

УДК 530.1 : 528.871.6

НОВЫЙ ТИП ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СИГНАТУРЫ ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ С ФРАКТАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

А. В. Дмитриев, Т. Н. Чимитдоржиев, П. Н. Дагуров

*Институт физического материаловедения СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
E-mail: scidir@ipms.bscnet.ru*

Предложен новый тип поляризационной сигнатуры для оценки анизотропии пространственной структуры неоднородностей земных покровов с помощью космических радиолокационных поляриметрических изображений. Рассмотрен случай радиолокационного зондирования леса в дециметровом диапазоне длин волн при различных азимутальных углах наблюдения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиолокаторы с синтезированной апертурой, фрактальная размерность, обработка изображений.

DOI: 10.15372/AUT20160305

Введение. В настоящее время наряду с сенсорами видимого и инфракрасного диапазонов [1, 2] в дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) из космоса используются радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) [3, 4]. Преимуществом радарного зондирования является независимость процесса получения изображений от освещённости снимаемой поверхности и наличия облачности. Кроме того, радиоволны обладают способностью проникать в слои подстилающей поверхности, такие как почва, растительность, снег и лёд, обеспечивая подповерхностное зондирование. Широкое применение радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования для картирования земных покровов также обусловлено их высокой разрешающей способностью, сравнимой с разрешением оптических систем, например, у таких РСА, как COSMO-SkyMed и TerraSAR-X, разрешение на поверхности достигает 1 м. На сегодняшний день существует множество публикаций по спутниковым радиолокационным методам и технологиям ДЗЗ. Примеры использования РСА можно найти в [5], специализированных обзорах по оценке биомассы [6], при изучении криосферы [7], в археологических исследованиях [8].

Особенности взаимодействия радиоволн со сложными структурами поверхности, дающими многократное рассеяние или имеющими пространственную анизотропию, могут быть выявлены с помощью поляризационных измерений. Такие измерения обеспечиваются поляриметрическим РСА, излучающим линейно поляризованные волны с вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациями и принимающим отражённый сигнал на согласованных (сигналы VV и HH) и ортогональных (VH и HV) поляризациях. Многоканальный режим работы радара значительно повышает информативность измерений [9, 10].

При рассеянии волн на сложных радиолокационных объектах происходит преобразование их поляризации. Поляриметрическая съёмка позволяет регистрировать полную матрицу рассеяния для каждого радиолокационного объекта и вычислять её элементы в определённом поляризационном базисе. Это привело к появлению новых методов анализа данных дистанционного зондирования, в частности методов декомпозиции матрицы рассеяния [9, 10] и их модификаций. На принципах поляриметрической интерферометрии основаны развиваемые в последние годы методы «случайного объёма над землёй» [11–13]

и томографии [14, 15] для исследования вертикальной и объёмной структуры наземных объектов, в частности леса.

Указанные выше преобразования позволяют получить поляризационные «портреты» зондируемых объектов и выявить физические механизмы обратного рассеяния, что допускает достоверную интерпретацию данных зондирования. Один из известных методов поляризационного анализа — графическое представление коэффициента обратного радарного рассеяния для всех возможных состояний поляризационного эллипса, реализуемое в виде поляризационной сигнатуры [16]. Последняя является трёхмерным графическим отображением поляриметрической информации об обратном радарном рассеянии (яркости поляриметрических радарных изображений): независимые переменные, представляющие собой угол эллиптичности и угол наклона поляризационного эллипса, откладываются по осям абсцисс и ординат, в качестве аппликаты выступает интенсивность обратного радарного эхосигнала.

