+ \geq 0 \Rightarrow \text{dist}(T_1, T_2) \leq \rho^+$.

Ограничения размещения для задачи *BLP* можно сформулировать следующим образом. Условие $\text{dist}(A_i, A_j) > \rho_{ij}^-$, $i > j \in I^k$, может быть описано как $\widehat{\Phi}_{ij}^- \geq 0$ ($\widehat{\Phi}'_{ij}^- \geq 0$), где $\widehat{\Phi}_{ij}^-$ – псевдонормализованная *phi*-функция ($\widehat{\Phi}'_{ij}^-$ – псевдонормализованная квази-*phi*-функция) для объектов A_i и A_j . Условие $\text{dist}(A_i, \Omega^{k*}) > \rho_i^-$, $\Omega^{k*} = \mathbb{R}^d \setminus \text{int } \Omega^k$, $d = 2, 3$, формализуется, используя неравенство: $\widehat{\Phi}_i^- \geq 0$, где $\widehat{\Phi}_i^-$ – псевдонормализованная *phi*-функция для объектов A_i и Ω^{k*} . Условие непересечения объектов A_i и A_j , $i > j \in I^k$, с

учетом максимально допустимого расстояния ρ_{ij}^+ , т.е. $\text{dist}(A_i, A_j) \leq \rho_{ij}^+$, определяется как $\widehat{\Phi}_{ij}^+ \geq 0$, где $\widehat{\Phi}_{ij}^+$ – псевдонормализованная квази-*phi*-функция для объектов A_i и A_j .

Таким образом, ограничения непересечения объектов подмножества A^k с учетом минимально и максимально допустимых расстояний ρ_{ij}^- и ρ_{ij}^+ можно описать так:

$$\begin{aligned} \Upsilon_1(u, u') &= \min \{ \Upsilon_{ij}, (i, j) \in \Xi^k, k = 1, 2, \dots, m \} \geq 0, \\ u' &= (u'_{11}, u'_{12}, \dots, u'_{ij}, \dots, u'_{n^k(n^k-1)}) , \Upsilon_{ij} \in \{ \widehat{\Phi}_{ij}, \widehat{\Phi}_{ij}^-, \widehat{\Phi}_{ij}^+ \}, \\ \Xi^k &= \{ (i, j) : |z_i - z_j| < h_i + h_j, i > j \in I^k \} . \end{aligned} \quad (1)$$

Ограничения включения объектов подмножества A^k в подконтейнер Ω^k с учетом минимально допустимых расстояний ρ_i^- в можно представить как

$$\Upsilon_2(u) = \min \{ \widehat{\Phi}_i^-, i \in I^k, k = 1, \dots, m \} \geq 0 . \quad (2)$$

Тогда неравенство

$$\Upsilon(u, u') = \min \{ \Upsilon_1(u, u'), \Upsilon_2(u) \} \geq 0 \quad (3)$$

описывает *ограничения размещения* в задаче *BLP*.

В частности, с помощью неравенств (1) и (2) можно описать отношения непересечения и включения объектов S_i, C_i, T_i, S_{C_i} в подконтейнер Ω^k без учета допустимых расстояний, если положить $\rho_{ij}^- = 0$, $\rho_{ij}^+ = 0$ и $\rho_i^- = 0$.

2.1 Моделирование отношений включения объектов в контейнер для задачи BLP с учетом допустимых расстояний. Условие включения объекта S_i (C_i, T_i , или S_{C_i}) в подконтейнер Ω^k с учетом минимально допустимого расстояния ρ_i^- можно описать с помощью псевдонормализованной *phi*-функции $\widehat{\Phi}_i(u_i) = \Phi_i(u_i) = -x_i^2 - y_i^2 + (R_i^z - r_i')^2$, где $\Phi_i(u_i)$ – *phi*- функция для объектов $C_i \oplus \rho_i^-$ и C^* .

Условие включения объекта P_i (или K_i) в подконтейнер Ω^k с учетом минимально допустимого расстояния ρ_i^- можно описать с помощью псевдонормализованной *phi*-функции $\widehat{\Phi}_i(u_i) = \Phi_i(u_i) = \min \{ -(\tilde{x}'_{i1})^2 - (\tilde{y}'_{i1})^2 + (R_i^z)^2 \}$, где $\Phi_i(u_i)$ – *phi*- функция для объектов K_i и $C^* \oplus \rho_i^-$. Здесь R_i^z и r_i' – радиусы сечений, соответственно, подконтейнера Ω^k и объекта A_i плоскостью Oxy на уровне z в точке их касания.

