

УДК 629.783

А. Х. СУЛТАНОВ, В. Х. БАГМАНОВ, И. К. МЕШКОВ, С. В. ХАРИТОНОВ

## МУЛЬТИМАСШТАБНАЯ КОМПРЕССИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Рассматривается методология компрессии широкополосных сигналов спутниковых систем связи, в основе которой лежит системная интеграция концепций мультимасштабного анализа сигналов. Данные концепции объединяют идеи квазинепрерывных разверток изображений типа Пеано–Гильберта, дискретных вейвлет-преобразований и фрактальных множеств. *Компрессия изображений; случайные процессы; фракталы; вейвлет-преобразование; спутниковые системы связи*

Сжатие сигналов осуществляется совокупностью преобразований, целью которых является переход от исходного сигнала к системе обобщенных координат, их фильтрации по определенному критерию, приводящему к сокращению числа исходных данных, и восстановлению сигнала с помощью обратных преобразований.

Одной из идей компрессии изображений является сжатие с помощью дискретных ортогональных преобразований, определенных на развертках двумерных областей [1].

Традиционным количественным критерием качества сжатия является энергетический критерий, связанный с оценкой восстановления сигнала по минимуму среднеквадратической ошибки. При решении ряда конкретных задач обработки данных спутниковых систем наблюдения, в частности, связанных с обнаружением редких аномальных сигналов, данный критерий не является адекватной мерой качества сжатия, так как аномальные сигналы дают малый вклад в общую энергию анализируемого изображения. В этой связи колмогоровский критерий аппроксимации сигналов по минимуму максимального отклонения является более эффективным. В общем случае при оценке качества сжатия необходимо учитывать как энергетику сигнала, так и минимальное отклонение.

В данной работе предлагается использовать для компрессии изображений квазинепрерывные развертки сигналов [2], вейвлет-преобразование квазинепрерывных разверток сигналов и использование для селекции вейвлет-коэффициентов свойства мультимасштабного самоподобия, связанного с

фрактальной структурой спутниковых изображений.

### 1. ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА РАЗВЕРТОК СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Базовой конструктивной идеей, лежащей в основе сжатия спутниковых изображений, является их принадлежность к классу фрактальных множеств. Как показали проведенные исследования, квазинепрерывные развертки являются фрактальными структурами, масштабное самоподобие которых определяется показателем Херста  $H$ .

Одним из методов определения фрактальной самоподобной структуры данных космических систем наблюдения (КСН), которые включают данные дистанционного зондирования Земли, планет Солнечной системы и астрофизических объектов, является анализ Фурье-спектров корреляционных функций.

В качестве альтернативного метода предлагается подход, основанный на анализе мультимасштабных структурных функций, определенных на квазинепрерывных рекурсивных развертках типа Пеано–Гильберта [2]. Развертки нужного масштаба представлены на рис. 1.

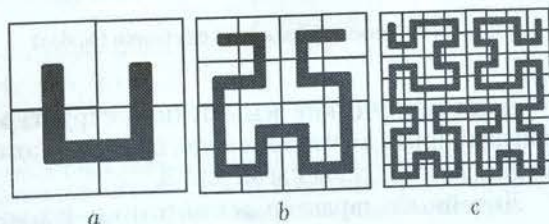


Рис. 1. Развертка Гильберта на разных масштабах:  $m = 1$  (a), 2 (b), 3 (c)

Развертку  $i$ -го порядка  $H_i$  можно получить из разверток  $H_{i-1}$  на основе рекурсивной схемы [2]:

$$\begin{aligned} \square \downarrow GU(i): & GR(i-1) \uparrow GU(i-1) \rightarrow GU(i-1) \downarrow GL(i-1) \\ \leftarrow GR(i): & GU(i-1) \rightarrow GR(i-1) \uparrow GR(i-1) \leftarrow GD(i-1) \\ \uparrow GD(i): & GL(i-1) \downarrow GD(i-1) \leftarrow GD(i-1) \uparrow GR(i-1) \\ \square \downarrow GL(i): & GD(i-1) \leftarrow GL(i-1) \downarrow GL(i-1) \rightarrow GU(i-1) \end{aligned}$$

где  $GU(i)$ ,  $GD(i)$ ,  $GL(i)$  и  $GR(i)$  — операторы поворотов вверх, вниз, влево и вправо соответственно.

