ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОЙ ИНТЕГРАЦИИ МУЛЬТИМАСШТАБНЫХ КОНЦЕПЦИЙ

В.Х. Багманов
Уфимский государственный авиационный технический университет

Аннотация

Предложен методологический подход к обработке и анализу данных оптических систем дистанционного зондирования Земли. Подход основывается на системной интеграции четырех концептуальных идей: фрактальных множеств; рекурсивных разверток; непрерывных вейвлет-преобразований; дискретных вейвлет-преобразований и позволяет повысить эффективность обнаружения аномальных сигналов в сложной фоноцелевой обстановке

Введение

В основе разрабатываемой информационной технологии обработки данных спутниковых систем наблюдения, целью которой в конечном итоге является обнаружение и оценка сигналов на случайном фоне, лежат несколько компламентарных конструктивных идей, связанных с понятием мультимасштабности. Основополагающим методологическим принципом мультимасштабных концепций и подходов является принцип последовательного уточнения или наоборот огрубления информации о чем-либо при переходе от крупного масштаба к мелкому или наоборот. Многомасштабный анализ дает возможность определить структурную организацию объекта исследования на уровне взаимосвязи частей и целого в процессе последовательного уточнения по мере продвижения вдоль "оси масштабов".

Разрабатываемая информационная технология с методологической точки зрения представляет собой интеграцию четырех мультимасштабных концепций: концепции фрактальных множеств (фракталов), концепции непрерывного вейвлет-анализа, концепции дискретного вейвлет-анализа и концепции рекурсивных разверток многомерных пространств.

Концепции мультимасштабного анализа сигналов

Концепция рекурсивных разверток состоит в редукции многомерных пространств в одномерные на основе взаимно однозначного соответствия, устанавливаемого с помощью заполняющих пространство кривых Пеано-Гильберта [1].

При построении рекурсивных разверток используется масштабное самоподобие, которое в данном конкретном случае заключается в итерационном применении одного и того же принципа построения на разных пространственных масштабах.

Суть подхода состоит в следующем. Пусть D^n - *n*-мерный гиперкуб. Произведем иерархическое разбиение области D^n на одинаковые ячейки (кванты) так, что каждая сторона гиперкуба будет разбита на *k* равных частей. Величина *k* называется основанием развертки. При этом гиперкуб будет разбит на k^n квантов. Обозначим кванты данного разбиения первого иерархического уровня через $q(i_1)$, *где* $i_1 = \overline{0, k^n - 1}$. Далее каждый квант первого уровня еще раз разобьем на k^n квантов. В результате получим разбиение на кванты второго уровня, которые обозначим через $q(i_1 i_2)$. Произведем процедуру разбиения m раз. В результате гиперкуб D^n будет разбит на кванты так, что образуется дискретное n-мерное пространство

$$D_m^n = \left\{ q(i_1 i_2 \ldots i_m) \quad i_l = \overline{0, k^n}, \, l = \overline{1, m} \right\},$$

состоящее из $N = k^{nm}$ квантов.

Любой точке $x \in D^n$, $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ однозначно будет соответствовать последовательность вложенных друг в друга квантов $q(i_1) \supset q(i_1 i_2) \supset \ldots \supset q(i_1 i_2 \ldots i_m)$, каждый из которых содержит точку *x*. Таким образом, каждый из k^{nm} квантов пространства D_m^n окажется пронумерованным и в системе исчисления с основанием k^n будет иметь номер, определяемый k^n-ичным числом

$$i_1 i_2 \ldots i_m = \sum_{l=1}^{m} k^{n(m-l)} \cdot i_l \, . \qquad (1)$$

С номером, определяемым выражением (1), может быть связана позиционная координата

$$g = \sum_{l=1}^{m} k^{-nl} \cdot i_l \, ,$$

определяющая положение некоторой точки в одномерной области $D_m^1 = [0,1)$ так, что кванту $q(i_1 \ldots i_m)$ будет соответствовать отрезок $\left[i_m k^{-nm}, (i_m + 1) k^{-nm} \right]$, принадлежащий кванту более высокого уровня $q(i_1 \ldots i_{m-1})$.