2.2 Моделирование отношений непересечения объектов задачи BLP с учетом допустимых расстояний. Условие непересечения объектов $A_i \in \{S_i, C_i, T_i, S_{C_i}\}$ и $A_j \in \{S_j, C_j, T_j, S_{C_j}\}$, $i > j \in I^k$, с учетом минимально допустимых расстояний ρ_{ij}^- можно описать с помощью псевдонормализованной *phi*-функции $\widehat{\Phi}_{ij}^-(u_i, u_j) = \Phi_{ij}(u_i, u_j) = (x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 - (r_i' + r_j')^2$, где $\Phi_{ij}(u_i, u_j)$ – *phi*-функция для кругов $C_i \oplus \rho_{ij}^-$ и C_j , где r_i' и r_j' – радиусы сечений, соответственно, объектов $A_i \oplus \rho_{ij}^-$ и A_j плоскостью Oxy на уровне z в точке их касания.

Условия непересечения двух призм K_i и K_j с учетом минимально допустимых расстояний ρ_{ij}^- могут быть описаны – с помощью псевдонормализованных квази-*phi*-функций для пары неориентированных выпуклых многоугольников, которая определяется следующим образом (см. [8]):

$$\widehat{\Phi}_{ij}^{\prime-}(u_i, u_j, u_p) = \min\{\Phi^{K_i P}(u_i, u_p), \Phi^{K_j P^*}(u_j, u_p)\} - 0.5\rho_{ij}^-,$$

где $\Phi^{K_i P}(u_i, u_p) = \min_{1 \leq l \leq s_i} \psi_P(\tilde{v}'_{il})$ – phi-функция для объектов K_i и P ,

$\Phi^{K_j P^*}(u_j, u_p) = \min_{1 \leq l \leq s_j} (-\psi_P(\tilde{v}'_{jl}))$ – phi-функция для объектов K_j и P^* , здесь

$$P(u_p) = \{(x, y) : \psi_P = \alpha \cdot x + \beta \cdot y + \mu_P \geq 0\}, \quad u_p = (\theta_P, \mu_P), \quad \alpha = \cos \theta_P, \quad \beta = \sin \theta_P.$$

Условия непересечения объектов $A_i \in \{S_i, C_i, T_i, S_{C_i}\}$ и призмы K_j с учетом минимально допустимых расстояний ρ_{ij}^- могут быть описаны с помощью псевдонормализованных квази-phi-функций для круга C_i и неориентированного многоугольника K_j вида

$\widehat{\Phi}_{ij}^{\prime-}(u_i, u_j, u_p) = \Phi'_{ij}(u_i, u_j, u_p)$, где $\Phi'_{ij}(u_i, u_j, u_p) = \min\{\Phi^{KP}(u_j, u_p), \Phi^{C_i P^*}(u_i, u_p)\}$ –

квази-phi-функция для объектов $C_i^{\oplus} = C_i \oplus \rho_{ij}^-$ и K_j , $\Phi^{KP}(u_j, u_p) = \min_{1 \leq l \leq s_j} \psi_P(\tilde{v}'_{jl})$ – phi-

функция для объектов K_j и P , $\Phi^{C_i P^*}(u_i, u_p) = -\psi_P(u_i) - r'_i$ – phi-функция для объектов C_i^{\oplus}

и P^* , r'_i – радиус сечения объекта $A_i \oplus \rho_{ij}^-$ и K_j плоскостью Oxy на уровне z в точке их

касания, $P(u_p) = \{(x, y) : \psi_P = \alpha \cdot x + \beta \cdot y + \mu_P \geq 0\}$, $u_p = (\theta_P, \mu_P)$, $\alpha = \cos \theta_P$, $\beta = \sin \theta_P$.

Пусть $f_i(x, y)$ и $f_j(x, y)$ – функции, описывающие границы объектов $A_i^z, A_j^z \subset \mathbb{R}^2$, $i \neq j$, $i, j \in I^k$, соответственно, а $p_i = (x_{p_i}, y_{p_i}) \in \mathbb{R}^2$, $p_j = (x_{p_j}, y_{p_j}) \in \mathbb{R}^2$ – пара произвольных точек, таких что $f_i(p_i) \geq 0$ ($f_j(p_j) \geq 0$), если $p_i \in A_i^z$ ($p_j \in A_j^z$), и $f_i(p_i) < 0$ ($f_j(p_j) < 0$) – в противном случае.

