БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бондур В.Г.* Актуальность и необходимость космического мониторинга природных пожаров в России // Вестник ОНЗ РАН, NZ11001. – 2010 (a). – Т. 2.
2. *Ackerman S.A., Strabala K.I., Menzel W.P., Frey R.A., Moeller C.C., Gumley L.E., Baum B.A., Schaaf C., Riggs G.* 1997: Discriminating clear-sky from cloud with MODIS algorithm theoretical basis document (MOD35). EOS ATBD web site. – 125 p.
3. *Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика: классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика, 1989.
4. *Журавлёв Ю.И.* Распознавание. Классификация. Прогноз. Математические методы и их применение. Вып. 2. – М.: Наука, 1989.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. В.И. Цурков.

Бондур Валерий Григорьевич – Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос»; e-mail: office@aerocosmos.info; 105064, г. Москва, Гороховский пер. 4; тел.: +74956321654; директор; академик РАН; д.т.н.; профессор.

Матвеев Иван Алексеевич – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук; e-mail: matveev@ccas.ru; 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 40; тел.: 84991352228; отдел сложных систем; зав. сектором; к.ф.-м.н.

Мурынин Александр Борисович – e-mail: AMurynin@bk.ru; тел.: +79266902722; старший научный сотрудник; к.т.н.

Трёкин Алексей Николаевич – Московский физико-технический институт (государственный университет); e-mail: jagdpanzerIV@yandex.ru; 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9; тел.: 84954084554; отдел сложных систем; факультет управления и прикладной математики; студент.

Bondur Valery Grigoryevich – Research Institute for Aerospace Monitoring “Aerocosmos”; e-mail: office@aerocosmos.info; 4, Gorokhovskij, Moscow, 105064, Russia; phone: +74956321654; director, academician of Russian Academy of Sciences; dr. of eng. sc.; professor.

Matveev Ivan Alexeevich – Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS; e-mail: matveev@ccas.ru; 40, Vavilov street, Moscow, 119333, Russia; phone: +74991352228; the department of complex systems; head of sector; cand. of phis.-math. sc.

Murynin Alexander Borisovich – e-mail: AMurynin@bk.ru; 40 phone: +79266902722; senior researcher; cand. of eng. sc.

Trekin Alexej Nikolaevich – Moscow Institute of Physics and Technology; e-mail: jagdpanzerIV@yandex.ru; 9, Institutskii per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia; phone: +74954084554; the department of complex systems; student.

УДК 621.391.25

М.В. Стремоухов, С.В. Чистяков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ, УЧИТЫВАЮЩАЯ НЕЛИНЕЙНЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассматривается проблема повышения качества при эффективном кодировании изображений с учетом нелинейных статистических зависимостей между их элементами. Предлагается способ параметрического кодирования изображений на основе математической модели нелинейной формирующей системы при заданной возбуждающей последовательности, обеспечивающей наилучшее по выбранному критерию совпадение синтезированного изображения с исходным. Авторы указывают на достоинства предлагаемого под-

хода и предполагают, что на основе оптимизации параметров нелинейной формирующей системы возможно повышение качества восстановления изображений, передаваемых по цифровым каналам связи.

Кодирование изображений; параметрическое кодирование; нелинейная формирующая система; нелинейная зависимость.

M.V. Stremouhov, S.V. Chistyakov

THE MATHEMATICAL MODEL OF THE FORMING SYSTEM, TAKING INTO ACCOUNT THE NONLINEAR STATISTICAL RELATIONSHIPS IMAGES

In this article the authors consider the problem of improving the efficient images coding quality with a view of nonlinear statistical relationships between their elements. Authors suggest a parametric images coding method, based on nonlinear forming system at a given stimulus sequence, which provides according to selected criteria the best match of the synthesized image and the original.

The authors point out advantages of the proposed approach and suggest that on the basis of nonlinear forming system parameters optimization is possible improvement of the restoration quality of images, transmitted by digital communication channels.

Image coding; parametric coding; nonlinear forming system; nonlinear relationships.

