

УДК 004.932:504

О.Б. Дудинова<sup>1</sup>, С.Г. Удовенко<sup>2</sup><sup>1</sup> ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, dudinova16@gmail.ru;<sup>2</sup> ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, serhii.udovenko@nure.ua

## ГИБРИДНЫЙ МЕТОД СЖАТИЯ РАСТРОВЫХ ДАННЫХ В СИСТЕМЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Предложен метод сжатия растровых данных, основанный на комбинированном применении генетической оптимизации и фрактальных алгоритмов сжатия фотореалистических изображений, представленных с помощью квадродерева. Данный метод может быть использован для компьютерной обработки аэрофотоснимков в геоинформационных системах различного функционального назначения. Эффективность применения метода для обработки и архивации данных в ГИС-приложениях подтверждена результатами тестирования.

ФРАКТАЛЬНОЕ СЖАТИЕ, ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ, РАСТРОВЫЕ ДАННЫЕ, ГИС

### Введение

К основным задачам экологического мониторинга относятся оперативное получение пространственных данных, их хранение, обработка и представление.

Для представления пространственных объектов в геоинформационных системах экологического мониторинга (ГИСЭМ) используют пространственные и атрибутивные типы данных [1]. Под пространственными данными в общем случае понимают сведения, которые характеризуют местоположение объектов в пространстве относительно друг друга и их геометрию.

Пространственные объекты могут быть представлены с помощью таких графических объектов как точки, линии, области и поверхности. Дополнительные непространственные данные об объектах образуют набор атрибутов.

Атрибутивные данные - это качественные или количественные характеристики пространственных объектов, выражающиеся, как правило, в алфавитно-цифровом виде. Природа пространственных и атрибутивных данных различна, соответственно различны и методы хранения, ввода, редактирования, поиска и анализа для двух этих составляющих геоинформационной системы. Одна из основных идей, воплощенных в традиционных ГИС - сохранение связи между пространственными и атрибутивными данными, при их хранении и обработке. Для ГИСЭМ в промышленных регионах важными источниками информации являются следующие пространственные и атрибутивные данные: картографические данные (с указанием функционального использования территорий); данные о структуре энергопроизводства и энергопотребления регионов, источниках антропогенного загрязнения среды; данные, поступающие со стационарных постов экологического контроля, гидрометеорологических изменений; результаты пробоотборного анализа среды, аэрокосмического зондирования, медико-биологических и социальных исследований и т.п. При этом важным является не только накопление и визуализация данных мониторинга, но и создание

единого информационного пространства и предоставление широких возможностей системного анализа информации для эффективного управления качеством окружающей среды и обеспечения безопасности жизнедеятельности населения.

Для реализации основных задач ГИС используются специализированные программные продукты (как стандартные, так и оригинальные). В некоторых геоинформационных системах, таких как ARC/INFO, MGE программные модули (Image Analyst, Grid и т.п.) включаются непосредственно в состав системы. Однако работа с информацией о состоянии окружающей природной среды в таких программных модулях существенно отличается от более сложных процедур экологического анализа (прогнозирования развития текущей обстановки, оценки экологических рисков и т.п.). Поэтому при организации и функционировании ГИСЭМ можно выделить три уровня, различающихся по методам сбора, хранения обработки и анализа имеющейся экологической информации. Нижний уровень представляют модули первичной обработки пространственных и атрибутивных данных, средний - программное обеспечение, позволяющее провести системный (в том числе и пространственный) анализ информации о состоянии окружающей среды, а верхний уровень - программные модули для поддержки принятия управленческих решений. Информационное обеспечение экологического мониторинга должно обеспечивать ввод, хранение, обработку и представление данных, формируемых в процессе мониторинга. Речь идет о базах исходных данных натуральных наблюдений, картографических материалах, космических снимках различных типов, результатах аналитической обработки и проч. Перечисленные информационные ресурсы должны концентрироваться в хранилищах/банках данных, основанных на самых современных технологиях. Обычно предполагается создание развитых средств, интерфейсов доступа к рассматриваемой информации [2].