Для определения показателя самоподобия использовались логарифмические асимптотики мультимасштабных структурных функций, определяемых в дискретном случае соотношением

$$S(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left( f_{(i+k)}^m - f_{(i)}^m \right)^2, \quad (1)$$

где  $M = 2^{2m}$ ,  $2^m \times 2^m$  — размер изображения,  $k$  — аргумент дискретной структурной функции;  $f_i^m$  — пиксели изображения масштаба  $m$ , полученные рекуррентно из изображения масштаба  $m+1$  на основе свертки по образующему элементу развертки Гильберта, показанному на рис. 1, а.



Рис. 2. Тестовое изображение спутника Landsat

Логарифмические асимптотики структурной функции для изображения, приведенного на рис. 2, представлены на рис. 3.

Линейный характер асимптотики позволяет по углу наклона определить показатель фрактального самоподобия Херста  $H$ .

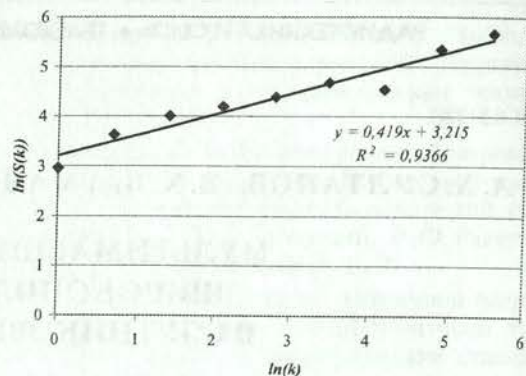


Рис. 3. Логарифмические асимптотики мультимасштабной структурной функции:  $y = 0,419x + 3,215$  — линия регрессии ( $y = \ln(S(k))$ ,  $x = k$ );  $R^2$  — величина достоверности аппроксимации (квадрат коэффициента смешанной корреляции)

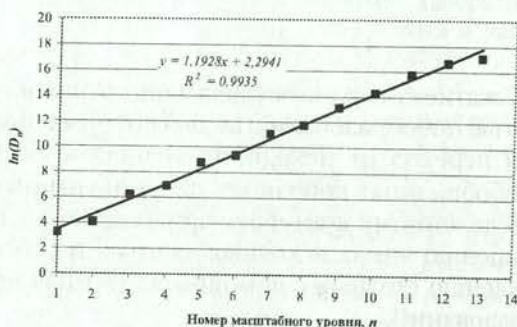


Рис. 4. Дисперсии масштабных уровней вейвлет-коэффициентов:  $y = 1,1928x + 2,2941$  — линия регрессии ( $y = \ln(D_n)$ ,  $x = n$ );  $R^2$  — величина достоверности аппроксимации (квадрат коэффициента смешанной корреляции)

## 2. МАСШТАБНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ ВЕЙВЛЕТ-КОЭФФИЦИЕНТОВ

Покажем, что коэффициенты вейвлет-разложения разверток спутниковых изображений удовлетворяют свойству масштабного самоподобия.

Пусть  $\xi(t)$  — случайная функция, описывающая развертку изображения (случайный фон). Предположим, что  $\xi(t)$  — фрактальная функция и, следовательно, допускает представление в форме интеграла по траекториям виперовского случайного процесса  $w(t)$ :

$$\xi(t) = \int_0^t (t-t')^{H-1/2} dw(t'). \quad (2)$$

Представим  $\xi(t)$  в виде вейвлетовского разложения

$$\xi(t) = \sum_j \sum_k d_{jk} \Psi_{jk}(t), \quad (3)$$

где  $\Psi_{jk}(t)$  — какая-либо система ортогональных вейвлетов.