Конвергенция информационных и телекоммуникационных технологий способствует реализации концепции сетей связи следующего поколения и созданию, в первую очередь на основе сети Интернет, мультисервисных сетей, обеспечивающих предоставление неограниченного набора услуг, в том числе инфокоммуникационных. Такие услуги предполагают использование средств вычислительной техники для обработки, хранения, передачи или предоставления различных видов информации, в том числе мультимедиа [1]. С точки зрения затрат, наиболее ресурсоемкими являются услуги, связанные с передачей видеоинформации.

Расширение функциональности сетей связи за счет предоставления инфокоммуникационных услуг ограничено возможностями транспортной инфраструктуры сети Интернет. Поэтому актуальным является решение задач управления информационными ресурсами, одна из которых – эффективное кодирование с целью сокращения избыточности и уменьшения объема передаваемой информации.

Наибольшей популярностью пользуются методы, в основе которых лежит учет специфических особенностей восприятия информации (к примеру, видеоинформации), содержащей отдельные несущественные составляющие, которые при определенных условиях могут быть частично или полностью удалены, что позволяет существенно сократить объем представления такой информации, а небольшие потери данных компенсируются ростом степени сжатия [2, 3]. При задании степени сжатия достигается компромисс между размером и степенью потери качества изображений.

Для сжатия изображения с потерями требуется разработка подходящей модели источника, выбор адекватной меры искажений ρ, а также вычисление необходимой скорости передачи как функции искажений $R(\rho)$. Ввиду высокой сложности данная задача в настоящее время решена лишь в небольшом числе практических случаев. Одним из таковых является случай, когда изображение представляет собой Гауссову случайную величину, а мера искажения есть функция среднеквадратической ошибки[4].

По этой причине для упрощения анализа и уменьшения вычислительной сложности все алгоритмы сжатия графики реализуют блочную обработку и используют идею когерентности областей, заключающуюся в малом изменении цвета и структуры на небольшом участке изображения (блоке). При оптимизации алгоритмов сжатия в большинстве случаев выбирается набор общих коэффициентов, вычисляемый путем оценивания некоторой простой модели изображения. При этом учитываются только линейные взаимосвязи между элементами изображения, что справедливо только для гауссовских случайных величин, к которым подавляющая часть изображений не относится.

Вместе с тем, при кодировании, например, речевой информации широко используются методы, основанные на извлечении из кодируемого речевого сигнала информации о параметрах и построении на их основе модели источника, обеспечивающего синтез наилучших оценок исходного речевого сигнала. При этом кодированию и передаче по каналу связи подлежат параметры такой модели [5].

Авторы предполагают, что подобный метод применим и к кодированию изображений. Иллюстрация данного подхода представлена на рис. 1.

При этом необходимо учитывать, что изображения по своей природе нелинейны и представляют собой случайные векторные поля, операции с которыми требуют применения соответствующих математических методов. Обычно, с целью уменьшения вычислительной сложности изображения предварительно преобразуют к виду векторной случайной величины.

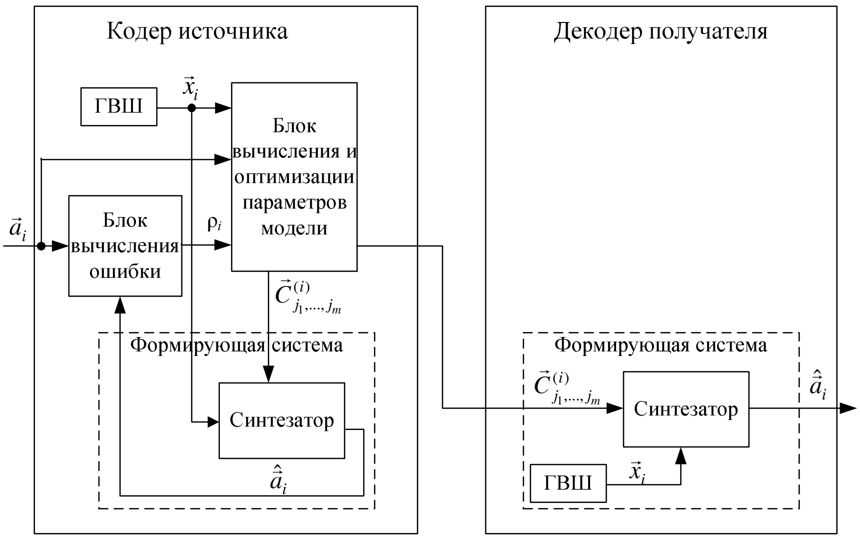

Рис. 1. Принцип кодирования – декодирования сообщения с использованием формирующей системы

