

ВОЗМОЖНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

М.А. Болсуновский («Совзонд»)

В 1990 г. окончил Киевское высшее инженерное радиотехническое училище. После окончания училища служил в рядах ВС РФ. С 2000 г. работал в ООО «Гео Спектрум», а с 2002 г. — в ФГУП ВО «Техмашимпорт». В 2004 г. получил степень «Мастер делового администрирования в области стратегического планирования» (Master of Business Administration) во Всероссийской академии внешней торговли Минэкономразвития РФ. С 2004 г. работает в компании «Совзонд», в настоящее время — заместитель генерального директора.

О.Н. Колесникова («Совзонд»)

В 2001 г. окончила Московский государственный университет природообустройства по специальности «гидротехническое строительство». После окончания университета работает в компании «Совзонд», в настоящее время — руководитель отдела программного обеспечения.

Т.Н. Чимитдоржиев (ОФП при Президиуме БНЦ СО РАН, Улан-Удэ)

После службы в рядах ВС РФ в 1989 г. поступил на радиофизический факультет Томского государственного университета. После окончания поступил в аспирантуру Института радиотехники и электроники РАН по специальности «радиофизика». С 2000 г. — директор Центра космического мониторинга БНЦ СО РАН, с 2007 г. — старший научный сотрудник Отдела физических проблем при Президиуме БНЦ СО РАН.

А.В. Дмитриев (ОФП при Президиуме БНЦ СО РАН, Улан-Удэ)

В 1998 г. окончил физико-технический факультет Бурятского государственного университета по специальности «физика». После окончания университета работает в Отделе физических проблем при Президиуме БНЦ СО, в настоящее время — научный сотрудник.

С развитием радиотехнических средств дистанционного зондирования земной поверхности и увеличением количества радаров (RADAR — radio detecting and ranging — обнаружение и измерение дальности с помощью радиоволн) среднего и высокого пространственного разрешения все большее применение находят радиолокационные поляриметрические изображения. Наряду с известными достоинствами, такими как возможность съемки в любое время суток и практически при любой погоде, включая сплошное по-

крытие облачностью, в последнее время радиолокационные системы позволяют получать изображения с разрешением на местности до единиц метров (RADARSAT, ALOS (PALSAR), TERRASAR X), что вплотную приближается к характеристикам оптической аппаратуры (SPOT, IKONOS, QUICKBIRD). Кроме того, высокая проникающая способность радиолокационных систем делает их незаменимым средством для оценки влажности почв, объема биомассы лесов и т. п.

Совокупность перечисленных преимуществ радиолокацион-

ных систем успешно используется для картографирования борельных лесов Сибири посредством обработки поляриметрических радиолокационных изображений [1]. В данной работе рассмотрена методология комплексного подхода к обработке поляриметрических радиолокационных изображений для дешифрирования растительного покрова и природных объектов земных поверхности.

▼ Описание экспериментальных данных

Для исследования были ис-



Рис. 1

Псевдоцветовой композит в L-диапазоне

пользованы радиолокационные поляриметрические данные радиолокатора с синтезированной апертурой SIR-C. Съемка побережья озера Байкал проводилась одновременно в двух частотных диапазонах L и C (с длиной волны $L = 24,0$ см и $C = 5,6$ см). Угол обзора в сеансе был равен $23,9^\circ$. Режим работы радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) предусматривал однопроходную съемку Земли для четырех комбинаций (ГГ, ВВ, ГВ и усредненная, которая в данной статье не рассматривается) поляризации радиоволны на излучении/приеме.

Введем следующие обозначения: LHH — изображение, полученное в L-диапазоне на горизонтальной согласованной поляризации, LHV — изображение, полученное в L-диапазоне на кроссполяризации и т. д. Относительная калибровка данных SIR-C была достаточно корректной, и погрешность составляла ± 1 дБ.

Обработка радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли проводилась в программном комплексе ENVI, предназначенном для обработки данных ДЗЗ, а также в дополнительном программном модуле для ПК ENVI — SARscape, главными задачами которого является обработка радиолокационных изображений ДЗЗ.

▼ Анализ данных интенсивности радиолокационного изображения

Наиболее простым видом анализа является ложноцветовое представление поляриметрических данных, известное как RGB-композит. Для создания композита могут быть использованы как исходные комбинации диапазонов и поляризаций, так и полученные на основе различных поляриметрических преобразований. Наиболее простой формой представления является: Red — HH, Green — HV, Blue — VV (рис. 1). На рис. 1 демонстрируются различные поляриметрические особенности местности. В частности, лесные участки выделены зеленым цветом, что свидетельствует о большем вкладе кроссполяризованной HV-компоненты, открытые участки местности, включая водную поверхность, характеризуются большим вкладом горизонтально HH и вертикально VV ориентированных компонент. Практически черные участки местности указывают на незначительное рассеяние в сторону радиолокатора на всех поляриметрических составляющих, что следует трактовать, как ровные участки, отражающие сигнал зеркально, т. е. в противоположную сторону от радиолокатора. Подобные ком-

позиты удобны для визуального анализа поляриметрических особенностей различных типов растительного покрова и природных объектов земной поверхности.