Если считать, что закон нумерации *Z(n,k)* квантов при первом разбиении совпадает с законом разбиения кванта $q(i_1 \ldots i_{m-1})$ на k^n квантов $q(i_1 \ldots i_m)$, то в результате будет получено взаимнооднозначное отображение многомерного пространства в одномерное

$$\varphi_m = D_m^n \to D_m^1 .$$

Отображение φ_m при заданном законе $Z(n,k)$ можно рассматривать как рекурсивную развертку многомерного пространства в одномерное.

Важным свойством рекурсивных разверток является их квазинепрерывность. Это свойство показывает, что две точки q_1 и q_2, близкие в пространстве D_m^1, имеют прообразы x_1 и x_2, близкие в D_m^1, так, что

$$\|x_1 - x_2\|_q \le k\left(2^q + n - 1\right)^{1/q} |q_1 - q_2|^{1/n} ,$$

где

$$\|x_q\| = \left[\sum_{i=1}^{n}\left(x^i\right)^q\right]^{1/q} ,$$

$$x_1 = \varphi_m^{-1}(q_1),$$

$$x_2 = \varphi_m^{-1}(q_2).$$

Свойство квазинепрерывности, переходящее при $m \to \infty$ в непрерывность, позволяет анализировать корреляционные свойства многомерных сигналов по их одномерным образам.

Концепция фрактальных множеств [2] - базовая конструктивная идея, лежащая в основе разрабатываемой информационной технологии. Фрактальное самоподобие, то есть статистическая однородность строения многообразий на различных пространственных масштабах, - ключ к описанию масштабно-инвариантных случайных структур с самых общих позиций. Основная функциональная роль данной концепции - моделирование фоноцелевой обстановки при решении задач обнаружения сигналов. Обзор работ в области использования фрактальных свойств изображений при обработке данных дистанционного зондирования можно найти в монографии [3]. В работе [4] проведены зкспериментальные исследования фрактальных свойств спутниковых изображений и установлено, что их квазинеприрывные развертки являются масштабно-инвариантными структурами. Методология синтеза оптимальных и квазиоптимальных фильтров для оценки сигналов на фоне помех, имеющих стохастическую масштабно-инвариантную структуру изложена в работе [5].

Механизм формирования космических изображений обуславливается либо процессом рассеивания, либо процессом излучения электромагнитных волн поверхностями различного рода объектов. Статистические характеристики изображений в конечном итоге определяются статистическими характеристиками неровностей поверхностей наблюдаемых объектов. Неровности поверхностей формируются под воздействием большого числа случайных факторов, связанных с различными механизмами (техническими, тепловыми и так далее).

Для описания статистической структуры изображений используются различные модели рассеивающих или излучающих поверхностей от одномасштабных, имеющих в среднем одинаковый масштаб неровностей, до многомасштабных (двух и более). Одномасштабные поверхности характеризуются одним превалирующим радиусом корреляции, многомасштабные - несколькими. С ростом числа масштабов описание усложняется.

Выходом из ситуаций подобного рода является идея фрактально-самоподобной структурной организации природных образований.

Пусть $\xi(x)$ - развертка изображения. Будем считать, что $\xi(x)$ является суперпозицией иерархических уровней i, каждый из которых соответствует некоторому пространственному масштабу, определяемым соответствующим радиусом корреляции

$$\xi(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \xi_i(x). \tag{2}$$

Каждому иерархическому уровню i соответствует определенная статистическая упорядоченность, характеризуемая корреляционной функцией $\langle \xi_i(x_1)\xi_i(x_2)\rangle$. Предположим, что корреляции на уровне i являются гауссовскими

$$\langle \xi_i(x_1)\xi_i(x_2)\rangle = \sigma_i \exp\left[-\frac{(x_1 - x_2)^2}{\rho_i^2}\right], \tag{3}$$

где σ_i - дисперсия, ρ_i - радиус корреляции.