где $\vec{a}_i = [a_1, a_2, \ldots, a_k]$ – кодируемые k-компонентные векторы исходного изображения $\mathbf{A} = [\vec{a}_1, \vec{a}_2, \ldots, \vec{a}_n]^{\mathrm{T}}$; n – число кодируемых векторов; $\hat{\vec{a}}_i = [\hat{a}_1, \hat{a}_2, \ldots, \hat{a}_k]$ – векторы синтезированного изображения $\hat{\mathbf{A}} = [\hat{\vec{a}}_1, \hat{\vec{a}}_2, \ldots, \hat{\vec{a}}_n]^T$; $\vec{C}^{(i)}_{j_1,\ldots,j_m}$ – вектор параметров модели для формирования оценки $\hat{\vec{a}}_i$; ρ_i – ошибка оценивания $\vec{a}_i$, соответствующая принятой мере искажения; ГВШ – генератор возбуждающего шума (возбуждающей последовательности) $\mathbf{X} = [\vec{x}_1, \vec{x}_2, \ldots, \vec{x}_n]^T$.

Предположим, что источник информации генерирует случайную последовательность векторов (1)

$$\mathbf{A} = [\vec{a}_1, \vec{a}_2, \ldots, \vec{a}_n]^{\mathrm{T}}. \tag{1}$$

На вход формирующей системы кодера действует возбуждающая последовательность $\vec{x}_i \in \mathbf{X}$, статистические характеристики которой известны.

Требуется оптимизировать параметры формирующей системы (определить эффективный оператор) $F_э(\mathbf{X})$ так, чтобы

$$M\,(\vec{\rho}[\mathbf{A}, F_ý(\mathbf{X})]) \to \min_{F_ý \in G_{F_ý}} \tag{2}$$

по всему классу $G_{F_э}$ физически возможных операторов (функционалов), являющихся математическими моделями формирующей системы, где $\vec{\rho} = [\rho_1, \rho_2, ..., \rho_n]^{\mathrm{T}}$ – вектор ошибок оценивания, соответствующих принятой мере искажения.

Каждый вектор исходного изображения кодируется независимо. Выражение (2) для функции среднеквадратической ошибки, принятой в качестве меры искажения, представляется в виде

$$(\vec{a} - \hat{\vec{a}})^{\mathrm{T}}\,(\vec{a} - \hat{\vec{a}}) \to \min_{F_э \in G_{F_э}} \tag{3}$$

для каждого из кодируемых векторов, поэтому для наглядности и удобства записи в выражении (3) и далее индекс номера вектора опущен.

Поиск эффективного оператора $F_ý(\vec{x})$ производится в классе $G_{F_э}$ многомерных нелинейных аппроксимирующих полиномов [6]. Тогда оценка $\hat{\vec{a}}$ текущей реализации вектора $\vec{a}$ представляется как

$$\hat{\vec{a}} = \sum_{j_1=0}^{n_1} \ldots \sum_{j_m=0}^{n_m} C_{j_1,\ldots,j_m} x_1^{j_1} \ldots x_m^{j_m}\,, \tag{4}$$

где $\vec{C}_{j_1,\ldots,j_m}$ – вектор коэффициентов m-мерного аппроксимирующего полинома, при этом m определяет длину модели, а $n_1,..., n_m$ – величины, определяющие степень нелинейности оператора $F_э$.