Условие непересечения объектов A_i^z и A_j^z , $i > j \in I^k$, с учетом максимально допустимого расстояния ρ_{ij}^+ можно описать с помощью псевдонормализованной квази-phi-функции

вида $\widehat{\Phi}_{ij}^{\prime+}(u_i, u_j, u' = (p_i, p_j)) = \min\{(\rho_{ij}^+)^2 - \text{dist}^2(p_i, p_j), f_i(p_i), f_j(p_j)\}$, где

$\text{dist}^2(p_i, p_j) = (x_{p_j} - x_{p_i})^2 + (y_{p_j} - y_{p_i})^2$, а функции $f_i(p_i), f_j(p_j)$ определяются следующим образом:

для $A_i^z \equiv C_i, A_j^z \equiv C_j$:

$$f_i(p_i) = -(x_{p_i} - x_i)^2 - (y_{p_i} - y_i)^2 + (r'_i)^2, \quad (4)$$

$$f_j(p_j) = -(x_{p_j} - x_j)^2 - (y_{p_j} - y_j)^2 + (r'_j)^2,$$

где r'_i и r'_j – радиусы сечений, соответственно, объектов A_i и A_j плоскостью Oxy на уровне z их точки касания;

для $A_i^z \equiv K_i, A_j^z \equiv K_j$:

$$f_i(p_i) = \min\{\chi'_{il}(p_i), l=1, \dots, s_i\}, \quad \chi'_{il}(p_i) = A'_{il}(x_{p_i}) - B'_{il}(y_{p_i}) + C'_{il},$$

$$A'_{il} = \tilde{y}'_{i(l+1)} - \tilde{y}'_{il}, \quad B'_{il} = \tilde{x}'_{i(l+1)} - \tilde{x}'_{il}, \quad C'_{il} = \tilde{y}'_{il} \cdot \tilde{x}'_{i(l+1)} - \tilde{y}'_{i(l+1)} \cdot \tilde{x}'_{il},$$

$$f_j(p_j) = \min\{\chi'_{jl}(p_j), l=1, \dots, s_j\}, \quad (5)$$

$$\chi'_{jl}(p_j) = A'_{jl}(x_{p_j}) - B'_{jl}(y_{p_j}) + C'_{jl},$$

$$A'_{jl} = \tilde{y}'_{j(l+1)} - \tilde{y}'_{jl}, B_{jl} = \tilde{x}'_{j(l+1)} - \tilde{x}'_{jl}, C'_{jl} = \tilde{y}'_{jl} \cdot \tilde{x}'_{j(l+1)} - \tilde{y}'_{j(l+1)} \cdot \tilde{x}'_{jl},$$

где $\chi'_{il} = 0$ ($\chi'_{jl} = 0$) – прямые, проходящие через вершины \tilde{v}'_{il} и $\tilde{v}'_{i(l+1)}$ (\tilde{v}'_{jl} и $\tilde{v}'_{j(l+1)}$) многоугольника K_i (K_j), $l=1, 2, \dots, s_i$ ($l=1, 2, \dots, s_j$), $i \neq j \in I_n$;

для $A_i^z \equiv C_i$, $A_j^z \equiv K_j$: функции $f_i(p_i)$ и $f_j(p_j)$ определены в (4) и (5).

3. Математическая модель

Математическую модель задачи балансной компоновки можно представить так:

$$\min_{u \in W} F(u), \quad (6)$$

$$W = \{(u, u') \in \mathbb{R}^\sigma : Y(u, u') \geq 0, \mu(u) \geq 0, \zeta \geq 0\}, \quad (7)$$

где (u, u') – вектор переменных задачи, $Y(u, u') \geq 0$ – ограничения размещения, $\mu(u) \geq 0$ – ограничения поведения системы Ω_A , $\zeta \geq 0$ – система дополнительных ограничений на метрические характеристики и/или параметры размещения контейнера и объектов. Функция размещения $Y(u, u')$ имеет вид (3). Заметим, что наиболее часто встречающиеся в литературе функции цели: размер контейнера Ω ; отклонение центра масс системы Ω_A от заданной точки; моменты инерции системы Ω_A (см., например, [2-5]).

4. Тестовая задача

Рассмотрим задачу балансной компоновки в следующей постановке: разместить набор объектов множества A на стеллаже контейнера $\Omega \equiv E$ так, чтобы отклонение центра масс (x_s, y_s, z_s) системы Ω_A от центра масс (x_0, y_0, z_0) контейнера Ω было минимальным и выполнялись ограничения размещения $Y(u, u') \geq 0$ объектов с учетом минимально и максимально допустимых расстояний ρ_{ij}^- и ρ_{ij}^+ .

Математическая модель задачи имеет вид (6)-(7), где

$$F(u) = (x_s(u) - x_0)^2 + (y_s(u) - y_0)^2 + (z_s - z_0)^2,$$

$$x_s(u) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^n m_i x_i, \quad y_s(u) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^n m_i y_i, \quad z_s = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^n m_i z_i = \text{const}, \quad M = \sum_{i=1}^n m_i.$$

Область допустимых решений вида (7) описывается с помощью псевдонормализованных *phi*-функций и псевдонормализованных квази-*phi*-функций, приведенных в этой статье. Исходные данные для тестовой задачи определены ниже.