Пространственно-распределенные данные в базах данных геоинформационных систем могут быть представлены при помощи векторной или растровой

моделей. Растровая модель основана на хранении графической информации в виде матрицы или сети ячеек. Для привязки пиксела растрового изображения к пространственным координатам используется один из углов пиксела или его центроид. Разрешение изображения зависит от размера ячеек. Каждая ячейка растра имеет дискретные атрибуты. Растровые ГИС представляют природные феномены соответствующими ячейками матрицы. Примерами использования растровой модели в ГИС являются данные дистанционного зондирования и цифровые модели местности. Существенным недостатком растровых моделей следует считать использование большого объема памяти компьютера для хранения и обработки данных. Эта проблема частично решается путем хранения не полного растрового фрагмента, а его сжатой копии. В алгоритмах сжатия растровых данных широко используется представление ячеек растра в виде квадродерева, при этом графическое изображение последовательно делится на квадраты с одинаковым значением внутреннего атрибута. Вначале квадрат размером со всю карту делится на четыре квадранта (СЗ, СВ, ЮЗ, ЮВ). Если один из них однороден (т.е. содержит ячейки с одним и тем же значением), то этот квадрант записывается и больше не участвует в делении. Каждый оставшийся квадрант опять делится на четыре квадранта, опять СЗ, СВ, ЮЗ, ЮВ. Опять каждый квадрант проверяется на однородность. Все однородные квадраты записываются, и каждый из оставшихся делится далее и проверяется, пока вся карта не будет записана как множество квадратных групп ячеек, каждая с одинаковым значением атрибута внутри. Мельчайшим квадрантом является одна ячейка растра.

Целью настоящей работы является разработка и тестирование метода сжатия растровых данных, основанного на комбинированном применении генетической оптимизации и фрактальных алгоритмов сжатия фотореалистических изображений, представленных с помощью квадродерева.

### 1. Фрактальная модель растровых изображений

Пусть  $\Omega$  – пространство всех возможных растровых изображений (для простоты ограничимся изображениями в градациях серого). При этом под пространством  $\Omega$  будем понимать множество массивов  $M \times N$  пикселей, каждый из которых может принимать  $P$  значений (градаций серого):

$$0, \frac{1}{P}, \frac{2}{P}, \dots, \frac{P-1}{P},$$

которые соответствуют яркости в соответствующей точке.

Введём на пространстве изображений некоторую метрику  $\rho: \Omega^2 \rightarrow \mathbf{R}^+$ , позволяющую определять расстояния между изображениями и, соответственно,

оценивать погрешность кодирования. Для решения задач сжатия информации, как правило, используют квадратичную метрику следующего вида:

$$\rho_2(A, B) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (a_{ij} - b_{ij})^2}{N \cdot M}}, \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  – исходное и преобразованное изображения соответственно [3].

В настоящей работе будем использовать метрику (для удобства представленную логарифмической шкалой) PSNR (peak-to-peak signal-to-noise ratio), характеризующую отношение сигнала к шуму и связанную с метрикой (1) следующей зависимостью:

$$PSNR = -20 \lg \rho_2(A, B). \quad (2)$$

Оператор  $f: \Omega \rightarrow \Omega$  будем называть сжимающим, если он уменьшает расстояния между точками пространства:  $\forall A, B \in \Omega \rho(f(A), f(B)) \leq s \cdot \rho(A, B)$ , где  $s \in [0, 1)$  – коэффициент сжатия. В соответствии с теоремой Банаха о неподвижной точке существует единственная точка  $A_f \in \Omega$ , такая что  $f(A_f) = A_f$ , и  $\forall A_0 \in \Omega$ , причем последовательность  $A_n = f(A_{n-1})$  сходится к  $A_f$  при  $n \rightarrow \infty$ .

Таким образом, для того, чтобы закодировать изображение  $A \in \Omega$ , достаточно найти такое сжимающее отображение  $f$ , для которого  $f(A) \approx A$ , и тогда по  $f$  можно будет восстановить  $A_f \approx A$ .