Радиусы корреляции ρ_i определяют масштаб (размер) зоны влияния $\xi_i(x)$ компонента. В соответствие с общей идеей масштабной инвариантности многоуровневых релаксационных процессов, можно предположить, что величины σ_i и ρ_i в зависимости от масштабного уровня i подчиняются скейлинговым законам

$$\sigma_k = \frac{\sigma_0}{a^k} , \tag{4}$$

$$\rho_k = \rho_0 \cdot b^k . \tag{5}$$

Для целого ряда природных процессов с иерархической организацией наблюдается разграничение зон влияния на разных уровнях так, что можно предположить справедливость соотношения

$$\rho_{i-1} << \rho_i << \rho_{i+1} ,$$

из которого следует независимость разномасштабных корреляций

$$\langle \xi_i(x_1)\xi_j(x_1)\rangle = 0, \quad i \ne j .$$

В соответствие с выражениями (2)-(5) корреляционная функция представляется в виде

$$\left\langle \xi(x_1)\xi(x_2) \right\rangle = \sum_{i=0}^{\infty} \sigma_i \exp\left[-\frac{(x_1 - x_2)^2}{\rho_i^2} \right]. \quad (6)$$

Если преобразовать сумму в правой части (6) в интеграл и учесть скейлинговые законы поведения параметров ρ_i и σ_i, получим представление

$$\left\langle \xi(x_1)\xi(x_2) \right\rangle \cong \sigma_0 \int_0^{\infty} \exp(-xp)\exp\left(-\frac{(x_1 - x_2)^2}{\rho_0^2} \exp(-xy) \right) dx$$

Асимптотически оценка данного интеграла при $x_1 - x_2 = \rho \to \infty$ имеет вид

$$\left\langle \xi(x_1)\xi(x_2) \right\rangle \underset{|x_1 - x_2| \to \infty}{\approx} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-\alpha},$$

где $\alpha = \ln a / \ln b$.

Степенной характер поведения асимптотически корреляционной функции связывается с фрактальной структурой многообразия.

Концепция непрерывных вейвлет-преобразований [6] в разрабатываемой технологии используется как математическая основа анализа аномальной структуры сигналов по отношению к окружающему фону. Данную технику можно считать некоторым расширением техники Фурье-преобразований и Фурье анализа. Непрерывный вейвлет-анализ, состоящий в разложении сигналов по функциям, хорошо локализованным как в пространственной, так и частотной областях, имеет большую по сравнению с Фурье-анализом возможность в выявлении структурных особенностей сигналов. Действительно, Фурье-анализ сигналов производится с помощью функций, имеющих наилучшую δ-образную локализацию в частотной области (импульсном пространстве) и очень плохо локализованных в пространственной области. Непрерывный вейвлет-анализ в данном аспекте представляет собой компромиссное решение, так как производится на основе разложения сигналов по функциям, похожим по форме на волновые пакеты - всплески, хорошо локализованным как в пространственной, так и в частотной областях. Помимо этого, если преобразование Фурье взаимно однозначно осуществляет отображение функции одного переменного *f(x)* в фурье-образ $\widehat{f}(w)$, также являющейся функцией одного переменного, то непрерывное вейвлет-преобразование производит отображение функции *f(x)* на плоскость, то есть преобразует одномерный сигнал в двумерный *Wf(a,x)*. Непрерывное вейвлет-преобразование, как отображение (переход) от одномерного координатного представления *x* к двумерному в масштабно-координатную плоскость *(a,x)*

$$\{x\} \to \{a, x\},$$

имеет огромную информационную избыточность, расширяющую функциональные возможности данного вида преобразования по сравнению с преобразованием Фурье при анализе сигналов, в особенности нестационарных.

Кроме отмеченных выше фактов, непрерывное *WT* производится на основе идеи масштабной инвариантности с помощью разложения сигналов по функциям - вейвлетам вида

$$\frac{1}{a}\Psi\left(\frac{x-b}{a} \right),$$

образуемым из исходного материнского вейвлета $\Psi(x)$ с помощью аффинных преобразований

$$x \to \frac{x-b}{a},$$

где b - параметр сдвига, a - масштабный параметр сжатия пространства.

Разложение по самоподобным (самоаффинным) функциям математически наиболее адекватно соответствует представлению сигналов, обладающих самоподобной мультимасштабной структурой, то есть сигналов, обладающих свойствами фрактальных многообразий.