Следующее направление исследований связано с применением различных комбинаций частот или поляризаций, например, сополяризованного и кроссполяризованного отношения комплексных сигналов или их интенсивности. Применяется также нормализованная разность радиолокационных изображений [2] в L и C-диапазонах (SARvi), которая позволяет разделить лесные массивы, низкорослую растительность и открытые участки земной поверхности без растительности. Известно, что SARvi чувствителен к вертикальной иерархии (структуре) растительности и может быть использован для первичного исследования растительных покровов. Как указывается в данной работе, индекс использует основные поляриметрические свойства растительности: для открытых поверхностей без растительности CVV имеет более высокие значения по сравнению с LHV, а для высокого растительного покрова, под которым понимается кустарник и лесные массивы, величины LHV больше значений CVV. В соответствии с



Рис. 2

Изображение SARvi

данными выводами предложено следующее соотношение:

$$SAR_{vi} = 100 \times \left[\frac{(LHV - CVV)}{(LHV + CVV)} + 1 \right].$$

На рис. 2 приведено изображение SAR_{vi}, полученное при помощи программы ENVI 4.3. На изображении более светлыми тонами выделяются лесные и кустарниковые массивы, а также река. Открытые пространства, включая водную поверхность, отображаются более темными тонами.

▼ **Анализ поляриметрической когерентности**

Рассмотрим варианты использования фазы для целей дешифрирования радиолокационных изображений. Прежде всего, это отношения сополяризованных и кроссполяризованных сигналов, а также когерентность поляриметрического сигнала и сополяризованной фазы. В общем случае когерентность есть ничто иное, как коэффициент корреляции двух комплексных изображений (амплитуда и фаза) [1]. При этом различают интерферометрическую, поляриметрическую и интерферометрическую когерентность на различных поляризациях (PolInSAR). В первом случае построение осуществляется по комплексным изображениям, полученным с разнесенных в пространстве точек, во втором — по изображениям одного витка на различных поляризациях. Третий вариант является объединением двух первых вариантов. В данном исследовании рассмотрена поляриметри-

ческая когерентность, т. е. по данным, полученным с одного пролета, но на различных поляризациях. Степень когерентности двух комплексных радиолокационных изображений z_1 и z_2 определяется формулой:

$$\gamma = \frac{|E\{z_1 z_2^*\}|}{\sqrt{E\{|z_1|^2\} E\{|z_2|^2\}}},$$

где символ «*» — комплексно-сопряженное изображение, $E\{\cdot\}$ — операция усреднения, $0 \leq \gamma \leq 1$. С использованием данной формулы были получены все возможные комбинации поляриметрических когерентностей. Однако информативными оказались лишь изображения когерентностей HH-VV для обоих диапазонов (рис. 3 и 4). Для остальных вариантов наблюдалась практически полная декорреляция по всему изображению. Визуальный анализ когерентностей на рис. 3 и 4 показал общее сходство полученной информации:

— низкие значения (темный тон) соответствуют объемным рассеивающим структурам, таким как лес и кустарники, где отмечается деполаризация сигнала и как следствие различие в обратном рассеянии на согласованных горизонтальной и вертикальной поляризациях;

— высокие значения (светлый тон) определяют открытые участки местности, которые характеризуются одинаковым рассеянием на согласованных поляризациях.

Для последующего анализа полученные изображения были

синтезированы в ложноцветовой RGB-композит: Red — HH-VV когерентность в L-диапазоне, Green и Blue — HH-VV когерентность в C-диапазоне (рис. 5). Красноватый оттенок на изображении свидетельствует о больших значениях когерентности в дециметровом диапазоне (L) по сравнению с сантиметровым (C) диапазоном. Данное обстоятельство объясняется различием размеров шероховатостей (неоднородностей): неоднородности меньше длины волны 24 см и волна в меньшей степени деполаризуется, соответственно значение когерентности выше, и, наоборот, для длины волны 5,6 см эти же неоднородности соизмеримы с длиной волны и они деполаризуют волну, как следствие более низкие величины когерентности. Светлые участки местности определяют равные значения когерентности, что соответствует ровным однородным растительным покровам земной поверхности.

По аналогии с вегетационными индексами [3] радиолокационные интерферометрические данные могут быть обработаны при помощи индекса когерентности [4]. Однако данный подход выходит за рамки настоящей статьи и поэтому не рассматривается.

