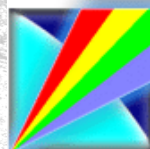
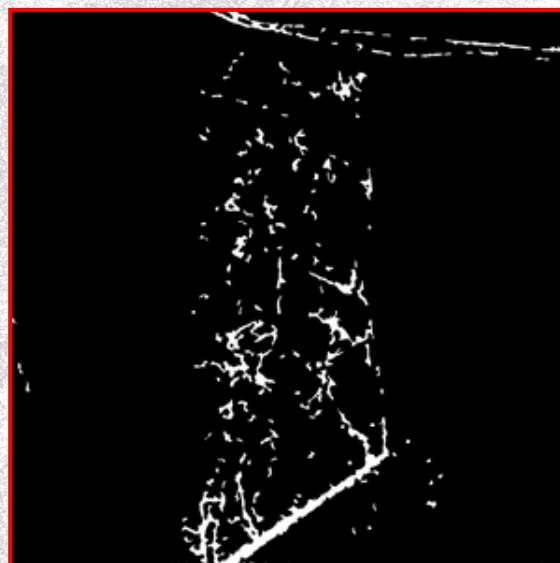
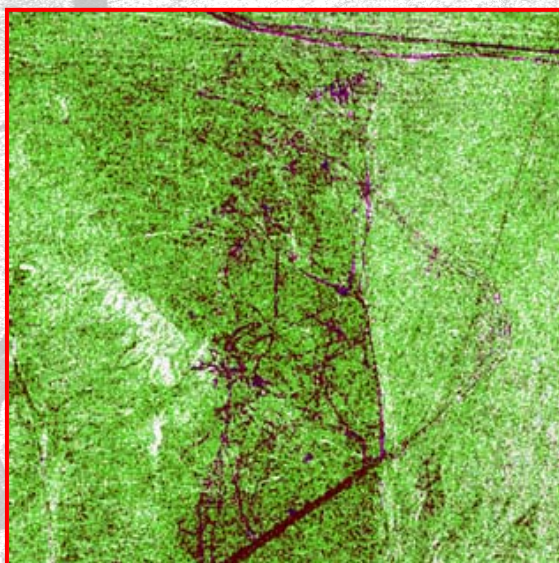


Описание модулей PHOTOMOD Radar
Программные средства для обработки данных РСА



**Описание программы
выявления изменений
когерентности**



Описание алгоритмов лежащих в основе программы выявления изменений

Номер версии документа: 1.2009-06-22

Настоящий документ содержит некоторые теоретические сведения, лежащие в основе программы выявления изменений, входящей в состав программного пакета PHOTOMOD Radar.

УВЕДОМЛЕНИЕ О КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ

Настоящий документ содержит описание алгоритмов и программного обеспечения, относящееся к разряду конфиденциальной информации. По этой причине, ни этот документ, ни любая его часть не могут быть использованы без письменного согласия авторов документа.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	15-3
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ	15-4
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	15-5
СОВМЕЩЕНИЕ СНИМКОВ	15-5
ВЫЧИСЛЕНИЕ КОГЕРЕНТНОСТИ	15-10
ФИЛЬТРАЦИЯ КОГЕРЕНТНОСТИ	15-12
Некогерентное накопление	15-12
Усредняющий фильтр	15-12
Медианный фильтр	15-12
ВЫЯВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ	15-13
Выявление по интенсивности	15-13
Выявление по когерентности	15-13
Пороговая классификация	15-13
Итеративная классификация	15-14
ГЕОКОДИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ИЗМЕНЕНИЙ	15-16
ФИЛЬТРАЦИЯ МАТРИЦЫ ИЗМЕНЕНИЙ	15-17
Пространственная фильтрация	15-17
Удаление малых деталей	15-17
Морфологическая фильтрация	15-18
ВЕКТОРИЗАЦИЯ	15-19



Введение

В настоящем документе описывается методика выявления изменений на поверхности Земли, произошедших за период между двумя радиолокационными съемками из космоса, по паре полученных комплексных радиолокационных снимков. Если исходные снимки получены при одинаковой геометрии съемки, но в различные моменты времени, то их совместный анализ позволяет выявить участки подстилающей поверхности, подвергшиеся за период между съемками изменениям, и оценить количественно интенсивность этих изменений. Поскольку характер обратного рассеяния излучаемого радиолокационного сигнала существенно зависит от геометрии подстилающей поверхности в масштабе рабочей длины волны (характерная рабочая длина волны космического РСА составляет от 3 до 20 сантиметров), потенциально имеется возможность выявить изменения вплоть до миллиметрового масштаба.

Поскольку РСА является когерентным датчиком, выявление изменений можно производить как по интенсивности (англ.incoherent change detection), так и по когерентности (англ.coherent change detection). Совместный анализ интенсивности на двух снимках позволяет оценить изменение мощности обратного рассеяния за период между съемками. Анализ когерентности, вычисленной по результатам совместной обработки снимков, показывает изменения, произошедшие как в интенсивности, так и в фазе отраженного сигнала. Изменение пространственного положения отдельных элементарных отражателей за период между съемками внутри ячейки разрешения приводит к падению когерентности. Поэтому, анализ когерентности позволяет выделить даже незначительные изменения пространственного масштаба нескольких долей ячейки пространственного разрешения РСА, которые практически невозможно выявить анализом интенсивности.

