

УДК 621.395

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ КОДИРОВАННЫХ ДАННЫХ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

А.И. МИТЮХИН

*Институт информационных технологий Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлен анализ эффективности методов описания экологических данных дистанционного зондирования Земли. В качестве исходных пространственных данных рассматриваются снимки от аэрокосмических средств наблюдения. Анализ производился на изображениях ландшафтных типов и физических природных образований растрового формата. В качестве кодируемых использовались полигональные объекты различных ландшафтных категорий. Анализируются методы, основанные на статистическом подходе, используемом для линейной обработки 2D-сигналов. Сравнительный анализ касается оценки эффективности с точки зрения сжатия, методов энтропийного кодирования и координатных преобразований. В качестве преобразования рассматривалось оптимальное дискретное преобразование Карунена-Лоэва. Энтропийное кодирование выполнялось с использованием оптимального алгоритма Хаффмена. Оценивалась эффективность сжатия исходных данных при условии получения на выходе обработки изображения с среднеквадратической ошибкой, приближающейся к нулевому значению. Приведены результаты экспериментальной оценки эффективности методов, которые дают возможность устранять избыточность пространственных данных, хранящихся в системах управления базами данными экологического назначения.

Ключевые слова: экология, кодирование, координатное преобразование, полигон, энтропия, сжатие, географическая система, дисперсия.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ALGORITHMS FOR COMPRESSING THE ENCODED DATA OF POLYGON OBJECTS

A. MITSYUKHIN

*Institute of Information Technologies of Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The analysis of the effectiveness of methods for describing environmental data of remote sensing of the Earth is presented. Imagery from aerospace observations is considered as the initial spatial data. The analysis was carried out on images of landscape types and physical natural formations of raster format. Polygonal objects of various landscape categories were used as coded. Methods based on the statistical approach used for linear processing of 2D signals are analyzed. Comparative analysis concerns the evaluation of efficiency in terms of compression, entropy coding methods and coordinate transformations. The optimal discrete Karunen-Loeva transformation was considered as a transformation. Entropy coding was performed using the optimal Huffman algorithm. The efficiency of compression of the original data was evaluated, provided that the output of image processing was obtained with a mean square error approaching zero. The results of an experimental assessment of the effectiveness of methods that make it possible to eliminate the redundancy of spatial data stored in environmental database management systems are presented.

Keywords: ecology, coding, coordinate transformation, polygon, entropy, compression, geographic system, dispersion.

Введение

Для решения многих задач экологического контроля окружающего пространства используется аэрокосмическое дистанционное зондирование (ДЗ). Возникает необходимость в обеспечении эффективной передачи, хранения, перераспределения, обработки и обслуживании огромных баз данных (ДЗ). В современных географических информационных системах (ГИС)

данные ДЗ представляются в виде растровых и векторных структур. Выбор типа структуры для последующей обработки определяется многими факторами: назначением приложения, удобством обработки проверенными средствами измерения, быстрым и достоверным дешифрированием экологических данных ДЗ. Доступным и удобным материалом ГИС являются растровые данные. Они используются для приложений, связанных с необходимостью постоянного наблюдения поверхностных полигонов [1]. Примерами полигонов могут быть болота, осушенные болота, разные лесные массивы, земли сельскохозяйственного назначения, антропогенные объекты, такие как дороги, приусадебные участки и пр. С ростом объемов данных ГИС становится все более важным эффективным представление растровых видеоданных. Целью настоящего сообщения является сравнительный анализ эффективности алгоритмов устранения избыточности площадных объектов, оптимизирующий, например, этап тематического распознавания полигонов.