В соответствии с теоремой Барнсли о коллаже, если  $\rho(f(A), A) \leq \varepsilon$ , то погрешность кодирования  $\rho(A_f, A) \leq \frac{\varepsilon}{1-s}$ , где  $s$  – коэффициент сжатия, соответствующий отображению  $f$ .

Будем искать отображение  $f$  как набор трёхмерных (две координаты определяют положение элементов изображения на плоскости и одна – их яркость) аффинных преобразований  $w_i, i = \overline{1, m}$ . Такое отображение называется системой итерируемых функций (СИФ) – преобразований одних областей изображения (доменных) в другие (ранговые). Для изображений в градациях серого аффинность означает изменение контрастности и смещение в яркости.

В общем случае аттрактор СИФ является фракталом, имеющим дробную размерность Хаусдорфа.

### 2. Алгоритмическая реализация метода сжатия

Метод основан на реализации следующих алгоритмических процедур.

1. Исходное изображение разбивается на 64 ранговых блока.

2. Для каждого рангового блока определяется максимально соответствующий ему (с точностью до линейного преобразования и поворота с отражением) доменный блок удвоенного размера.

3. Если такой блок найден, то ранговый и доменный блоки фиксируются в формируемом массиве, после чего процедура продолжается со следующего рангового блока (переход к пункту 2).

4. Если подходящий домен не найден (разница между уменьшенной копией домена и рангом слишком велика), то ранговый блок разбивается на четыре фрагмента и процедура продолжается (переход к пункту 2).

Примеры блочного представления исходного растрового изображения и соответствующего квадродерева приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

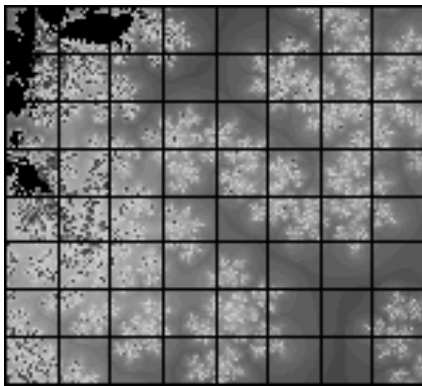


Рис. 1. Блочное представление исходного изображения

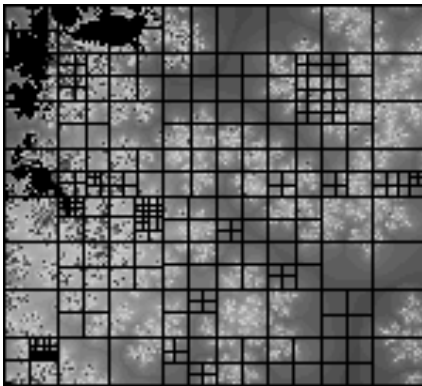


Рис. 2. Пример квадродерева

Метод квадродерева приводит к эффекту блочности декодированного изображения, однако его достоинством является простота программной реализации.

Наибольшие затраты времени для вычислительной процедуры, соответствующей методу квадродерева, связаны с поиском доменного блока на шаге 2.

В связи с этим возникает задача определения эффективного алгоритма поиска минимального элемента двумерного массива в пространства массивов, формируемых для фрактальной модели изображения с помощью квадродерева в процессе фрактального сжатия фотореалистичных изображений.

Наименьшее из расстояний между рангом  $R$  и приведенным к нему (уменьшенным до размеров ранга) доменом  $D$  может быть определено по следующей зависимости:

$$d(R, D) = \min_{a,b,k} \rho(a \cdot D_k + b - R), \quad (3)$$

где  $a$  – коэффициент контрастности;  $b$  – смещение в яркости;  $D_k, 1 \leq k \leq 8$  – возможные комбинации поворотов на углы, кратные прямому, и отражений доменного блока.