Пусть $A = \{S_1, S_2, C_3, C_4, T_5, T_6, S_{C7}, S_{C8}, K_9, K_{10}\}$, $n=10$, $m=2$, $H=0.6$, $R_1=0.5$, $R_3=0.3$, $t_1=0.3$, $A_-^1 = \{S_1, C_3, T_5, S_{C7}, K_9\}$, $A_+^2 = \{S_2, C_4, T_6, S_{C8}, K_{10}\}$, $\rho_{ij}^- = 0.03$, $i < j \in I_n$, $\rho_{39}^+ = 0.1$, $\rho_{26}^+ = 0.08$, $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0.275)$, $\{z_i, i \in I_n\} = \{0.19, 0.4, 0.19, 0.41, 0.24, 0.35, 0.19, 0.39, 0.18, 0.42\}$, $\{m_i, i \in I_n\} = \{27.8764, 20.944, 34.5575, 16.9332, 28.4245, 22.2066, 17.2159, 19.2265, 38.4, 19.9532\}$, $r_1=0.11$, $r_2=0.1$, $r_3=0.1$, $h_3=0.11$, $r_4=0.07$, $h_4=0.11$, $r_5=0.08$, $h_5=0.06$, $r_6=0.09$, $h_6=0.05$, $r_7=0.08$, $h_7=0.05$, $l_7=0.06$, $r_8=0.09$, $h_8=0.06$, $l_8=0.03$, $h_9=0.12$, $\tilde{v}_{91} = (0.08, 0.1)$, $\tilde{v}_{92} = (0.08, -0.1)$, $\tilde{v}_{93} = (-0.08, -0.1)$, $\tilde{v}_{94} = (-0.08, 0.1)$, $h_{10}=0.12$, $\tilde{v}_{(10)1} = (0.04, 0.07)$, $\tilde{v}_{(10)2} = (0.08, 0)$, $\tilde{v}_{(10)3} = (0.04, -0.07)$, $\tilde{v}_{(10)4} = (-0.04, -0.07)$, $\tilde{v}_{(10)5} = (-0.08, 0)$, $\tilde{v}_{(10)6} = (-0.04, 0.07)$.

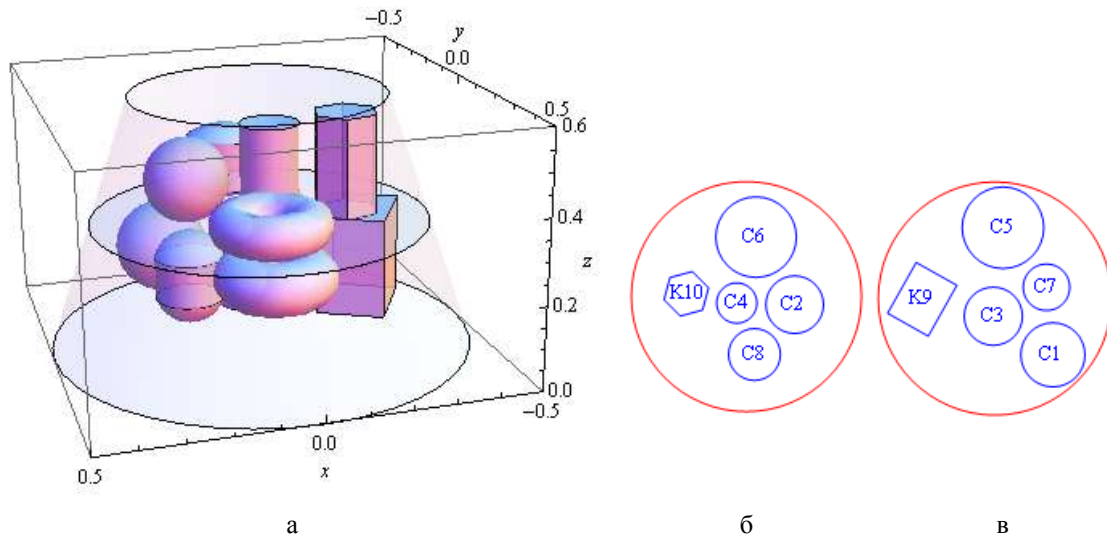


Рис. 3. Локально-оптимальное размещение объектов для тестовой задачи: а – система Ω_A ; б – проекция подмножества объектов A_1^1 на стеллаж S_2 снизу; в – проекция подмножества объектов A_+^2 на стеллаж S_2 сверху