Теоретические принципы

Дальнейшее рассмотрение основывается на предположении о выполненной к снимку операции сегментации. В базе данных ГИС хранится цифровой растровый снимок G экологического ДЗ. Снимок содержит K пространственно распределенные области $g_i, i=1, \dots, K$. Снимку G соответствует матрица $\mathbf{G} = (g_{m,n})$ размером $M \times N$, где m и n обозначают положение пикселя, соответственно в строке и столбце матрицы. Матрица \mathbf{G} характеризуется дисперсией σ_i^2 , ковариационной $\text{cov}(g_i)$ или корреляционной $\text{corr}(g_i)$ функциями. Снимок удовлетворяет определению однослойного полигона, когда выполняется

$$\mathbf{G} = \bigcup_{i=1}^K g_i, \quad g_i \cap g_j = \emptyset, \quad i \neq j, \quad g_i, \quad i=1, \dots, K. \quad (1)$$

Выражение (1) соответствует реальным снимкам ДЗ базы данным ГИС. Один из методов представления растровых изображений полигонов основывается на присвоении тематическим областям полигона разных числовых значений [2]. В этом случае, не зависимо от количества K областей интереса, образующих полигон, в ГИС необходимо хранить весь объем $V = MNn$ данных, где n – значность кода. В статье рассматриваются методы уменьшения объема V путем применения двух подходов: энтропийное кодирование и координатное преобразование. Первый этап обработки (общий для рассматриваемых подходов) связан с изменением статистических характеристик пространственных данных G . Для этого применяется предпроцессорное однородное точечное кодирование [3] вида

$$\mathbf{C} = f(g_{m,n})[\mathbf{G}], \quad (2)$$

где $\mathbf{C} = (c_{mn})$ – матрица, элементы которой соответствуют однородным поверхностям, $f(g_{m,n})$ – функция точечной операции.

Кодирование (2) $g_{m,n}$ осуществляется присвоением полигону атрибутов $c_i, i=1, \dots, K, c_i \in \mathbb{Z}^+, c_i \neq c_j$. Например, всем пикселям области с категорией «пшеница» соответствует 2D кодовое слово с атрибутом $c_1 \in \mathbb{Z}^+$. Формируется новый образ данных с корреляцией $\text{corr}(c_{mn})$.

С использованием концепции теории информации выражение (2) описывает дискретный источник без памяти с известным законом распределения вероятностей элементов матрицы. Количественной характеристикой такого источника является величина энтропии. Эффективность описания источника оценивается фактором сжатия вида

$$\eta_H = H/L_n, \quad (3)$$

где H – энтропия, L_n – средняя длина кода источника.

Следует заметить, что в результате выполнения (2) теряется информационное содержание изображения снимка. В исходной постановке решаемой задачи речь идет о

формировании категориальных (тематических) признаков K полигона, поэтому потеря содержательной информации снимка не имеет значения

Другой математический подход описания процесса (2) основывается на свойстве коррелированности случайного процесса. Применение к сильно коррелированному процессу координатного преобразования позволяет уменьшить объем V_{uv} в области преобразований [4]. В работе рассматривается возможность использования координатного оптимального преобразования Карунена – Лоева (ПКЛ) [5]. Выбор ПКЛ связан с тем, что в сравнении с другими (Фурье-подобными) преобразованиями [6], реализуется полная декорреляция входного процесса, и тем самым восстановление исходных данных после выполнения обратного преобразования с минимально возможной среднеквадратической ошибкой ε_{\min} . Вычисление коэффициентов ПКЛ над каждым из фрагментов (c_{mn}) размером $N \times N$ выполняется формуле

$$\hat{c}_{uv} = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} c_{mn} \mathbf{A}_{mu} \mathbf{A}_{nv}, \quad (4)$$

где u и v обозначает индексы в области ПКЛ, $\mathbf{A}_{mu}, \mathbf{A}_{nv}$ – ядра преобразования по строкам и столбцам фрагмента (c_{mn}) .