Современные РСА дают снимки высокого пространственного разрешения и позволяют оперативно получать целые временные серии снимков на интересующий район. Это дает возможность не только отслеживать мелкомасштабные изменения, но и строить целые временные тренды интенсивности изменений.

Выявление изменений происходящих на поверхности Земли имеет большое прикладное значение, поскольку позволяет производить мониторинг таких процессов как вырубка леса, прирост растительного покрова, сельскохозяйственная обработка почвы, изменение береговой линии, разливы, при определенных условиях – следы движения транспортных средств.



Последовательность операций обработки

Методика выявления изменений на подстилающей поверхности по радиолокационным снимкам состоит в последовательном выполнении нескольких этапов обработки. Диаграмма, иллюстрирующая методику обработки, представлена на рисунке ниже (Рис. 1). Более детальное описание каждого этапа приводится в следующих разделах.

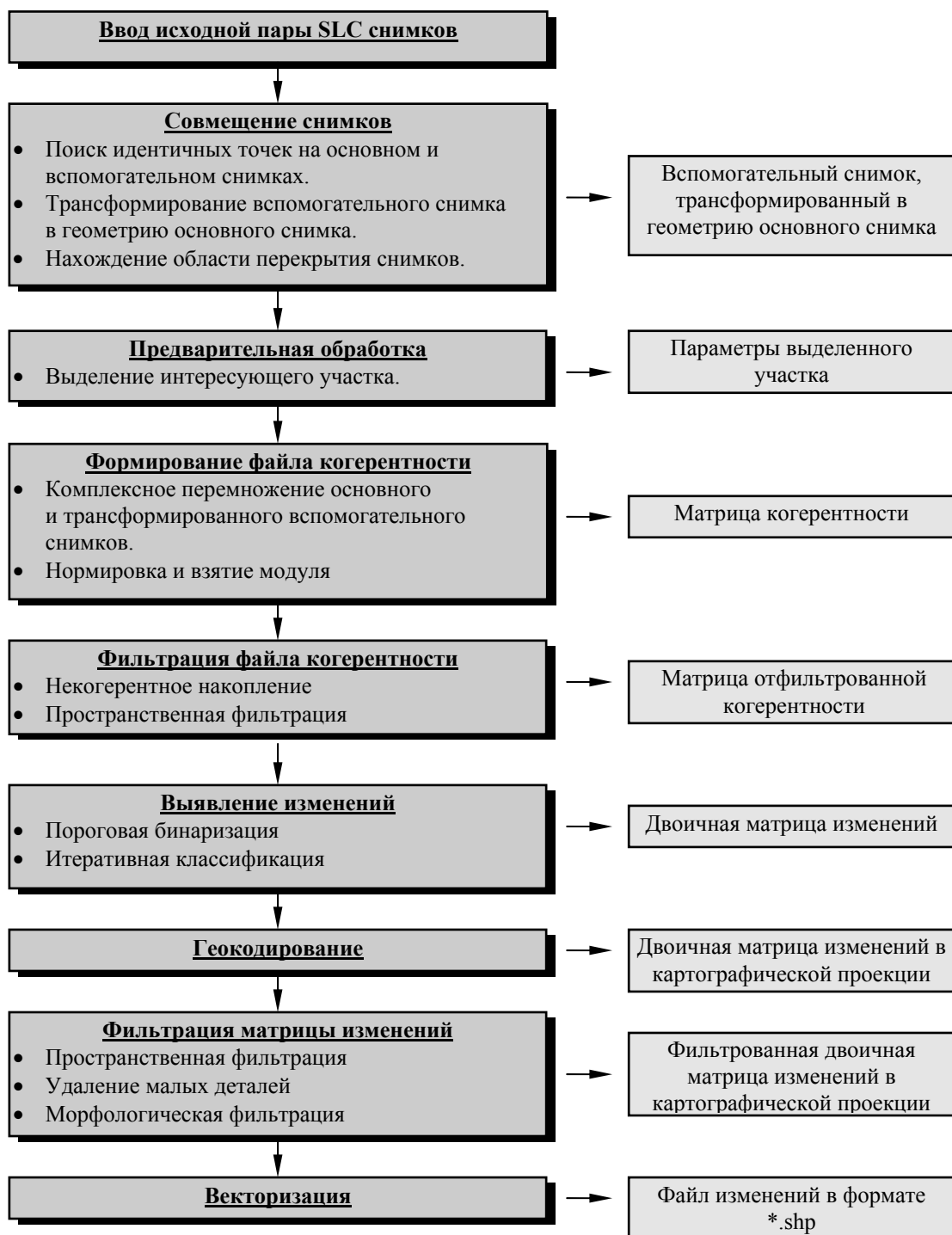


Рис. 1. Основные операции методики выявления изменений по интерферометрической паре снимков космического РСА.