Концепция дискретных вейвлет-преобразований, возникновение которых связано с именем Добеши [6], в разрабатываемой технологии используется как весьма эффективный, с точки зрения сложности вычислений, математический аппарат цифровой обработки сигналов, основанный на идее разложения по самоафинным функциям. Несмотря на то, что непрерывное и дискретное *WT* имеют общий генезис, тем не менее, принципиальное отличие состоит в следующем. Непрерывное вейвлет-преобразование является информационно избыточным, поскольку переводит одномерный сигнал в двумерный. Дискретное *WT* наоборот является наиболее экономным представлением сигналов, поскольку для дискретного сигнала, заданного двумерным массивом *NxN*, в процессе преобразований разложения и свертки требуется линейное число операций *O(αN)*, в то время как быстрое Фурье-преобразование имеет сложность *O(N log N)*. Дискретное вейвлет-преобразование является наиболее экономным представлением сигналов, делающим его эффективным средством цифровой обработки, превосходящим быстрое преобразование Фурье.

Мультимасштабное обнаружение сигналов неизвестной формы

Мультимасштабная структура данных, допускающая представление в виде суммы по масштабному иерархическому индексу вида (2), имеет особенность в отношении корреляционных свойств. Данную особенность можно сформулировать в виде следующего утверждения.

Утверждение. Если случайный процесс допускает мультимасштабное представление (2), так что

$$\left\langle \xi_i(x)\xi_j(y)\right\rangle = \delta_{ij}, \qquad (7)$$

то межмасштабные корреляции доминируют над внутримасштабными корреляциями.

Под представлением процесса (2) на масштабном уровне m понимается представление (масштабная аппроксимация)

$$\xi^{(m)}(x) = \sum_{i=-\infty}^{m} \xi_i(x).$$

Межмасштабные корреляции, т.е. корреляции между представлениями процесса на уровнях m и m+1 в силу условия (7) имеют вид

$$\left\langle \xi^{(m)}(x)\cdot \xi^{(m+1)}(x)\right\rangle = \sum_{i=-\infty}^{m}\left\langle \xi_i^2(x)\right\rangle.$$

Внутримасштабные корреляции определяются корреляционной функцией $\left\langle \xi^{(m)}(x)\xi^{(m)}(x+\Delta x)\right\rangle$, которая в соответствие с условием (7) равна

$$\left\langle \xi^{(m)}(x)\xi^{(m)}(x+\Delta x)\right\rangle = \sum_{i=-\infty}^{\infty}\left\langle \xi_i(x)\xi_i(x+\Delta x)\right\rangle.$$

В силу неравенства Коши-Шварца [7]

$$\left\langle \xi_i(x)\xi_i(x+\Delta x)\right\rangle \le \left\langle \xi_i^2(x)\right\rangle,$$

что и доказывает утверждение о доминировании межмасштабных корреляций над внутримасштабными, то есть

$$\left\langle \xi^{(m)}(x)\cdot \xi^{(m+1)}(x+\Delta x)\right\rangle = \left\langle \xi^{(m)}(x)\cdot \xi^{(m)}(x+\Delta x)\right\rangle. \qquad (8)$$

Данное утверждение определяет структурную особенность алгоритмов обработки, основанных на использовании корреляционных свойств данных, например, в задачах обнаружения аномальных сигналов. Особенность состоит в том, что в силу неравенства (8) алгоритмы, основанные на межмасштабных корреляциях, более эффективны по сравнению с алгоритмами на основе внутримасштабных корреляций.

Одним из факторов, стимулирующих исследования в области развития технологий обработки данных космических систем наблюдения, является обнаружение сигналов неизвестной формы. В качестве априорной информации используются данные о характерных масштабах (размерах объекта или аномального явления). Перевод проблемы обнаружения в пространство вейвлетовских коэффициентов позволяет повысить эффективность обнаружения в случае выбора оптимальной системы вейвлетовских функций. Данный вопрос детально рассмотрен в работе [8].

Рассмотрим мультимасштабное обнаружение сигналов на основе дискретных *WT*.