Матрицы $\mathbf{A}_{mu}, \mathbf{A}_{nv}$ представляет собой собственные векторы ковариационных матриц по строкам $\text{cov}_{mm}(\mathbf{c}_{mn})$ и столбцам $\text{cov}_{nn}(\mathbf{c}_{mn})$. Этим матрицам соответствует собственные значения по строкам $(\lambda_{mm}) = (\sigma_{mu}^2)$ и столбцам $(\lambda_{nn}) = (\sigma_{nn}^2)$, где (σ_{mm}^2) и (σ_{nn}^2) – дисперсии изображений полигона по строкам и столбцам. Эффективность описания источника в области преобразований оценивается распределением дисперсий $(\hat{\sigma}_{uu}^2)$ и $(\hat{\sigma}_{vv}^2)$ по строкам и столбцам или распределением собственных значений матриц $\text{cov}_{mm}(\mathbf{c}_{mn})$ и $\text{cov}_{nn}(\mathbf{c}_{mn})$. Если значение $\text{corr}(c_{mn}) > 0,95$ между смежными отсчетами реальных изображений имеет величину становится возможным выигрыш в описании исходных данных [7]. Эффективность сжатия оценивается коэффициентом

$$\eta_T = N^2 - M / N^2, \quad (5)$$

где N^2 – затраты на описание без эффективного кодирования, M – затраты после отбора (фильтрации) коэффициентов \hat{c}_{uv} на основе анализа распределения дисперсий $(\hat{\sigma}_{uu}^2)$ и $(\hat{\sigma}_{vv}^2)$.

Экспериментальные исследования

Сравнительный анализ эффективности применения энтропийного кодирования и метода координатного преобразования осуществлялся на изображениях ДЗ со сложным полигоном. Количество областей с отличающимися статистическими характеристиками на полигоне не превышало $K \leq 8$. После выполнения операции (2), вычисления распределения вероятностей источника $P(c_{mn})$ определялось η_H (3). Для определения зоны фильтрации M коэффициентов с максимальным значением \hat{c}_{uv} использовалась 2D функция собственных значений в области преобразования вида [8].

$$\hat{\lambda}_{uv} = \hat{\sigma}_{uv}^2 = \text{diag}(\hat{\lambda}_{uu}) \text{diag}(\hat{\lambda}_{vv}). \quad (6)$$

Оценка эффективности метода координатного преобразования производилась по величине η_T (5). Исследования показали, что максимальное значение корреляционной связи между смежными отсчетов процесса (2) не превышало величину $\text{corr}(c_{mn}) \cong 0,85$ и уменьшалось с ростом расстояния между элементами матрицы (2). В отличие от реальных изображений, отображение (2) не является однородным из-за особенностей точечного кодирования областей полигона. Эксперимент показал, что выигрыш в сжатии изображения методом координатного преобразования в сравнении с энтропийным следует ожидать для полигона вида (2) со значением $\text{corr}(c_{mn}) \geq 0,9$.

Пример оценки эффективности сжатия. На рис. 1. показан ландшафтный снимок экологического отслеживания размером 16×24 .



Рис. 1. Изображение объекта экологического контроля

$$c = (c_{mn}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 3 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 3 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 3 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 3 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 3 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 3 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 3 & 2 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Рис. 2. Цифровой фрагмент полигона

После сегментации и кодирования фрагмента полигона с категориями: лес, дорога, открытый земельный покров, имеем цифровые данные, рис. 2. График 2D функции дисперсий (6) показан на рис. 3.

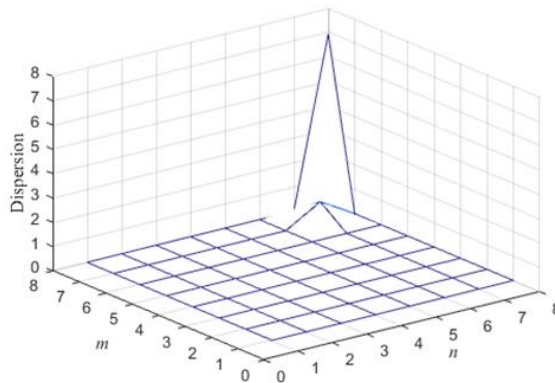


Рис. 3. График двумерной дисперсии
Fig. 3. Graph of two-dimensional dispersion.