Сигнатуры строятся для случая, когда поляризации при излучении и приёме эхосигнала совпадают (сополяризационная сигнатура). Также рассматривается кроссполяризационная сигнатура, формирование которой предполагает приём эхосигнала под углом, перпендикулярным углу ориентации поляризационного эллипса на излучение. Однако такой подход неполно представляет сложные явления, сопровождающие процессы рассеяния и переотражения волн в неоднородных средах, поскольку не учитывает степень их неоднородности. Описание явлений может быть выполнено с помощью анализа текстуры исходного изображения. Так, в работе [17] для исследования поляриметрических радиолокационных изображений (РЛИ) была рассмотрена поляризационная текстурная сигнатура, которая предполагает оценку пространственных флуктуаций обратного радарного рассеяния, т. е. вариаций яркости пикселей изображения. Оценка вариаций выполняется на основе расчёта нормированного второго момента, отображающего пространственные флуктуации радарного эхосигнала. Данные флуктуации связаны с влиянием на них спеклшума и пространственных вариаций обратного радарного рассеяния (яркости пикселей) вследствие неоднородностей рассеивающего объёма. Однако такая сигнатура не позволяет оценить анизотропию обратного радарного рассеяния.

Основная задача предлагаемого исследования — анализ пространственных вариаций яркости пикселей радиолокационного изображения, связанных с анизотропией неоднородных природных сред. Для выявления анизотропии предлагается новый вид поляризационной сигнатуры, основанной на изучении фрактальных характеристик поляризационного отклика зондируемой среды. Фрактальный подход использовался в случае линейной поляризации для анализа неоднородной природной среды в виде лесного массива [18, 19].

В данной работе рассматривается обобщение этого подхода для различных азимутальных углов радиолокационного зондирования и любых состояний поляризационного эллипса, что позволяет уточнить оценку биофизических параметров лесной среды.

Построение фрактальной поляризационной сигнатуры. Главная идея предлагаемого метода — использование фрактального анализа изображений при построении поляризационной сигнатуры. Оценка фрактальной размерности (ФР) — основной метод количественного описания фрактальных свойств изучаемых объектов. Известной математической моделью, представляющей естественные фрактальные объекты, является модель дробного броуновского движения (ДБД) [20]. Чтобы применить модель ДБД к исходному РЛИ, последнее рассматривают как поверхность в трёхмерном пространстве, в котором x, y — координаты пикселя в плоскости изображения, а третья координата z — величина обратного радарного эхосигнала. Поверхность $I(x, y)$ в модели ДБД удовлетворяет соотношению

$$E(|I(x_2, y_2) - I(x_1, y_1)|) \propto \left(\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \right)^H, \quad (1)$$

где $E(\cdot)$ — операция усреднения, а величина H называется индексом Хёрста ($0 < H < 1$). Данная поверхность обладает следующими основными свойствами:

- а) непрерывна, но не дифференцируема; все её свойства зависят от единственного масштабного коэффициента H ;
 - б) наличие фрактальной размерности $D = 3 - H$;
 - в) афинно-самоподобна.
- Уравнение (1) можно переписать в виде

$$E(\Delta I_{\Delta r}) = K \Delta r^H,$$

где $\Delta I_{\Delta r} = |I(x_2, y_2) - I(x_1, y_1)|$, $\Delta r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$, а K — постоянная величина. Логарифмируя обе части последнего уравнения, получим

$$\log(E(\Delta I_{\Delta r})) = H \log(\Delta r) + K. \tag{2}$$

Формула (2) используется для оценки фрактальной размерности изображений следующим образом. Сначала вычисляются величины $E(\Delta I_{\Delta r})$ для различных значений Δr . Далее строится график зависимости $\log(E(\Delta I_{\Delta r}))$ от $\log(\Delta r)$. Затем с помощью линейной регрессии определяется наклон результирующей кривой, который равен величине H . Зная H , можно вычислить фрактальную размерность $D = 3 - H$.

Данный метод оценивает ФР всей рассматриваемой поверхности (всего РЛИ). Однако больший интерес, как правило, представляет локальная ФР, характеризующая локальные вариации радарного эхосигнала в некоторой окрестности заданной точки на исходном изображении. Она рассчитывается по вышеприведённому алгоритму, где в качестве изображения выступает выбранная окрестность. Таким образом, оценивая локальную ФР в каждой точке исходного РЛИ, можно получить соответствующее ему фрактальное изображение. Программное обеспечение для получения фрактальных изображений описано в [21].