Используя модель смеси сигнала и шума:

$$z(t) = \xi(t) + n\,s(t),\ \ n = 0,1,$$

где $z(t)$ - реализация, $\xi(t)$ - фрактальный шум, $s(t)$ - сигнал, и переводя, проблему обнаружения в область *WT* коэффициентов найдем:

$$d_{j,k}(z) = d_{j,k}(\xi) + n\,d_{j,k}(s),$$

$$\left\| \xi - \hat{\xi} \right\| = \left\| d_{j,k}(\xi) - \hat{d}_{j,k}(\xi) \right\|.$$

Для отношение правдоподобия L можно получить следующее выражение:

$$L = \frac{\omega\left(d_{j,k}, H(n=1)\right)}{\omega\left(d_{j,k}, H(n=0)\right)} = \exp\frac{2d_{j,k}(s)d_{j,k}(z) - d_{j,k}^2(s)}{\left\langle d_{j,k}^2\right\rangle},$$

Статистическая оценка по максимуму правдоподобия будет иметь вид:

$$\hat{d}_{j,k}(s) = \arg\max_{d_{j,k}(s)}(L),$$

где $\omega\left(d_{j,k}, H(n=1)\right)$ - функция распределения $d_{j,k}$ при гипотезе *H(n=1)* (присутствие сигнала в реализации), $\omega\left(d_{j,k}, H(n=0)\right)$ - функция распределения $d_{j,k}$ при гипотезе *H(n=0)* (сигнал отсутствует).

При использования для обнаружения сигналов критерия Неймана-Пирсона для *WT* коэффициентов будет справедливо пороговое соотношение:

$$d_{j,k}(s) = Th\left[d_{j,k}(z)\right] = \begin{cases} 0, & q < q_n \\ d_{j,k}(z), & q \ge q_n \end{cases},$$

где q-параметр обнаружения на масштабном уровне j, определяемый соотношением:

$$q = \frac{\left| d_{j,k}(z)\right|}{\left\langle d_{j,k}^2(z)\right\rangle^{1/2}},$$

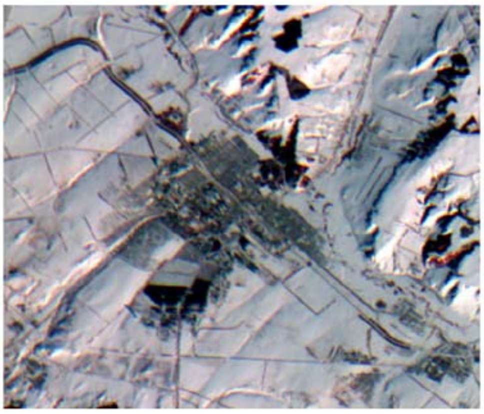
q_n - порог обнаружения определяемы соотношением:

$$p_{nc} = \Phi\left[\Phi^{-1}(1 - p_{лт}) - q_n\right],$$

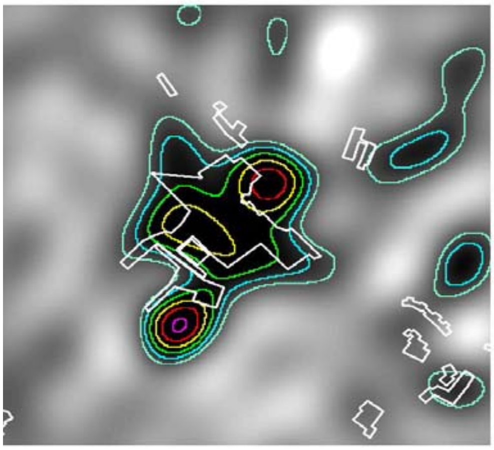
$\Phi(x)$ - интеграл вероятности, p_{nc} - вероятность пропуска сигнала, $p_{лт}$ - вероятность ложной тревоги.

Заключение

В работе изложены концептуальные, методологические и теоретические основы информационной технологии обработки данных спутниковых систем наблюдения. Подход базируется на системной интеграции мультимасштабных концепций: фрактальных множеств, квазинепрерывных разверток, непрерывного и дискретного вейвлет-анализа. Подход позволяет повысить эффективность обнаружения сигналов в условиях априорной неопределенности.