График на рис. 3 отражает процесс полной декорреляции значений отсчетов матрицы данных. Операция нормирования к следу $\varepsilon_{\min} = \text{trace}(\text{diag}(\hat{\lambda}_{uv}))$ матрицы 2D дисперсий (6) дает выражение перераспределения дисперсии (энергии) сигнала

$${}^u \hat{\sigma}_{uv}^2 = \hat{\sigma}_{uv}^2 / \text{trace}(\text{diag}(\hat{\lambda}_{uv})) = \begin{pmatrix} {}^u \lambda_{77}^2 & {}^u \lambda_{88}^2 \end{pmatrix} = (0,1083 \quad 0,8917). \quad (7)$$

Из (7) следует, что в восьми коэффициентах вектора $\hat{c}_{8v} = (\hat{c}_{81}, \dots, \hat{c}_{88})$ с собственным значением ${}^u \lambda_{88}^2 = 0,8917$ содержится $\approx 90\%$ энергии процесса, рис 2. Координаты вектора \hat{c}_{8v} образуют зону фильтрации и сохраняются в процессе обработки. Величина ошибки при выполнении обратного ПКЛ равна ${}^u \varepsilon_{\min} = 0,1083$. Применяя к коэффициентам векторов \hat{c}_{7v} , и \hat{c}_{8v} скалярное стандартное восьмибитовое квантование, на их запись потребуется $M_T = 128$ бит. Эффективность сжатия (5) с нулевым значением ошибки $\varepsilon_{\min} = 0$ равна $\eta_T = 0,75$ или 75%.

Вычислив распределение вероятностей источника $P(c_{mn})$, находим величину энтропии $H(p) = 1,405$ бит/символ. Применяя известные методы энтропийного кодирования, находим затраты $H_c(p) = N^2 H(p) = 89,9$ бит на описание всего изображения. Реальное кодирование процесса (6) оптимальным кодом Хаффмена приводит к затратам $M_H = 96$ бит. Фактор сжатия

$\eta_H \cong 0,93$ или $\cong 93\%$. Сравнивая затраты на описание фрагмента, рис. 2, видно, что более эффективное описание реализовано с применением энтропийного подхода.

Обсуждение

На эффективность описания растровых пространственных данных ДЗ методом преобразований или энтропийного кодирования влияют: тип преобразований, размер фрагмента, корреляционные свойства фрагмента, распределение вероятностей источника данных. Для полигонов с большим количеством разных областей требуется большее число битов на пиксель. Вычислительная сложность метода преобразований значительно больше энтропийного. Для сильно коррелированных данных эффективность сжатия изображений методом преобразования значительно выше

Заключение

Особенности алгоритма точечного числового кодирования областей разных тематических категорий позволяют использовать как энтропийное, так и координатное кодирование для целей сжатия изображений однослойных полигонов. Основными критериями для выбора метода эффективного кодирования являются статистические характеристики изображения полигона, число и размеры разных областей, образующих полигон.

Список литературы

1. Chandra A.M. *Remote Sensing and Geographical Information System*. New Delhi: Narosa Publishing House; 2006.
2. Bartelme N. *Geoinformatik: Modelle, Strukturen, Funktionen*. Berlin: Springer-Verlag; 2005.
3. Jahne B. *Digital Image Processing. Concepts, Algorithms, and Scientific Applications*. Heidelberg: Springer-Verlag; 2013.
4. Прэрт У. *Цифровая обработка изображений*. М.: Мир; 1982.
5. Оппенгейм А., Шафер Р. *Цифровая обработка сигналов*. М.: Техносфера; 2006.
6. Яне Б. *Цифровая обработка изображений*. Москва: Техносфера; 2007.
7. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. New Jersey: Prentice Hall; 2002.
8. Mitsukhin A. *Efficient Description of the Boundary of the Object under Observation. Proceedings 59th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, www.db-thueringen.de/rsc/viewer/dbt_derivate_00039296/ilm1-2017iwk-018.pdf?page=6*.
9. Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л. *Алгоритмы: построение и анализ*. М.: Вильямс; 2009.