Докажем следующее утверждение: коэффициенты вейвлет-разложения фрактальной функции являются масштабно-инвариантными случайными величинами.

Действительно, коэффициенты вейвлетовского разложения определяются соотношением

$$d_{kj} = \int_{-\infty}^{+\infty} \xi(t) \Psi_{jk}(t) dt, \quad (4)$$

$$\Psi_{jk}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \Psi(2^j t - k), \quad (5)$$

здесь  $\Psi(t)$  — вейвлет-функция.

Из (2) и (4) следует

$$d_{kj} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^t (t-t')^{H-1/2} \psi_{jk}(t) dw(t'). \quad (6)$$

Произведем в интеграле (6) замену переменных  $t = \tau \cdot 2^{-j}$ ,  $t' = \tau' \cdot 2^{-j}$  и, учитывая масштабные свойства винеровского гауссовского процесса, выражающиеся соотношением  $dw(at) = a^{1/2} dw(t)$ , можно получить представление

$$d_{kj} = 2^{-j(H+1/2)} \int \xi(\tau) \psi_{0,k}(\tau) d\tau. \quad (7)$$

Из соотношения (7) следует свойство масштабного самоподобия вейвлет-коэффициентов

тов

$$d_{j,k} = 2^{-j(H+1/2)} d_{0,k}. \quad (8)$$

Равенство (8) следует понимать в статистическом смысле, а именно: любые статистические моменты случайной величины  $d_{jk}$  на масштабном уровне  $j$  масштабно-самоподобны (самоаффинны) и выражаются через соответствующие моменты на некотором исходном масштабном уровне  $j = 0$ . В частности, для дисперсий, из соотношения (8) следует равенство

$$\langle d_{j,k}^2 \rangle = \langle d_{0,k}^2 \rangle / 2^{j(2H+1)}, \quad (9)$$

где  $\langle \rangle$  — знак усреднения по статистическому ансамблю.

Данные вычислительных экспериментов, проведенных с гильбертовскими развертками спутниковых изображений, показывают, что дисперсия вейвлет-коэффициентов удовлетворяет масштабному соотношению (9) (рис. 4).

### 3. КОМПРЕССИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Соотношение (9) показывает, что с ростом масштабного уровня вейвлет-разложения дисперсия, а следовательно, и общий информативный вклад в структуру сигнала уменьшается по степенному закону, показатель которого определяется показателем фрактального самоподобия Херста.

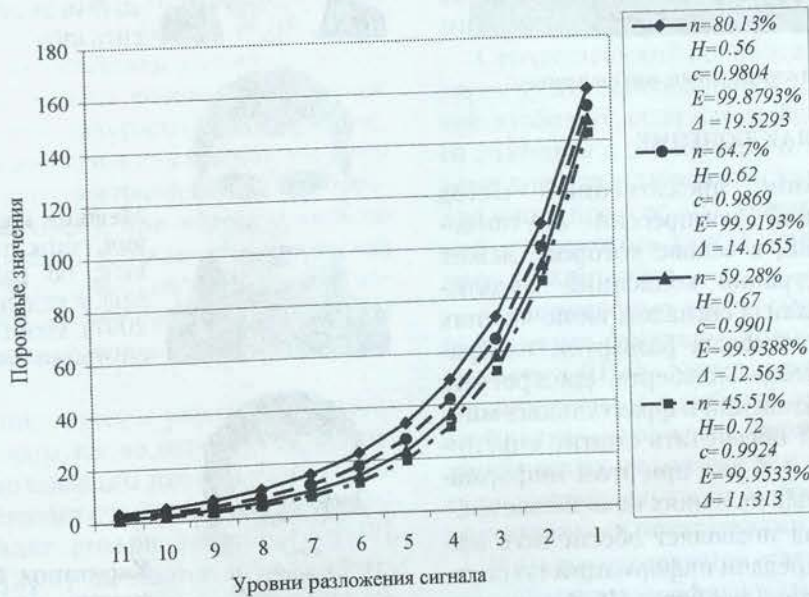


Рис. 5. Чувствительность порога отсечки WT-коэффициентов в зависимости от показателя Херста  $H$ , где  $n$  — процент коэффициентов, равных 0,  $H$  — показатель Херста,  $c$  — коэффициент корреляции исходного и синтезированного сигнала,  $E$  — сохраненная энергия восстановленного сигнала,  $\Delta$  — максимальное отклонения синтезированного сигнала