Локально-оптимальное решение задачи найдено с помощью программы, реализованной в CAS Mathematica 9 (рис. 3). Точка локального минимума: (u^*, u'^*) , где:

$$u^* = (x_1^*, y_1^*, x_2^*, y_2^*, x_3^*, y_3^*, x_4^*, y_4^*, x_5^*, y_5^*, x_6^*, y_6^*, x_7^*, y_7^*, x_8^*, y_8^*, x_9^*, y_9^*, \theta_9^*, x_{10}^*, y_{10}^*, \theta_{10}^*),$$

$$u'^* = (\theta_{p1}^*, \alpha_{p1}^*, \theta_{p2}^*, \alpha_{p2}^*, \theta_{p3}^*, \alpha_{p3}^*, \theta_{p4}^*, \alpha_{p4}^*, \theta_{p5}^*, \alpha_{p5}^*, \theta_{p6}^*, \alpha_{p6}^*, \theta_{p7}^*, \alpha_{p7}^*, \theta_{p8}^*, \alpha_{p8}^*, x_{p2}^*, y_{p2}^*, x_{p3}^*, y_{p3}^*, x_{p6}^*, y_{p6}^*, x_{p9}^*, y_{p9}^*).$$

Значение функции цели: $F(u^*, u'^*) = 1.12726 \times 10^{-6}$. Время решения задачи около 10 секунд.

Выводы

Определены псевдонормализованные ϕ -функции и псевдонормализованные квази- ϕ -функции в качестве средств математического моделирования ограничений размещения в 3D задачах балансной компоновки с учетом минимально- и максимально допустимых расстояний. Предложенные функции позволяют строить математические модели задач балансной компоновки в виде задач нелинейного программирования.

Список литературы: 1. Chazelle B., Edelsbrunner H., Guibas L.J. The complexity of cutting complexes // Discrete & Computational Geometry. 1989. Vol. 4, № 2. P. 139–181. 2. Che C., Wang Y., Teng H. Test problems for quasi-satellite packing: Cylinders packing with behavior constraints and all the optimal solutions known // Optimization Online (2008). http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2008/09/2093.html 3. Modeling and Optimization in Space Engineering. Series: Springer Optimization and Its Applications / G. Fasano, J.D. Pinter (Eds.), XII. New York: Publisher Springer New York. Vol. 73. 404 p. 4. Sun Z., Teng H. Optimal layout design of a satellite module // Engineering optimization. 2003. Vol. 35, № 5. P. 513–530. 5. Stoyan Yu., Romanova T. Mathematical Models of Placement Optimization: Two- and Three-Dimensional Problems and Applications // Modeling and optimization in space engineering. Series: Springer optimization and its applications / Fasano G, Pinter J.D. (Eds.), XII. 2013. Vol. 73. P. 363–388. 6. Chernov N., Stoyan Yu., Romanova T. Mathematical model and efficient algorithms for object packing problem // Computational Geometry: Theory and Applications. 2010. Vol. 43, № 5. P. 533–553. 7. Chernov N., Stoyan Yu., Romanova T., Pankratov A. Phi-functions for 2D objects formed by line segments and circular arcs // Advances in Operations Research. Vol. 2012. Article ID 346358. DOI:10.1155/2012/346358. 8. Стоян Ю.Г., Панкратов А.В., Романова Т.Е., Чернов Н.И. Квази- ϕ -функции для математического моделирования отношений геометрических объектов // Доповіді Національної академії наук України. 2014. № 9. С. 53–57. 9. Стоян Ю.Г., Панкратов А.В., Романова Т.Е. Математическое моделирование ограничений на допустимые расстояния между геометрическими объектами // Кибернетика и системный анализ. 2012. Т. 48, № 3, С. 12–17.

Поступила в редколлегию 11.12.2014

Романова Татьяна Евгеньевна, д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела математического моделирования и оптимального проектирования Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины. Научные интересы: исследование операций, математическое моделирование, геометрическое проектирование. Адрес: Украина, 61084, Харьков, ул. Новгородская, 6а, кв. 31, тел.: 057 7013477.

Коваленко Анна Андреевна, аспирантка Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины. Научные интересы: исследование операций, математическое моделирование, геометрическое проектирование. Адрес: Украина, 61013, Харьков, ул. Матюшенко, 3а, кв. 43, тел.: 098 0005125.

УДК 519.715

В.В. ДОВГАЛЬ

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ПО СОВОКУПНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК

Рассматриваются методы многокритериального сравнения систем автоматизации производства, представленных множеством показателей качества. Предлагается аналитическая процедура поиска перспективных технических решений для выбора оптимального варианта построения системы автоматизации.

1. Введение

Обновить производственные мощности предприятия можно осуществить путем приобретения современного оборудования либо путем модернизации существующего. Современное технологическое оборудование содержит встроенные системы автоматизации (ВСА), позволяющие повысить его производительность и существенно улучшить качество выпускаемой продукции.

Снижения затрат на обновление производства можно достигнуть путем предварительной оценки эффективности различных вариантов его обновления в целях выбора оптимального решения. При этом используются следующие показатели эффективности ВСА: затраты на приобретение; продолжительность работ по демонтажу существующей и монтажу новой ВСА; стоимость монтажных и пуско-наладочных работ; площади для размещения ВСА; затраты на техническое обслуживание и ремонт; потребляемая мощность; гарантийный срок эксплуатации; наработка на отказ; среднее время восстановления; диапазон рабочих температур; увеличение выхода конечной продукции из одного и того же количества сырья; требуемое количество технологического персонала; производительность оборудования; прибыль на единицу материальных затрат; уровень снижения загрязнений воздушной среды при использовании нового оборудования и др.