Коэффициенты  $a$  и  $b$  рассчитываются по методу наименьших квадратов. Если  $D^{(k)}$  не состоит из одинаковых пикселей, то

$$a = \frac{(D_k, e) \cdot (R, e) - (e, e) \cdot (D_k, R)}{(D_k, e) \cdot (D_k, e) - (D_k, D_k) \cdot (e, e)},$$

$$b = \frac{(D_k, e) \cdot (D_k, R) - (D_k, D_k) \cdot (R, e)}{(D_k, e) \cdot (D_k, e) - (D_k, D_k) \cdot (e, e)},$$

где  $e$  – блок, состоящий из одних единиц, а символ  $(\cdot)$  определяет скалярное произведение блоков как  $N \times N$ -мерных векторов. Если же все пиксели в  $D_k$  одинаковы, то  $a = 0, b = (R, e)$ .

Предполагая ранговый домен фиксированным, а доменный блок параллельным осям координат, получаем, что поиск подходящего домена соответствует минимизации функции двух переменных (координат верхнего левого угла домена). Если эта функция имеет большое количество экстремумов, то для ее минимизации целесообразно использовать генетический алгоритм (ГА), или его гибрид с одним из градиентных методов, т.к. генетические алгоритмы успешно используются для оптимизации многоэкстремальных функций.

Рассмотрим модифицированную схему ГА применительно к задаче фрактального сжатия. В качестве генотипа ГА примем вектор, компонентами которого будут пиксельные координаты области  $D_{j(i)}$  доменного блока и параметры, определяющие аффинное преобразование  $W_i$ . Существует 8 способов аффинного преобразования квадрата в квадрат (поворот на четыре стороны или зеркальное отражение и поворот на четыре стороны), следовательно, для кодировки этого преобразования достаточно трех бит. Функцию пригодности зададим в следующем виде:

$$\Phi = \frac{1}{1 + \sum ([f(\xi, \eta) - F_i(\xi, \eta)]^2 : (\xi, \eta) \in R_i \cap Z^2)}. \quad (4)$$

В знаменателе функции (4) под знаком суммы задается евклидово расстояние между исходным и преобразованным блоком. Данная функция удовлетворяет обязательному для ГА требованию неотрицательности и пригодна для реализации

оператора рулеточной селекции, в соответствии с которым каждый индивид  $\chi^{i,t}$  популяции  $P_t$  оказывается родителем при формировании очередной особи  $\chi^{i,t+1}$  популяции  $P_{t+1}$  с вероятностью, определяемой следующим отношением:

$$P_{select}(\chi^{i,t}) = \frac{\Phi(\chi^{i,t})}{\sum_j \Phi(\chi^{j,t})}. \quad (5)$$

При таком представлении хромосом, определяющих данный генотип, любой вектор пространства решений всегда допустим и имеет ненулевую пригодность. Оператор мутации для предлагаемого алгоритма соответствует суммированию координат доменного блока с нормально распределённой случайной величиной, а оператор кроссовера задаётся таким образом, чтобы координаты результирующей особи были случайно распределены в прямоугольнике между координатами  $X$  и  $Y$  двух исходных особей и располагались в среднем ближе к исходной особи с большим значением функции пригодности. Следует отметить, что недостатком данного метода сжатия является большой объем вычислений для кодирования изображений. Для программной реализации рассмотренного подхода можно применить как обычные методы увеличения скорости программ (целочисленная арифметика, ассемблерная реализация), так и некоторые специфические приемы (использование аффинных преобразований только одного типа, разбиение изображения на треугольные области  $R_i$ ).

В разработанном алгоритме фрактального сжатия предлагается использовать дополнительную процедуру, которая для класса фотореалистичных изображений может значительно уменьшить объем вычислений. Параметрами такой процедуры служат уровень потерь при кодировании и минимальный размер областей  $R_i$ . Эта процедура обеспечивает равномерное качество кодирования всего изображения.

Опишем ее основные этапы.

1. Выбираем допустимый уровень потерь  $\varepsilon$  при кодировании.

2. Задаем исходную область  $R_i = \Omega$  и определяем ее как необработанный фрагмент.

3. Пока есть необработанный фрагмент  $R_i$  выполняем этапы 4 и 5.