Исходные данные

Исходными данными описываемой методики выявления изменений на подстилающей поверхности является пара комплексных радиолокационных снимков (тип продукта SLC) на один и тот же район, полученных при одинаковой геометрии обзора (разница в углах визирования менее 0.5 градуса) в различные моменты времени (интерферометрическая пара). Один из снимков условно принимается за основной, а второй за вспомогательный.

Совмещение снимков

Полученные по результатам съемки снимки I_1 и I_2 интерферометрической пары пространственно совмещаются, то есть между точками снимков устанавливается взаимнооднозначное соответствие, при котором точка первого снимка и соответствующая точка второго снимка отвечают одной и той же точке подстилающей поверхности. Целью такой операции является координатная привязка и геометрическая коррекция вспомогательного снимка по отношению к основному. Поскольку снимок РСА представляет собой изображение проекции трехмерной подстилающей поверхности на плоскость «наклонная дальность – азимут», положение образа точки подстилающей поверхности на снимке в общем случае зависит от высоты этой точки. В случае интерферометрической съемки, величина этого эффекта имеет порядок десятой доли размера пикселя, что обусловлено очень малой разницей в углах наблюдения во время съемок (доли градуса). Поэтому при совмещении снимков подстилающую поверхность считают совпадающей с земным эллипсоидом и соответствие между координатами точек на снимках ищут в классе гладких полиномов. Предполагается, что взаимнооднозначное соответствие между точками снимков I и I' устанавливает аффинное преобразование:

$$\begin{aligned} x' &= a_{11}x + a_{12}y + b_1 \\ y' &= a_{21}x + a_{22}y + b_2, \quad a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12} \neq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Пусть для определенности x – координата наклонной дальности до цели, а y – координата азимута цели. Параметр a_{11} описывает масштабирование по направлению наклонной дальности одного снимка относительно другого. Это масштабирование обусловлено различием в пространственном положении РСА во время съемок и возможным различием в частоте дискретизации снимков. Параметр a_{22} описывает масштабирование по направлению азимута одного снимка относительно другого, которое может иметь место вследствие различия в орбитальных скоростях РСА во время съемок и различием в частоте повторения импульсов соответствующей снимкам. Параметры a_{12} и a_{21} определяют поворот одного снимка относительно другого, который вызывается непараллельностью орбит РСА во время съемок. Параметр b_1 описывает параллельный перенос по направлению наклонной дальности одного снимка относительно другого, который определяется главным образом значением перпендикулярной компоненты базовой линии. Параметр b_2 описывает параллельный перенос по направлению азимута одного снимка относительно другого, обусловленный возможным различием в выборе начала отсчета времени вдоль орбит, с которых производились съемки.



Как правило, значения параметров a_{11} , a_{22} близки к единице и значения параметров a_{12} , a_{21} близки к нулю, настолько, что их суммарное влияние на преобразованный с помощью (1) вспомогательный снимок по порядку величины сопоставимо с размером пикселя. Значения параметров b_1 , b_2 могут составлять десятки пикселей.

Погрешность пространственного совмещения снимков должна не превышать нескольких долей размера пикселя этих снимков, чтобы она не сказалась существенным образом в процессе последующей совместной обработки снимков. Типичная корегистрация снимков РСА включает в себя два этапа – грубую корегистрацию с точностью порядка размера пикселя и точную корегистрацию с субпиксельной точностью.