Таким образом, при сопоставлении различных вариантов построения ВСА необходимо использовать многокритериальный анализ, который позволяет осуществить выбор наилучшего (оптимального) решения.

2. Существующее положение

Для количественной оценки характеристик сложной системы используется понятие «эффективность» [1,2], под которым понимается степень приспособления системы к выполнению поставленных задач. Количественную оценку эффективности выполняют при помощи критериев, составляемых из показателей эффективности, каждый из которых является характеристикой одного свойства системы.

Всякая сложная система или ее часть характеризуется совокупностью (вектором) показателей эффективности:

$$K=(k_1, k_2, \dots, k_m), \quad (1)$$

где $\{k_i\}, i = \overline{1, m}$ – частные показатели эффективности.

Широко применяются методы оптимизации, основанные на приведении векторной оптимизации к скалярной, например, метод, предложенный в работе [3]. Такие методы предус-

Поступила в редколлегию 11.12.2014

Романова Татьяна Евгеньевна, д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела математического моделирования и оптимального проектирования Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины. Научные интересы: исследование операций, математическое моделирование, геометрическое проектирование. Адрес: Украина, 61084, Харьков, ул. Новгородская, 6а, кв. 31, тел.: 057 7013477.

Коваленко Анна Андреевна, аспирантка Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины. Научные интересы: исследование операций, математическое моделирование, геометрическое проектирование. Адрес: Украина, 61013, Харьков, ул. Матюшенко, 3а, кв. 43, тел.: 098 0005125.

УДК 519.715

В.В. ДОВГАЛЬ

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ПО СОВОКУПНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК

Рассматриваются методы многокритериального сравнения систем автоматизации производства, представленных множеством показателей качества. Предлагается аналитическая процедура поиска перспективных технических решений для выбора оптимального варианта построения системы автоматизации.

1. Введение

Обновить производственные мощности предприятия можно осуществить путем приобретения современного оборудования либо путем модернизации существующего. Современное технологическое оборудование содержит встроенные системы автоматизации (ВСА), позволяющие повысить его производительность и существенно улучшить качество выпускаемой продукции.

Снижения затрат на обновление производства можно достигнуть путем предварительной оценки эффективности различных вариантов его обновления в целях выбора оптимального решения. При этом используются следующие показатели эффективности ВСА: затраты на приобретение; продолжительность работ по демонтажу существующей и монтажу новой ВСА; стоимость монтажных и пуско-наладочных работ; площади для размещения ВСА; затраты на техническое обслуживание и ремонт; потребляемая мощность; гарантийный срок эксплуатации; наработка на отказ; среднее время восстановления; диапазон рабочих температур; увеличение выхода конечной продукции из одного и того же количества сырья; требуемое количество технологического персонала; производительность оборудования; прибыль на единицу материальных затрат; уровень снижения загрязнений воздушной среды при использовании нового оборудования и др.

Таким образом, при сопоставлении различных вариантов построения ВСА необходимо использовать многокритериальный анализ, который позволяет осуществить выбор наилучшего (оптимального) решения.

2. Существующее положение

Для количественной оценки характеристик сложной системы используется понятие «эффективность» [1,2], под которым понимается степень приспособления системы к выполнению поставленных задач. Количественную оценку эффективности выполняют при помощи критериев, составляемых из показателей эффективности, каждый из которых является характеристикой одного свойства системы.

Всякая сложная система или ее часть характеризуется совокупностью (вектором) показателей эффективности:

$$K=(k_1, k_2, \dots, k_m), \quad (1)$$

где $\{k_i\}, i = \overline{1, m}$ – частные показатели эффективности.

Широко применяются методы оптимизации, основанные на приведении векторной оптимизации к скалярной, например, метод, предложенный в работе [3]. Такие методы предус-

матривают введение результирующего (обобщенного) показателя эффективности K_p , который определяется следующим функционалом:

$$K_p = \Phi(k_1, k_2, \dots, k_m; \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m). \quad (2)$$

здесь Φ – функционал, обеспечивающий сворачивание совокупности частных показателей эффективности к результирующему показателю; $\{k_i\}, i = \overline{1, m}$ – совокупность оценок частных показателей; γ_i – весовые коэффициенты частных показателей.

Однако обобщенные показатели эффективности могут оказаться несостоятельными, поскольку у них есть главный изъян: недостаток в одном показателе может быть компенсирован за счет другого показателя.