4. Найти  $D_{j(i)}$ ,  $W_i$  и  $F_i$ , которые наилучшим образом приближают  $R_i$  к оптимальному значению (на которых достигается минимум  $\sigma_{R_i}^2(W_i, D_{j(i)}, F_i)$ ).

5. Если  $\sigma_{R_i}^2(W_i, D_{j(i)}, F_i) < \varepsilon$  или размер  $R_i < \min$ , то определяем  $R_i$  как обработанный фрагмент. В противном случае, разбиваем  $R_i$  на более мелкие фрагменты и определяем их как необработанные.

### 3. Предиктивное кодирование сжимаемых изображений

Если алгоритм сжатия должен работать с полноцветными изображениями, состоящими из 3-х компонент (R, G и B), то необходимо рассматривать поток данных как три параллельных подпотока, для каждой из компонент соответственно. Этап предварительной обработки явно установлен в виде процесса межканальной декорреляции. Кроме того, предлагаемая дополнительная модификация отражает одну из особенностей использования контекстного моделирования, заключающуюся в определенном рода логическом разделении потоков данных, поступающих на вход кодера.

Предварительная обработка изображения, как правило, способствует улучшению характеристик потоков сжимаемых данных, что в свою очередь увеличивает итоговую степень сжатия. В качестве такой обработки обычно выступает процесс межканальной декорреляции, т.е. уменьшения взаимной корреляции между значениями компонент пиксела. Этот процесс может быть реализован при помощи перевода изображения из одного цветового пространства в другое.

В процессе межкомпонентной декорреляции в модифицированном алгоритме выбрано цветовое пространство YCbCr. Данный выбор был сделан, во-первых, на основании того, что преобразование между пространствами RGB и YCbCr является обратимым, и во-вторых, по результатам проведенных тестов, которые свидетельствуют о преимуществах применения данного преобразования по сравнению с пространствами RGB, YFbFg при необходимости достижения большей степени сжатия. За основу модифицированной предиктивной модели был принят существующий предиктор GAP, предложенный в алгоритме CALIC [4].

Данный алгоритм работает по следующему принципу. Если величина вертикального градиента больше горизонтального на некоторое пороговое значение, в данном случае 80, то считают, что в рассматриваемом участке изображения находится четко выраженное горизонтальное ребро, и поэтому предсказывают значение текущего пикселя равным значению левого пикселя. Аналогичным образом, если величина горизонтального градиента больше вертикального на 80, то предсказывают значение текущего пикселя равным значению верхнего пикселя. В противном случае предсказывают значение текущего пикселя с помощью обычного линейного предиктора, а затем, если разница градиентов достигла какого-либо другого порогового значения (32 или 8), то в качестве предсказанного значения принимается среднее взвешенное уже найденного значения и соответствующего пикселя с разными весами. Данный предиктор был модифицирован для достижения большей степени сжатия двумя способами [5].

Экспериментально были определены оптимальные значения граничных параметров, которые в оригинальном предикторе GAP установлены как 80/32/8. Найденные оптимальные значения равны соответственно 65/15/4. В зависимости от знака текущего градиента корректируется знак получаемой ошибки (если градиент отрицателен, то знак выходной ошибки инвертируется). Это позволяет частично выравнять спады на гистограмме распределения ошибок.

#### 4. Результаты тестирования

Разработанный в соответствии с предложенным подходом программный модуль, реализованный в среде Scilab, включает в себя программы фрактальной компрессии и декомпрессии статических изображений, представленных растровой моделью. На вход компрессора поступают оцифрованные квадратные изображения в градациях серого, а на выходе формируется файл, в котором отображается система итерируемых функций для входных изображений. Для тестирования разработанного модуля использовались пространственные данные из базы данных ГИС экологического контроля, представленные растровой моделью [6].

Результаты тестирования подтверждают перспективность предложенного метода для сжатия и архивации фотореалистичных статических изображений в ГИС-приложениях. Пример применения предложенного метода приведен на рис. 3 (тестовое затемненное изображение размером 256x256 пикселей в 256 градаций серого (рис. 3, слева) за 120 секунд было сжато с 64 до 15 кб с показателем PSNR 25.9 дБ. Декодированное изображение представлено на рис. 3, справа).