С учетом (4) задача (3) может быть записана подробнее, как выполнение оценки вектора $\vec{a}$ путем наилучшей оценки по всем его k компонентам:

$$\begin{gathered}\left[a_1 - \sum_{j_1=0}^{n_1} \ldots \sum_{j_m=0}^{n_m} C_{j_1,\ldots,j_m} x_1^{j_1}(1) \ldots x_m^{j_m}(1)\right]^2 + \ldots + \\ + \left[a_k - \sum_{j_1=0}^{n_1} \ldots \sum_{j_m=0}^{n_m} C_{j_1,\ldots,j_m} x_1^{j_1}(k) \ldots x_m^{j_m}(k)\right]^2 \to \min_{\vec{C}_{j_1,\ldots,j_m}}.\end{gathered} \tag{5}$$

Обобщая выражение (5), представим его в виде

$$\sum_{i=1}^{k} \left[a_i - \sum_{j_1=0}^{n_1} \ldots \sum_{j_m=0}^{n_m} C_{j_1,\ldots,j_m} x_1^{j_1}(i) \ldots x_m^{j_m}(i)\right]^2 \to \min_{\vec{C}_{j_1,\ldots,j_m}}, \tag{6}$$

где

$$x_s(i) = \begin{cases} 0 & , \textit{если}\ s - i + 1 \le 0 \\ x_{s-k+1} & , \textit{если}\ s - i + 1 > 0 \end{cases}.$$

Для оптимального конструирования оператора $F_э$ продифференцируем левую часть выражения (6) по каждому из коэффициентов $C_{j_1,\dots,j_m}$ и приравняем нулю.

$$\frac{\partial}{\partial C_{l_1,\dots,l_m}}\left(\sum_{i=1}^{k}\left[a_i-\sum_{j_1=0}^{n_1}\dots\sum_{j_m=0}^{n_m}C_{j_1,\dots,j_m}x_1^{j_1}(i)\dots x_m^{j_m}(i)\right]^2\right)= \tag{7}$$

$$=2\sum_{i=1}^{k}\left(\left[a_i-\sum_{j_1=0}^{n_1}\dots\sum_{j_m=0}^{n_m}C_{j_1,\dots,j_m}x_1^{j_1}(i)\dots x_m^{j_m}(i)\right]\cdot x_1^{l_1}(i)\dots x_m^{l_m}(i)\right)=0,$$

где $l_1, l_2, \dots, l_m$ принимают те же значения, что и $j_1, j_2, \dots, j_m$.

На основании (7) построим систему линейных алгебраических уравнений вида

$$\sum_{i=1}^{k}\sum_{j_1=0}^{n_1}\dots\sum_{j_m=0}^{n_m}C_{j_1,\dots,j_m}x_1^{j_1+l_1}(i)\dots x_m^{j_m+l_m}(i)=\sum_{i=1}^{k}a_i x_1^{l_1}(i)\dots x_m^{l_m}(i)\cdot \tag{8}$$

Перебором всевозможных комбинаций индексов l_1, l_2, …, l_m, отличающиеся хотя бы одним элементом, находятся все уравнения системы, из решения которой определяется $\vec{C}_{j_1,\dots,j_m}$, минимизирующий (6). Для получения оценок всех кодируемых векторов необходимо решить n таких систем, отличающихся друг от друга исходными данными $\vec{a}_i$ и $\vec{x}_i$.

Полученные таким образом значения массива параметров $\mathbf{C}_{j_1,\dots,j_m}$ позволяют непосредственно построить функциональную схему формирующей системы, учитывающей нелинейные статистические зависимости изображений.

Достоинством рассматриваемого подхода является то, что для синтеза формирующей системы требуется решение систем алгебраических, а не интегральных уравнений и существенно проще в реализации, особенно средствами цифровой обработки сигналов. А результаты решения позволяют непосредственно построить функциональную схему нелинейной формирующей системы.