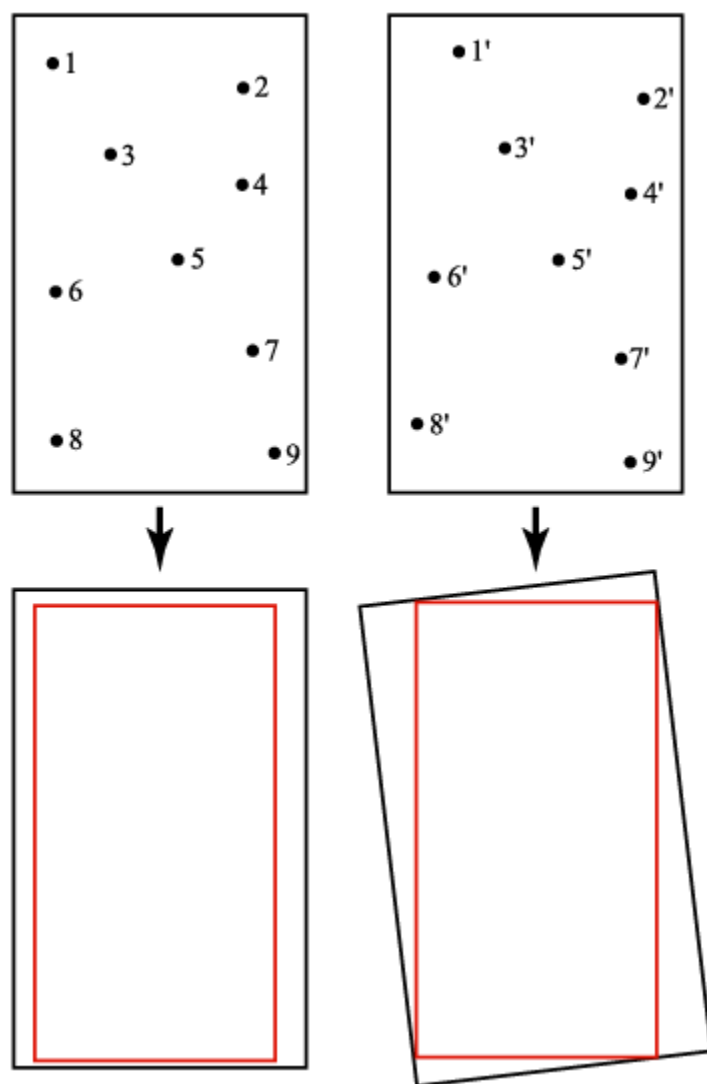


Рис. 2. Принцип совмещения изображений. Область пересечения основного и вспомогательного изображений показана красным прямоугольником.

Если служебная информация снимков является достаточно точной, то грубое оценивание параметров аффинного преобразования может быть выполнено путем ее анализа. На практике, как правило, ничего не известно о точности имеющейся служебной информации. Поэтому оценивание параметров аффинного преобразования с точностью до размера пикселя осуществляется путем анализа массива точек

подстилающей поверхности, однозначно идентифицируемых на обоих снимках и называемых опорными (Рис. 2, Рис. 3):

$$M = \left\{ \left\{ (x_1, y_1), (x'_1, y'_1) \right\}, \left\{ (x_2, y_2), (x'_2, y'_2) \right\}, \dots, \left\{ (x_N, y_N), (x'_N, y'_N) \right\} \right\}, \quad N \geq 3, \quad (2)$$

здесь каждая из N опорных точек имеет координаты (x, y) на основном снимке и координаты (x', y') на вспомогательном снимке.

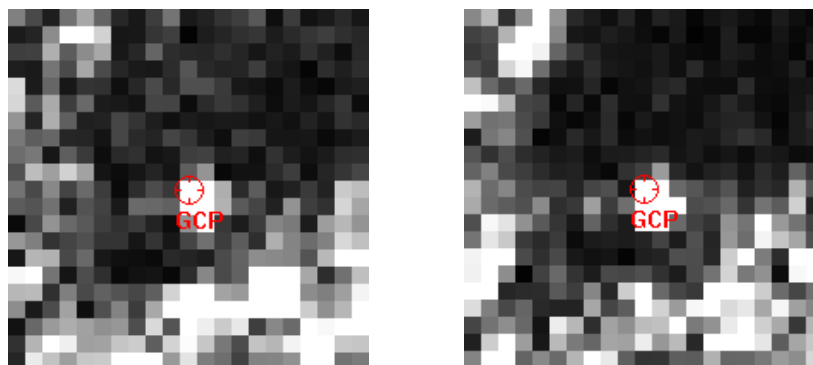


Рис. 3. Одна и та же точка подстилающей поверхности на основном снимке (слева) и вспомогательном снимке (справа).

Поскольку аффинное преобразование (1) содержит шесть параметров, для их оценивания необходимо не менее трех опорных точек. Если точек больше чем три, соотношения (1) дают переопределенную систему линейных алгебраических уравнений, которая практически всегда является несовместной. Под решением такой системы понимается такой набор параметров $\{\hat{a}_{11}, \hat{a}_{12}, \hat{a}_{21}, \hat{a}_{22}, \hat{b}_1, \hat{b}_2\}$, который доставляет минимум среднему квадрату невязки, между имеющимися координатами опорных точек на втором снимке $\{(x'_n, y'_n), n=1, \dots, N\}$ и рассчитанными координатами $\{(\hat{a}_{11}x_n + \hat{a}_{12}y_n + \hat{b}_1, \hat{a}_{21}x_n + \hat{a}_{22}y_n + \hat{b}_2), n=1, \dots, N\}$ этих точек. Средний квадрат невязки в матричной форме имеет следующий вид:

$$\Delta = \frac{1}{N}(\mathbf{x}' - H\mathbf{a}_1)^T (\mathbf{x}' - H\mathbf{a}_1) + \frac{1}{N}(\mathbf{y}' - H\mathbf{a}_2)^T (\mathbf{y}' - H\mathbf{a}_2), \quad (3)$$

где

$$H = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{pmatrix},$$

и

$$\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)^T, \quad \mathbf{y}' = (y'_1, y'_2, \dots, y'_N)^T, \quad \mathbf{a}_1 = (b_1, a_{11}, a_{12})^T, \quad \mathbf{a}_2 = (b_2, a_{21}, a_{22})^T.$$

Необходимое условие минимума функционала (3) имеет вид:

$$H^T H \mathbf{a}_1 = H^T \mathbf{x}', \quad H^T H \mathbf{a}_2 = H^T \mathbf{y}'.$$



Оценки метода наименьших квадратов:

$$\hat{\mathbf{a}}_1 = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{x}', \quad \hat{\mathbf{a}}_2 = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{y}'. \quad (4)$$

Заметим, что описанный метод оценивания параметров аффинного преобразования (1) является устойчивым по отношению к малым погрешностям в постановке опорных точек, если эти точки равномерно распределены по снимку. С ростом числа N используемых опорных точек дисперсия оценки $\{\hat{\mathbf{a}}_1, \hat{\mathbf{a}}_2\}$, обусловленная случайной погрешностью в постановке опорных точек, уменьшается. Массив опорных точек (2) может быть набран вручную оператором ЭВМ, либо построен корреляционно-экстремальным методом автоматически. Во втором случае трудно гарантировать качество результата совмещения вследствие многообразия радиолокационных сцен и условий съемки.