▼ **Анализ фазовой информации**

Для дальнейшей оценки возможностей дешифрирования комплексных радиолокационных изображений формата SLC при



Рис. 3
Фрагмент изображения поляриметрической когерентности HH-VV в L-диапазоне

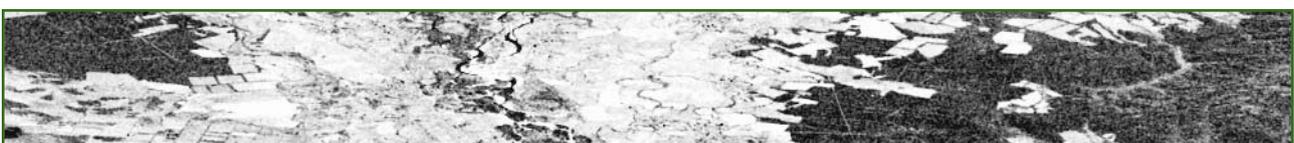


Рис. 4
Фрагмент изображения поляриметрической когерентности HH-VV в C-диапазоне

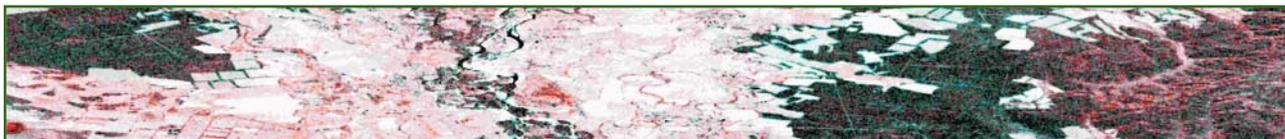


Рис. 5
Ложноцветовой композит поляриметрических когерентностей

помощи программного обеспечения ENVI 4.3 было синтезировано изображение разности сополяризованных фаз HH и VV в обоих рассматриваемых диапазонах.

На рис. 6 представлены характерные графики синтезированного изображения разности сополяризованных фаз. По оси абсцисс отложены номера пикселей, а по оси ординат — разность фаз от $-\pi$ до π . Разность фаз $\Delta\phi$ отраженных электромагнитных волн на согласованных HH и VV поляризациях может быть описана следующими основными вариантами:

1. Электромагнитная волна отражается от относительно ровных поверхностей с близкой к 0° разностью фаз (см. вторую половину рис. 6а).

2. Сигнал испытывает двукратное отражение с разностью, близкой $\pm\pi$, например, от зданий или стволов деревьев (см. всплески на рис. 6а).

3. Разность фаз флуктуирует между значениями -180° и 0° , наблюдается при рассеянии от неоднородной среды, каковой является растительность.

В ряде случаев может наблюдаться совместное влияние данных механизмов рассеяния, например, в лесной среде рассеяние может иметь диффузный характер от толщи стволов деревь-

ев с разностью фаз от -180° до 0° наряду с наличием углового отражения от стволов деревьев с различием по фазе $\pm\pi$ (рис. 6б).

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для первичного визуального анализа поляриметрических радиолокационных данных может быть использовано ложноцветовое представление изображений, которое позволяет наглядно оценить различие в величине обратного радиолокационного рассеяния на различных поляризациях.

2. Поскольку значительная часть пользователей данных дистанционного зондирования, как правило, имеет представление об вегетационных индексах, то интерпретация изображения радарного индекса будет несложной. А несложный механизм расчета делает радарный индекс весьма удобным средством обработки.

3. Поляриметрическая когерентность может быть использована для разделения различных типов растительного покрова земной поверхности по степени неоднородности: однородная ровная поверхность, шероховатая или объемная неоднородность.

4. Изображение разности со-

поляризованных фаз является достаточно мощным средством для исследований лесного полога.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что для получения достоверных результатов необходимо использовать всю возможную информацию, посредством различных методов обработки комплексного радиолокационного изображения.

▼ Список литературы

1. S.R. Cloude, K.P. Papathanassiou. Polarimetric SAR Interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote sensing. — 1998. — vol. 36. — no. 5. — pp. 1551–1565.
2. B. Stoll. SARvi: A vegetation index based on AirSAR data for south pacific volcanic islands vegetation mapping. // Proc. IGARSS 2005, Seoul, Korea, 2005. — vol. VI. — pp. 4331–4334.
3. Чимитдоржиев Т.Н., Ефременко В.В. Об использовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем. // Исследование Земли из космоса. — 1998. — № 3. — С. 49–56.
4. Чимитдоржиев Т.Н. Графическое обоснование применимости методики вычисления вегетационных индексов для обработки изображений интерферометрической когерентности // Исследование Земли из космоса. — 2007. — № 3. — С. 1–6.

RESUME

The article considers the methodology of a complex approach to process polarimetric radar images in order to identify terrestrial surface's vegetation cover and natural objects. A conclusion is made that it is possible to use the polarimetric coherency to distinguish various types of the vegetation cover heterogeneity. At the same time an image of the co-polarised phases difference turns to be a sufficiently powerful tool to study forest cover.

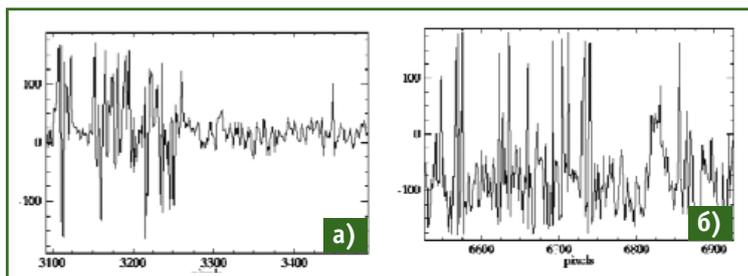


Рис. 6
Характерные графики синтезированного изображения разности сополяризованных фаз