Учет нелинейных статистических зависимостей между элементами изображений позволит повысить качество восстановления изображений, передаваемых по цифровым каналам связи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Концептуальные положения по построению мультисервисных сетей на ВСС России (2001 г.) // Утверждены Министерством Российской Федерации по связи и информатизации 25 января 2002 г., письмо № 451.
2. *Семенюк В. В.* Экономное кодирование дискретной информации. – СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2001. – 115 с.
3. *Миано Дж.* Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии (перевод с англ.). – М.: Изд-во «Триумф», 2003. –336 с.
4. *Ватолин Д., Ратушняк А. и др.* Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 384 с.
5. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника: В 2 ч. Ч. 1. Основы теории вероятностей и случайных процессов. – М.: Советское радио, 1966. – 219 с.
6. *Ланнэ А.А.* Нелинейные динамические системы: синтез, оптимизация, идентификация. – Л.: ВАС, 1985, –240 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Р. Иванов.

Стремоухов Михаил Владимирович – Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации; e-mail: smv_57@bk.ru; г. Орел, ул. 2-я Курская, 34 , кв. 68; тел.: +79038810149; кафедра сетей связи и систем коммутации; преподаватель.

Чистяков Сергей Владимирович – e-mail: chis_serg@mail.ru; г. Орел, ул. Приборостроительная, 80, кв. 84; тел.: +79192049211; кафедра систем многоканальной электросвязи; к.т.н.; доцент.

Stremouhov Mihail Vladimirovich – Academy of the Federal security service of the Russian Federation; e-mail: smv_57@bk.ru; 34, 2-ya Kurskaya street, fl. 68, Orel, Russia; phone: +79038810149; the department of telecommunication networks and switching systems; lecturer.

Chistyakov Sergei Vladimirovich – e-mail: chis_serg@mail.ru; 80, Priborostroitel'naya street, fl. 84, Orel, Russia; phone: +79192049211; the department of systems of multichannel telecommunication; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 519.85

М.А. Трифонов

ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЦЫ СМЕЖНОСТИ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ МИНИМИЗАЦИИ ДИЗЪЮНКТИВНЫХ НОРМАЛЬНЫХ ФОРМ

Рассматривается метод применения матрицы смежности из теории графов для решения задач минимизации дизъюнктивных нормальных форм. Целью применения метода является универсальность представления входных данных для последующей обработки эвристическими алгоритмами. Для большинства подобных задач на сегодняшний день нет алгоритмов, решающих их за полиномиальное время. Для некоторых задач существуют алгоритмы, имеющие сложность ниже экспоненциальной, но всё же достаточно высокую: например, для разложения числа на множители существуют алгоритмы, имеющие субэкспоненциальную временную сложность. Вследствие этого – несмотря на экспоненциальный рост вычислительных мощностей современных компьютеров – во многих прикладных задачах не удаётся найти точного решения за приемлемое время.

Оптимизация; дизъюнктивные нормальные формы; задачи дискретной оптимизации; графы, матрица смежности; оптимальное решение; булева функция.

M.A. Trifonov

APPLICATION OF ADJACENCY MATRIX TO MINIMIZE DISJUNCTIONS NORMAL FORMS

This article describes the method of application of adjacency matrix of the graph theory to minimize disjunctions normal forms. The purpose of the method is the universality of the input data for processing heuristic algorithms. For most of those challenges to date, there is no algorithm solving the polynomial time. For some tasks, there are algorithms that have difficulty following exponential, but still quite high up: for example, the decomposition of the multipliers are there algorithms that are sub eksponentcialnost a temporary difficulty. As a result, despite the exponential growth of computing power of today's computers – in many applied tasks not performed like that to find the exact solution in a reasonable amount of time.

Optimization; disjunctive normal forms; problems of discrete optimization; column; contiguity matrix; optimum decision; Boolean function.

Проблема минимизации булевых функций является классической задачей, которая широко известна. Однако до сих пор не утратила своей актуальности проблема повышения эффективности алгоритмов минимизации булевых функций как в отношении сокращения времени поиска оптимального решения, так и улучшения качества этого решения. Применение матрицы смежности позволяет строить более качественные алгоритмы поиска оптимального решения за кратчайшее время.

Матрица смежности графа G с конечным числом вершин n (пронумерованных числами от 1 до n) – это квадратная матрица A размер n, в которой значение элемента aij равно числу рёбер из i-й вершины графа в j-ю вершину. Иногда, осо-