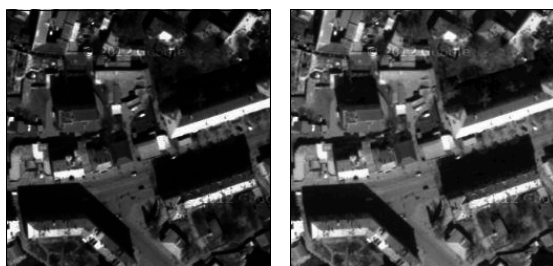


Рис. 3. Пример применения предлагаемого метода

#### Выводы

Применение рассмотренного метода фрактального сжатия изображений с использованием генетического алгоритма является перспективным для компрессии и декомпрессии растровых изображений. Усовершенствованный алгоритм предиктивного кодирования сравнивался с существующими форматами сжатия изображений (JPEG 2000 и JPEG-LS, PNG, а также со сжатием исходных изображений при помощи универсального архиватора WinRAR). Результаты тестирования подтвердили его преимущества в случае сжатия растровых изображений в ГИС-приложениях.

Метод может быть эффективно использован для компьютерной обработки аэрофотоснимков в ГИС различного функционального назначения. Перспективным развитием предлагаемого является рассмотрение задач его практического применения в ГИС экологического мониторинга для сжатия и архивации пространственно-распределенных данных.

**Список литературы:** 1. КуССуль, Н.М. Геоінформаційна інфраструктура моніторингу навколишнього середовища та надзвичайних ситуацій / Н.М. КуССуль, С.В. Скакун, А.Ю. Шелестов // Наука та інновації - 2010. - Том 6. - N 4. - С. 21-28. 2. Беляков, С.Л. Комбинирование картографических изображений / С.Л. Беляков // Информационные технологии. - 2005. - С. 36-43. 3. Удовенко, С.Г. Фрактальное сжатие информации в градациях серого с использованием модифицированного генетического алгоритма / С.Г. Удовенко, А.Н. Каракулов // Системи обробки інформації. - 2009. - Вип.1 (75). - С. 52-55. 4. Gonzalez, R.C. Digital Image Processing / R.C. Gonzalez, R.E. Wood // Prentice Hall. - 2008. - 954 p. 5. Удовенко, С.Г. Модифицированный метод предиктивного кодирования для сжатия графической информации / С.Г. Удовенко, А.А. Шамраев, Е.О. Шамраева, С.Д. Лукьяненко // Системи обробки інформації. - 2011. - Вип.5 (95). - С.115-119. 6. Удовенко, С.Г. Методы обработки картографических изображений / С.Г. Удовенко, А.А. Шамраев, Е.О. Шамраева // 23-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013). - Севастополь: Вебер, 2013. - С. 394-395.

*Поступила в редколлегию 15.05.2016*

УДК 004.932:504

**Гібридний метод стиску растрових даних в системі екологічного моніторингу** / О.Б. Дудинова, С.Г. Удовенко // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. - 2016. - № 1(86). - С.76-80.

У статті розглянуто метод стиску растрових даних, де використовується комбіноване застосування генетичної оптимізації та фрактальних методів стиску просторових зображень, представлених за допомогою квадродерев. Результати тестування підтверджують ефективність застосування методу для обробки та архівації даних в геоінформаційних системах.

Л. 3. Бібліогр.: 6 назв.

UDK 004.932:504

**A hybrid method of compression of raster data is in the system of the ecological monitoring** / O.B. Dudinova, S.G. Udovenko // Bionica Intellecta: Sci. Mag. - 2016. - № 1 (86). - P.76-80.

The method of compression of raster data, based on the combined application of genetic optimization and fractal methods of compression of the images, is considered in article. Testing results confirm efficiency of application of method for treatment and archiving of data in the geographic information systems.

Fig. 3. Ref.: 6 items.