Проведение второго этапа корегистрации – корегистрации с субпиксельной точностью – требует выполнения интерполяции. Применяется как интерполяция снимков с последующей корреляцией, так и интерполяция значений корреляционной функции неинтерполированных снимков. В случае совмещения снимков интерферометрической пары, имеется объективный и чувствительный показатель точности локального совмещения, оптимизация которого путем варьирования координат опорной точки или параметров аффинного преобразования позволяет достичь требуемой субпиксельной точности. Таким показателем является когерентность, которая описана в следующем разделе.

После получения оценки параметров аффинного преобразования вспомогательный снимок пересчитывается в геометрию основного снимка и выделяется прямоугольная область перекрытия. При этом вычисленные координаты (x', y') в подавляющем большинстве случаев не попадают в узлы дискретной решетки основного снимка. Поэтому на основании вычисленных положений отсчетов выполняется двумерная интерполяция и последующая дискретизация на требуемую решетку. Интерполированное непрерывное изображение может быть представлено в виде свертки:

$$f(x, y) = \sum_i \sum_j f_{ij} \cdot g(x - i\Delta x, y - j\Delta y), \quad (5)$$

здесь $g(x, y)$ – интерполяционное ядро, Δx и Δy – шаги дискретизации снимков по осям координат, f_{ij} – отсчеты яркости в узлах решетки. Интерполяционное ядро выбирается в следующем виде:

$$g(x, y) = K_x(x) K_y(y). \quad (6)$$

Пусть принимаемый радиолокационный сигнал имеет ограниченный спектр, а его дискретизация была произведена в соответствии с теоремой об отсчетах Найквиста-Котельникова. Тогда точное восстановление формы сигнала обеспечивают компоненты интерполяционного ядра:



$$K_x(x) = \frac{\sin\left(\frac{\pi x}{\Delta x}\right)}{\frac{\pi x}{\Delta x}}, \quad K_y(y) = \frac{\sin\left(\frac{\pi y}{\Delta y}\right)}{\frac{\pi y}{\Delta y}}. \quad (7)$$

Интерполирующая функция есть идеальный низкочастотный фильтр. Суммирование в формуле (5) распространяется на все целые значения индексов, что на практике не реализуемо. Поэтому приходится использовать в качестве интерполяционного ядра либо усеченную функцию sinc, либо другие квазиоптимальные интерполяторы. Спектр усеченной функции sinc имеет осцилляции вблизи разрыва первого рода. Эти осцилляции спектра приводят к появлению паразитных частот на интерполированном изображении, что называется явлением Гиббса (Gibbs phenomenon). Для подавления этого эффекта в интерполяционное ядро добавляется множитель пространственного взвешивания, который осуществляет «плавное» усечение.



Вычисление когерентности

Для двух комплексных значений радиолокационного сигнала, соответствующих одной и той же точке подстилающей поверхности, определяется комплексная корреляционная функция:

$$C(i_1, i_2) = \frac{E[i_1 \cdot i_2^*]}{\sqrt{E[|i_1|^2] \cdot E[|i_2|^2]}}, \quad (1)$$

здесь i_1 – комплексное значение в точке первого снимка, i_2 – комплексное значение в соответствующей точке второго снимка, $E[\cdot]$ – оператор математического ожидания по множеству элементарных отражателей внутри соответствующей ячейки пространственного разрешения РСА на подстилающей поверхности. Значение амплитуды $\rho = |C|$ комплексной корреляционной функции $C(i_1, i_2)$ в точке называется когерентностью, а двумерный массив $\vec{P} = \{\rho_{mn}\}$ значений когерентности называется матрицей когерентности.

Когерентность – это мера согласованности откликов отдельных элементарных отражателей внутри ячейки разрешения. Когерентность описывает дисперсию разности фаз, соответствующих отдельным элементарным отражателям. Информация об амплитудах и фазах отдельных элементарных отражателей внутри ячейки разрешения недоступна, и доступна всего одна реализация снимка. Для практического вычисления когерентности пользуются принципом эргодичности сигнала по отношению к математическому ожиданию. Если в некоторой пространственной области сигнал является стационарным и его сечения не коррелированы, то среднее значение сигнала, вычисленное по совокупности сечений этой области равно среднему значению по реализациям сигнала в геометрическом центре области. Таким образом, усреднение при вычислении когерентности производится по локальному окну. Оптимальное значение радиуса окна для каждой конкретной пары и параметров обработки будет своим. Тем не менее, разброс значений этого радиуса по множеству всевозможных пар является небольшим. Обычно размеры окна лежат в диапазоне $3 \times 3 - 7 \times 7$ пикселей.