Данное свойство может быть использовано для установления порогов селекции WT-коэффициентов. На рис. 5 показана чувствительность порога отсечки WT-коэффициентов по отношению к точности определения показателя Херста  $H$ .

Коэффициент сжатия определяется как

$$scoef = \frac{100\%}{100\% - n\%}, \quad (10)$$

где  $n$  — процент коэффициентов, равных 0.

По полученным экспериментальным данным была осуществлена декомпрессия сигнала и восстановлено исходное изображение (рис. 6), которое при визуальном анализе сохраняет информацию об аномальных явлениях.

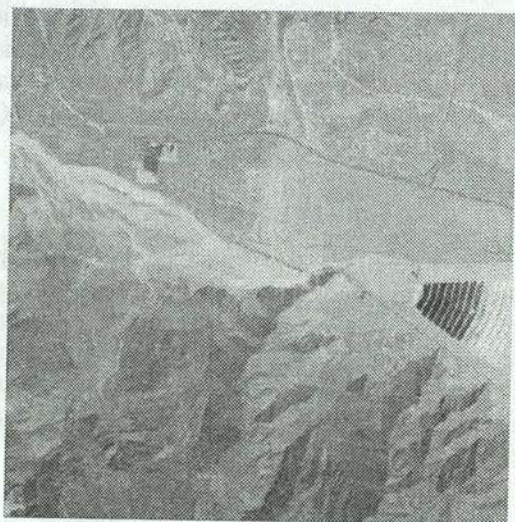


Рис. 6. Синтезированное изображение

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенный метод мультимасштабной компрессии спутниковых изображений, в основе которого лежит системная интеграция концепций мультимасштабного анализа сигналов, включающих идею квазинепрерывных разверток изображений типа Пеано–Гильберта, дискретных вейвлет-преобразований и фрактальных множеств, позволяет обеспечить сжатие спутниковых данных в 3–5 раз, при этом информация об аномальных явлениях не искажается.

Данный метод позволяет обеспечить щадящий режим передачи информации по спутниковому радиоканалу с борта ИСЗ на наземный пункт приема и обработки данных дистанционного зондирования Земли.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федосеев, В. А.** Компрессия изображений с помощью дискретных ортогональных преобразований, определенных на развертках двумерных сигналов / В. А. Федосеев // Компьютерная оптика. 2005. № 28. С. 132–135.
2. **Александров, Р. В.** Представление и обработка изображений: Рекурсивный подход / Р. В. Александров, И. Д. Горский. Л.: Наука, 1985. 102 с.
3. **Мальденброт, Б.** Фрактальная геометрия природы / Б. Мальденброт. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.

### ОБ АВТОРАХ



**Султанов Альберт Ханович**, проф., зав. каф. телеком. систем. Дипл. инж. по многоканальн. электросвязи (Новосиб. электротехн. ин-т связи, 1973). Д-р техн. наук по упр. в техн. сист. (УГАТУ, 1996). Иссл. в обл. телеком. систем, оптоэлектр. аэрокосм. систем.



**Багманов Валерий Хусаинович**, проф. той же каф. Дипл. физик (МГУ, 1975). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр-ю и обр. информ. (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. мат. моделирования и обраб. сигналов.



**Мешков Иван Константинович**, инж. той же каф. Дипл. инж. по радиосвязи, радиовещ. и телевидению (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. обработки спутниковых изображений.



**Харитонов Святослав Валериевич**, студ. УГАТУ. Обуч. по спец. «Многоканальные телекоммуникационные системы».