Во многих случаях обоснованно установить аналитический вид зависимости (2) оказывается невозможным. При этом для решения задачи оптимизации аналитический вид функционала (2) формируют, используя метод экспертных оценок. Оптимальному решению, получаемому таким образом, неизбежно будет присущ элемент субъективизма.

Среди методов векторной оптимизации наиболее распространен принцип Парето, позволяющий сузить область поиска оптимальных решений. Сущность этого метода заключается в том, что сравниваются векторы $K(S^1)$ и $K(S^2)$, отражающие эффективность систем S^1 и S^2 , т.е. проверяется условие:

$$K(S^2) \leq K(S^1). \quad (3)$$

Если условие (3) выполняется, то предпочтение отдается системе S^2 . Если же векторы несравнимы, то системы S^1 и S^2 относят к перспективным вариантам (область Парето). Для выбора решения из суженной области решений используют методы, основанные на результирующем показателе эффективности.

Разбиение процесса оптимизации на два этапа – этап нахождения области Парето и последующий этап выбора из этой области единственной наилучшей системы на основе результирующего показателя эффективности позволяет минимизировать ухудшение результатов оптимального поиска.

Цель исследования: разработать эффективную аналитическую процедуру поиска перспективных решений в m -мерной области возможных решений.

3. Постановка задачи

Формально задача поиска оптимальной системы формулируется следующим образом. На первом этапе по заданным векторам эффективности K (1) в области возможных решений W требуется найти область перспективных решений $\Omega \subseteq W$. На втором этапе в области Ω необходимо найти наилучший вариант системы $S_{opt} \in \Omega$, обеспечивающий минимум функционала результирующего показателя эффективности K_p :

$$K_p(S_{opt}) = \min_{S \in \Omega} K_p(S), \quad \Omega \subseteq W. \quad (4)$$

Для удобства сравнения значений вектора K (1), соответствующих различным вариантам системы, все показатели качества k_i приводятся к стандартному виду:

$$k_i \geq 0, i = \overline{1, m}. \quad (5)$$

При этом чем меньше величина k_i , тем лучше система.

Системы S^1 и S^2 сравнимы по вектору качества $K = K(S)$, если выполняется одно из следующих условий:

$$1) \text{ либо } K(S^2) \leq K(S^1),$$

$$2) \text{ либо } K(S^2) \geq K(S^1), \quad (6)$$

$$3) \text{ либо } K(S^2) = K(S^1).$$

Если ни одно из этих условий не выполняется, то системы S^1 и S^2 несравнимы по вектору K . Смысл векторных неравенств (6) состоит в следующем:

1) каждый из показателей качества $k_i(S), i = \overline{1, m}$ у системы S^2 не хуже (не больше), чем у системы S^1 , в том числе один из этих показателей лучше (меньше), чем у системы S^1 . В этом случае утверждают, что система S^2 лучше, чем S^1 ;

2) все показатели качества $k_i(S), i = \overline{1, m}$ у системы S^2 не лучше (не меньше), чем у системы S^1 , в том числе один из этих показателей хуже (больше). При этом утверждают, что система S^2 хуже, чем S^1 ;

3) имеет место равенство $k_i(S^2) = k_i(S^1), i = \overline{1, m}$ и, следовательно, системы S^1 и S^2 имеют одинаковое качество, т.е. принадлежат к одному и тому же классу систем.

Для векторно-сравнимых систем вводится понятие безусловного критерия предпочтения, который формулируется следующим образом: если выполняется векторное неравенство $K(S^2) \leq K(S^1)$, т.е. $k_i(S^2) \leq k_i(S^1)$ для всех $i = \overline{1, m}$, в том числе хотя бы для одного i неравенство выполняется строго (т.е. $k_i(S^2) < k_i(S^1)$), то система S^2 безусловно лучше, чем S^1 .

4. Аналитическая процедура

При разработке аналитической процедуры поиска перспективных систем в m -мерной области возможных решений приняты следующие понятия:

- *базовая система* – система, рассматриваемая на текущем шаге процедуры как исходная;
- *текущая система* – система, сравниваемая с базовой системой на текущем шаге процедуры.

Ниже представлена 8-шаговая аналитическая процедура поиска перспективных вариантов системы.

Шаг 1. Записывают все варианты системы и значения их показателей эффективности в таблице вида:

Вариант системы	Показатели эффективности					Результат
	k_1	k_2	k_3	...	k_m	

Шаг 2. В качестве базовой принимают первую систему, записанную в таблице, в качестве текущей выбирают вторую систему и переходят к выполнению шага 3.

Шаг 3. Сравнивают показатели качества базовой и текущей системы.

Шаг 4. Если в процессе сравнения выявили безусловно худшую текущую систему (по отношению к базовой), то в графе «Результат» отмечают ее знаком «-». В качестве текущей выбирают следующую неотмеченную знаком «+» или «-» систему, не совпадающую с базовой, и переходят к шагу 3. Если таблица просмотрена до конца, то переходят к шагу 8.