В наблюдаемом значении когерентности ρ традиционно выделяют несколько компонент:

$$\rho = \rho_{time} \cdot \rho_{geometry} \cdot \rho_{snr} \cdot \rho_{other}. \quad (2)$$

Множитель ρ_{time} описывает временную декорреляцию за период между съемками. Временная декорреляция может быть обусловлена изменением геометрии рассеяния или физических свойств рассеивающей поверхности внутри ячейки пространственного разрешения, изменением свойств тракта распространения (атмосферы) радиолокационного сигнала. Для количественной оценки временной декорреляции, используется эмпирическая формула:

$$\rho_{time} = \exp[-\beta T^2], \quad (3)$$

где T – период между двумя съемками, β – параметр, характеризующий изменчивость рассеивающей поверхности во времени.



Множитель $\rho_{geometry}$ описывает пространственную декорреляцию, обусловленную различием в пространственном положении радиолокатора на момент первой и второй съемок. Источник пространственной декорреляции обычно представляют в виде суммы двух причин. Первая, наиболее существенная с точки зрения величины понижения когерентности, заключается в различии между лучами зрения радиолокатора в плоскости наблюдения на момент первой и второй съемок. Декорреляция, обусловленная этой причиной, зависит от локального наклона рельефа по направлению наземной дальности, и выражается формулой:

$$\rho_{geometry} = \frac{W - |\Delta f_{range}|}{W}, \quad (4)$$

$$\Delta f_{range} = \frac{c B_{\perp}}{r_0 \lambda \tan(\theta)}, \quad (5)$$

$$W = \frac{c}{2\Delta r}, \quad (6)$$

здесь W – ширина спектра излучаемого сигнала (с линейной частотной модуляцией), Δf_{range} – спектральный сдвиг, обусловленный локальным наклоном рельефа по направлению наземной дальности, c – скорость света, $B_{\perp}$ – длина перпендикулярной компоненты базовой линии, r_0 – наклонная дальность до условного центра кадра, λ – рабочая длина волны радиолокатора, θ – угол падения радиолокационного сигнала, Δr – размер пикселя по направлению наклонной дальности. Вторая причина заключается в несовпадении плоскостей наблюдения во время первой и второй съемок, вызванном непараллельностью орбит. Этот эффект в большинстве случаев пренебрежимо мал.

Множитель γ_{snr} учитывает тепловой шум приемника, погрешности обработки сигнала при формировании снимка, и определяется через отношение сигнал-шум:

$$\rho_{snr} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{SNR_1}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{SNR_2}}}, \quad (7)$$

здесь SNR_1 и SNR_2 – отношения сигнал-шум для первого и второго снимков интерферометрической пары соответственно.

Множитель ρ_{other} учитывает остальные источники понижения когерентности, суммарный эффект которых считается пренебрежимо малым.

С точки зрения выявления изменений полезной составляющей является компонента ρ_{time} , описывающая временную декорреляцию.



Фильтрация когерентности

Некогерентное накопление.

Под некогерентным накоплением здесь понимается усреднение изображения путём суммирования соседних отсчётов. При некогерентном накоплении размер снимка или выделенного участка уменьшается пропорционально коэффициенту накопления. Целью некогерентного накопления может являться как собственно уменьшение размера обрабатываемого изображения, так и сглаживание шума, которое происходит при усреднении отсчётов снимка. Если требование к пространственному разрешению выходного продукта не критично, то уменьшение размера изображения позволяет сократить время обработки и понизить требования к ресурсам вычислительного средства. Кроме того, в ряде случаев, некогерентное накопление с разными коэффициентами по осям позволяет выровнять межпиксельное расстояние и, тем самым, улучшить визуальное восприятие результатов обработки.

Усредняющий фильтр.

Пусть S_{xy} обозначает прямоугольную окрестность (множество координат точек изображения) размерами $m \times n$ с центром в точке (x, y) . Процедура фильтрации предполагает вычисление среднего арифметического значения искаженного изображения $g(x, y)$ по окрестности S_{xy} . Оценка неискаженного изображения дается выражением:

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{(s, t) \in S_{xy}} g(s, t). \quad (1)$$

Медианный фильтр.

Действие этого фильтра состоит в замене значения в точке изображения на медиану значений яркости в окрестности этой точки:

$$\hat{f}(x, y) = \underset{(s, t) \in S_{xy}}{\text{med}} \{g(s, t)\}. \quad (2)$$

Медианный фильтр имеет свойство сохранять границы и края. Особенно эффективен медианный фильтр при подавлении импульсного шума.



Выявление изменений

Выявление по интенсивности.

Если снимки радиометрически скалированы и отсутствуют ошибки компенсации диаграммы направленности антенны, то области подстилающей поверхности, не изменившиеся за период между съемками, имеют на обоих снимках одинаковую среднюю интенсивность. Различие же средних интенсивностей одной и той же области подстилающей поверхности на двух снимках свидетельствует о произошедших изменениях. Таким образом, изменение средней интенсивности обратного рассеяния за период между съемками может быть выявлено путем сравнения значений интенсивности на снимках.