а)



б)

Рис.1. Обнаружение скрытых сигналов неизвестной формы на основе мультимасштабной селекции. Условия обнаружения: отношение сигнал/шум (s/n<1), соотношение масштаб аномалии/пространственное разрешение L/R >> 1, L=2 км, спектральный диапазон 0,5-1,1 мкм. Исходные данные (а): КА “Ресурс-01” МСУ-Э (R=45 м), территория г.Туймазы РБ. Выходные данные (б): оптическая плотность газоаэрозольного загрязнения атмосферы

Данный подход был апробирован при обнаружении скрытых атмосферных загрязнений на спутниковых изображениях в условиях малого отношения сигнала к шуму (Рис.1).

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта INTAS № 04-77-7198.

Литература

1. Александров Р.В., Горский И.Д. Представление и обработка изображений: Рекурсивный подход // Л.: Наука, 1985. 102 с.
2. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы // М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
3. Потапов А.А., Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки // М.: Университетская книга, 2005. 848 с.
4. Багманов В.Х., Султанов А.Х., Мешков И.К. Экспериментальное исследование масштабно-инвариантной структуры данных спутниковых систем наблюдения // Материалы 6-ой МНТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа, 2005. С.96-98.
5. Багманов В.Х., Султанов А.Х. Синтез фильтров для обработки изображений с фрактальной структурой // Компьютерная оптика, Самара-Москва, 2005. Вып. 28. С. 156-159.
6. Дремин И.М., Иванов У.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // УФН, 2001. Т.171. №5. С 465-501.
7. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника // М.: Радио и связь, 1982. 624с.
8. Багманов В.Х. Мультимасштабный подход к фильтрации сигналов с фрактальной структурой на основе вейвлет-преобразований // Вестник УГАТУ, Уфа, 2004. Том 5, №2 (10). С. 209-212.

Information technology of remotely sensed optical image analysis on the basis of multiscale conceptions integration

V.K. Bagmanov[1]
[1]*Ufa State Aviation Technical University*

Abstract:

A methodological approach is proposed to process and analyze the data from optical systems for remote sensing of the Earth. The approach is based on the systemic integration of four conceptual ideas: fractal sets; recursive expansions; continuous wavelet transforms; discrete wavelet transforms and allows to improve the efficiency of detection of anomalous signals in a complex target environment.

Keywords: Remotely Sensed Optical Image Analysis, remote sensing of the Earth, continuous wavelet transforms, fractal sets, recursive expansions

Citation: Bagmanov VK. Information technology of remotely sensed optical image analysis on the basis of multiscale conceptions integration. Computer Optics 2006; 29: 122-126.

Acknowledgements: This work was supported by grant INTAS No. 04-77-7198.

References:

[1] Alexandrov VV, Gorsky ND. Image representation and processing: A recursive approach. Dordrecht, Netherlands: Springer; 1993. ISBN: 978-94-010-4766-1.
[2] Mandelbrot BB. The fractal geometry of nature. New York: W.H. Freeman and Co; 1982. ISBN: 978-0-7167-1186-5.
[3] Potapov AA. Fractals in radio physics and radio location: sampling topology [In Russian]. Moscow: "Universitetskaya Kniga" Publisher; 2005.
[4] Bagmanov VH, Sultanov AH, Meshkov IK. Experimental study of scale-invariant data structure of satellite surveillance systems [In Russian]. Proceedings of the 6th Conference "Problems of Technique and Technology of Telecommunications" 2005: 96-98.
[5] Bagmanov VH, Sultanov AH. Synthesis of filters for image processing with fractal structure. Computer Optics 2005; 28: 156-159.
[6] Dremin IM, Ivanov OV, Nechitailo VA. Wavelets and their uses. Phys Usp 2001; 44: 447-478. DOI: 10.1070/PU2001v044n05ABEH000918.
[7] Tikhonov VI. Statistical radio engineering [In Russian]. Moscow: "Radio i Svyaz" Publisher; 1982.
[8] Bagmanov VH. Multiscale approach to filtering signals with a fractal structure based on wavelet transforms [In Russian]. Vestnik UGATU 2004; 5(2:10): 209-212.