Шаг 5. Если в процессе сравнения выявили безусловно лучшую текущую систему (по отношению к базовой), то в графе «Результат» отмечают базовую систему знаком «-». В качестве базовой принимают найденную безусловно лучшую систему, а в качестве текущей - следующую систему, неотмеченную знаком «+» или «-», не совпадающую с базовой системой, и переходят к шагу 3. Если таблица просмотрена до конца, то переходят к шагу 8.

Шаг 6. Если в процессе сравнения обнаружена текущая система, векторно несравнимая с базовой, то в качестве текущей выбирают следующую систему, неотмеченную знаком «+» или «-», которая не совпадает с базовой системой, и переходят к шагу 3. Если таблица просмотрена до конца, переходят к выполнению шага 7.

Шаг 7. Отмечают в графе «Результат» базовую систему знаком «+». В качестве базовой принимают первую неотмеченную знаком «+» или «-» систему. Если таблица просмотрена до конца переходят к шагу 8. Иначе в качестве текущей выбирают следующую неотмеченную знаком «+» или «-» систему и переходят к шагу 3.

Шаг 8. Если в таблице остается одна неотмеченная знаком «+» или «-» система, то в графе «Результат» отмечают ее знаком «+» и завершают процедуру. Если же в таблице остается более одной неотмеченной знаком «+» или «-» системы, то в качестве текущей выбирают следующую неотмеченную знаком «+» или «-» систему, которая не совпадает с базовой, и переходят к шагу 3.

Пример использования аналитической процедуры с обнаружением безусловно лучшей системы приведен в таблице. Здесь знаком «+» отмечена безусловно лучшая система, а знаком «-» – безусловно худшие системы.

Вариант системы	Показатели эффективности					Результат
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	
S_1	2,5	4,2	2,5	3,7	4,2	-
S_2	7,2	6,3	7,2	5,2	4,7	-
S_3	3,1	4,2	3,1	4,3	4,4	-
S_4	4,2	5,3	4,2	4,8	4,3	-
S_5	2,4	3,6	2,5	3,6	4,0	+

На основе описанной выше аналитической процедуры разработана программа для персонального компьютера, которая позволяет автоматически выполнить процесс поиска перспективных систем в области возможных решений. Результаты работы программы представлены на рисунке.

Система	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	Результат
S_1	3,4	2,8	4,2	5,4	3,8	4,6	6,3	+
S_2	3,5	3,2	4,4	5,7	4,2	4,9	6,4	-
S_3	3,7	2,9	4,6	5,6	4,1	4,8	6,5	-
S_4	3,7	3,0	4,8	5,9	4,0	4,7	6,6	-
S_5	3,3	2,9	4,1	5,6	3,8	4,7	6,3	+
S_6	3,6	3,0	4,5	5,8	4,3	5,0	6,5	-

Результат работы программы по поиску перспективных систем

В случае, когда несколько систем являются перспективными, т.е. для них «Результат» характеризуется знаком «+» (см. рисунок), переходят ко второму этапу оптимизации, когда для завершения процесса поиска используют взвешенную сумму показателей эффективности, определяемую аддитивной функцией. Лучшим принимают значение вектора Q , которое соответствует минимальному значению суммы:

$$K_p = \sum_{i=1}^m c_i \cdot k_i \Rightarrow \min, \quad (7)$$

где $\sum_{i=1}^m c_i = 1$ – некоторые весовые коэффициенты, определенные методом экспертных оценок.

Выводы

Разработана аналитическая процедура многокритериального выбора наилучшего варианта системы из множества допустимых вариантов. Разделение процесса поиска опти-

мальной системы на два этапа позволяет улучшить качество принятого решения. Процедура применима для различных систем, представленных совокупностью показателей качества.

Список литературы: 1. Пархоменко, П. П. Основы технической диагностики [Текст] / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. М. : Энергоиздат, 1981. 320 с. 2. Хог, Э. Прикладное оптимальное проектирование: механические системы и конструкции [Текст] / Э. Хог, Я. Арора. М. : Мир, 1983. 478 с. 3. Митин, Г. П. Как выбрать программируемый логический контроллер [Текст] / Г. П. Митин // Мир компьютерной автоматизации. 2000. № 1. С. 66-69. 4. Гуткин, Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества [Текст] / Л. С. Гуткин. М. : Советское радио, 1975. 367 с.

Поступила в редколлегию 20.12.2014

Довгаль Владимир Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированного управления технологическими процессами Запорожской государственной инженерной академии. Научные интересы: архитектура и программирование систем автоматизации производства. Адрес: Украина, 69006, Запорожье, ул. Добролюбова 10, тел.: (061) 227-12-33, +380950935995. E-mail автора: ur4qqj@ukr.net.