Для выявления изменений по интенсивности используется следующая статистика (англ. Touzi ratio statistic):

$$\hat{r} = \begin{cases} \hat{R}, & \text{если } \hat{R} \leq 1, \\ \hat{R}^{-1}, & \text{если } \hat{R} > 1. \end{cases} \quad (1)$$

здесь $\hat{R} = \frac{I_M}{I_S}$ – наблюдаемое отношение интенсивностей основного I_M и вспомогательного I_S снимков. Эта статистика подчиняется распределению вероятностей:

$$p(\hat{r} | R) = \frac{\Gamma(2N)}{(\Gamma(N))^2} \left(\frac{R^N}{(\hat{r} + R)^{2N}} + \frac{R^{-N}}{(\hat{r} + R^{-1})^{2N}} \right) \hat{r}^{N-1}, \quad (2)$$

где R – реальное отношение средних интенсивностей, N – коэффициент некогерентного накопления (англ. number of looks), примененный к снимкам. Областью возможных значений статистики (1) является отрезок $[0;1]$. Она позволяет проводить пороговую классификацию с единственным порогом, поскольку учитывает лишь величину изменения интенсивности и не учитывает знак.

Выявление по когерентности.

Если компонента временной декорреляции значительно превышает остальные компоненты общей декорреляции, то она может быть выделена по матрице когерентности путем пороговой классификации.

Пороговая классификация.

Пороговый классификатор с глобальным порогом T имеет вид:

$$label(x) = \begin{cases} \text{changed}, & x < T, \\ \text{unchanged}, & x \geq T. \end{cases} \quad (1)$$

здесь $label(x)$ – метка о принадлежности пикселя x определенному классу, *changed* – метка класса изменений, *unchanged* – метка класса фона.



Значение глобального порога может задаваться оператором или определяться автоматически. Алгоритм автоматического определения порога имеет вид:

1. Выбирается начальная оценка значения порога T .
2. Проводится сегментация изображения с помощью порога T . В результате образуется две группы пикселей: G_1 , состоящая из пикселей с яркостью больше T , и G_2 , состоящая из пикселей с яркостью меньше или равной T .
3. Вычисляются значения μ_1 и μ_2 средних яркостей пикселей по областям G_1 и G_2 соответственно.
4. Вычисляется новое значение порога: $T = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$.
5. Повторяются шаги со 2-го по 4-й до тех пор, пока разница значений T при соседних итерациях не окажется меньше значения наперед заданного параметра.

Итеративная классификация.

Исходными данными метода являются матрица когерентности (интенсивности) и начальное разбиение множества пикселей этой матрицы на два класса: «объекты» – «фон». Для каждого класса принимается статистическая двухпараметрическая модель – гауссовское распределение вероятностей с параметрами μ_k (среднее) и σ_k (среднеквадратическое отклонение). Алгоритм является итеративным. Каждая итерация состоит из двух шагов: оценивание параметров (μ и σ) модели каждого класса по результатам предыдущей классификации и классификация по методу максимума апостериорной вероятности при фиксированных значениях параметров моделей. В процессе классификации пиксель p , будет отнесен к классу, апостериорная вероятность принадлежности к которому является максимальной:

$$f_p = \arg \max_k \left[P(x_p | f_p = k) P(k) \right], \quad k = 0, 1, \quad (1)$$

здесь $P\{x_p | f_p = k\}$ – функция правдоподобия класса k , $P(k)$ – априорная вероятность класса k , определяемая (в рамках данного документа) формулой:

$$P(k) = \frac{N_k}{N_\Sigma}, \quad N_\Sigma = N_0 + N_1, \quad k = 0, 1, \quad (2)$$

здесь N_0 и N_1 – количество пикселей первого и второго класса соответственно в окрестности пикселя p заданного радиуса. Радиус окрестности является параметром алгоритма.

Функция правдоподобия учитывает удаленность образа пикселя от образа класса в пространстве признаков (параметров μ и σ). Априорная вероятность, определяемая формулой (2), учитывает степень пространственной однородности в окрестности пикселя.

Результатом работы итеративной классификации на каждой итерации является массив меток $\mathbf{f}$, который указывает для каждого пикселя p принадлежность к определенному классу $f_p \in \{0, 1\}$.



Алгоритм итеративной классификации имеет вид:

Пока число итераций меньше заданного и нарушено условие стабилизации, выполнять:

1. По известному массиву меток и матрице когерентности (интенсивности) оценить параметры (μ и σ) для модели каждого класса.
2. Провести классификацию пикселей методом максимума апостериорной вероятности по известным значениям параметров.

Условие стабилизации считается выполненным, если отношение $\frac{n}{N}$ числа пикселей n , изменивших по результатам итерации метку, к общему числу N пикселей в матрице меньше наперед заданной величины. В противном случае условие стабилизации считается нарушенным.



