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

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

состоящее из $N = k^{nm}$ квантов.

Любой точке $x \in D^n, \, x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ однозначно будет соответствовать последовательность вложенных друг в друга квантов $q(i_1) \supset q(i_1 i_2) \supset \dots \supset q(i_1 i_2 \dots i_m)$, 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

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

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 $q(i_1 \dots i_m)$ будет соответствовать отрезок $\left[i_m k^{-nm}, (i_m + 1) k^{-nm} \right]$, принадлежащий кванту более высокого уровня $q(i_1 \dots i_{m-1})$.

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

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

где

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

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

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

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 $\left\langle \xi_i(x_1)\xi_i(x_2) \right\rangle$. Предположим, что корреляции на уровне i являются гауссовскими

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

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

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

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

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

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:

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

Статистическая оценка по максимуму правдоподобия будет иметь вид:

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

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

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

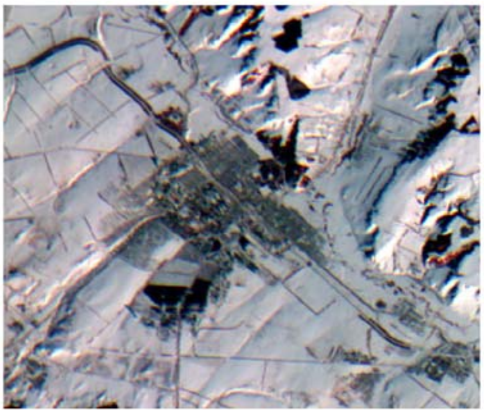
q_n - порог обнаружения определяемы соотношением:

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

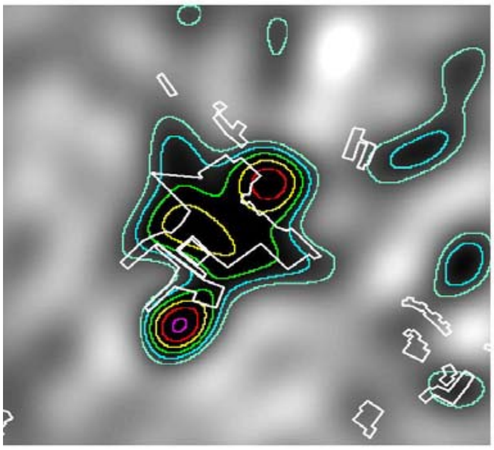
$\Phi(x)$ - интеграл вероятности, p_{nc} - вероятность пропуска сигнала, $p_{лт}$ - вероятность ложной тревоги.

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.