Геокодирование матрицы изменений

Матрица изменений трансформируется в географическую систему координат: широта-долгота-высота над опорным эллипсоидом (WGS 84). Подробно ознакомиться с особенностями геокодирования можно в описании «Процессора геокодирования» модуля PHOTOMOD Radar.



Фильтрация матрицы изменений

Полученная после геокодирования матрица изменений может оказаться пространственно несвязной, может содержать мелкие элементы, затрудняющие ее интерпретацию. Поэтому необходима фильтрация бинарной матрицы изменений.

Пространственная фильтрация.

Целью пространственной фильтрации является повышение пространственной связности бинарной матрицы выявленных изменений. Идея фильтрации состоит в следующем. Для каждого пикселя, используя маски представленные на рисунке (Рис. 4), ищется такая ориентация окна (маска), при которой в окно попадает (маска накрывает) максимальное количество элементов выявленных изменений. Далее это количество сравнивается с наперед заданным порогом. Если оно не превышает порог, данный пиксель относится к классу фона, в противном случае – к классу изменений. Использование локального окна с варьируемой ориентацией позволяет сохранить и замкнуть тонкие разомкнутые контуры.

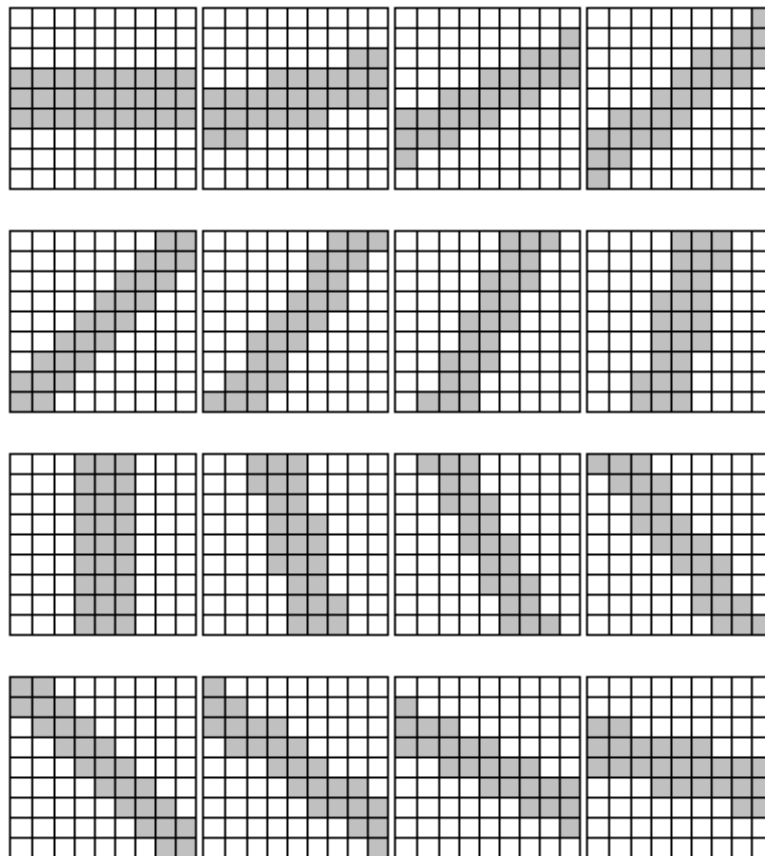


Рис. 4. Маски ориентации локального окна.

Удаление малых деталей.

Эта операция предназначена для удаления малых деталей из матрицы изменений, которые сами по себе несут мало информации, но значительно затрудняют интерпретацию общей картины. В результате операции все детали, относящиеся как к классу фона, так и к классу изменений, количество пикселей, в составе которых, меньше наперед заданного числа удаляются (метка принадлежности к классу инвертируется).



Морфологическая фильтрация.

Морфологическая фильтрация имеет целью удаление малых отдельно лежащих деталей и объединение малых компактно расположенных деталей в более крупные детали.

Для описания принципа действия морфологического фильтра опишем предварительно используемые теоретико-множественные операции. Центральным отражением множества B называется множество: $\hat{B} = \{w \mid w = -b, b \in B\}$. Параллельным переносом $(A)_z$ множества A в точку $z = (z_1, z_2)$ называется множество: $(A)_z = \{c \mid c = a + z, a \in A\}$. Пусть A и B – множества из двумерного целочисленного пространства Z^2 . Дилатацией $A \oplus B$ множества A по множеству B называется множество: $A \oplus B = \{z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\}$. Эрозией множества A по множеству B называется множество $A \ominus B = \{z \mid (B)_z \subseteq A\}$. Размыканием множества A по примитиву B называется множество: $A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$. Замыканием множества A по примитиву B называется множество: $A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$.

Морфологическая фильтрация двоичного изображения состоит в его размыкании и последующем замыкании по некоторому примитиву. Результат фильтрации зависит от вида примитива. Наиболее простым является примитив квадратной формы, заполненный единицами. При этом размер квадрата является параметром алгоритма.



Векторизация

Для интегрирования полученной матрицы изменений в геоинформационные системы необходимо ее перевести из растрового формата в векторный формат данных.