Блок-схема алгоритма построения фрактальной поляризационной сигнатуры (ФПС) показана на рис. 1. На первом этапе диапазоны изменения угла наклона ψ ($0 \leq \psi \leq 180^\circ$) и эллиптичности χ ($-45 \leq \chi \leq 45^\circ$) эллипса поляризации разбиваются на равномерные последовательности значений $\{\psi_i\}_{i=0}^N$ и $\{\chi_j\}_{j=0}^M$. Для каждой комбинации (ψ_i, χ_j) синтезируется изображение на согласованной поляризации или кроссполяризации в соответствии с формулой (13) из [16]. Затем синтезированные изображения преобразуются во фрактальные [21]. На этих изображениях определяется область (или окрестность некоторой точки),

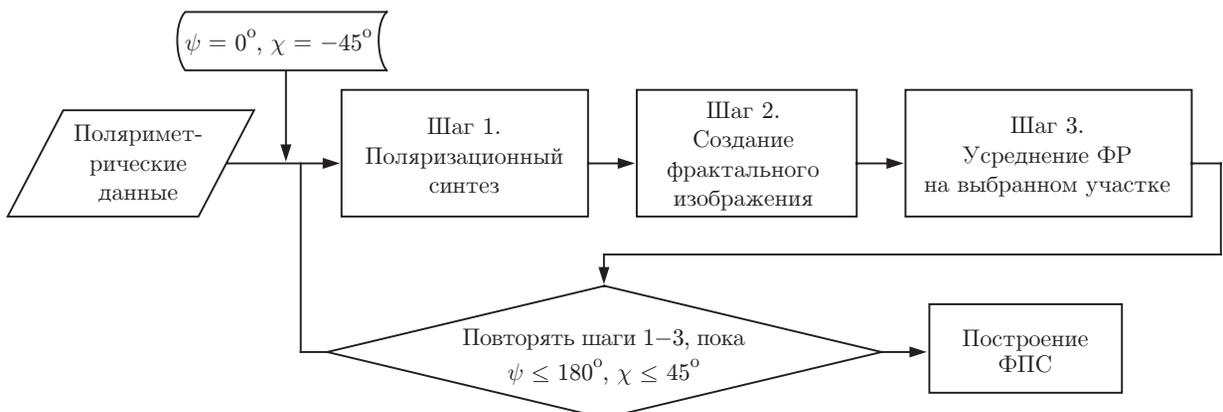


Рис. 1. Схема процесса создания фрактальной поляризационной сигнатуры

для которой необходимо построить сигнатуру. Рассчитанные ФР в выбранной области усредняются для получения результирующей ФР. Таким образом, для каждой пары значений углов (ψ_i, χ_j) имеется одно значение D_{ij} . Полученный набор из $L = (N + 1)(M + 1)$ точек (ψ_i, χ_j, D_{ij}) образует фрактальную поляризационную сигнатуру, характеризующую пространственные флуктуации радиолокационного эхосигнала.

Следует отметить, что построение ФПС требует больших вычислительных затрат. Это связано с тем, что для оценки значения одного пикселя фрактального изображения необходимо обработать $s \times s$ пикселей исходного изображения, где $s = 2r + 1$ (r — радиус окрестности). Таким образом, количество вычислений для определения только одного значения ФР растёт пропорционально квадрату радиуса используемой окрестности. Другим фактором, влияющим на время вычислений, является выбор шага изменения углов эллипса поляризации. Пусть δ — шаг последовательностей изменения углов эллипса поляризации. Тогда $N = [180^\circ/\delta]$, $M = [90^\circ/\delta]$. При $\delta = 3^\circ$ имеем $N = 60$, $M = 30$. Для построения ФПС необходимо синтезировать $L = 1891$ поляриметрическое изображение, каждое из которых затем преобразуется во фрактальное. В зависимости от размеров исходного РЛИ это занимает несколько часов на современном персональном компьютере (64-разрядная ЭВМ с процессором Intel® Core™ i5-4570@3.2 ГГц). При шаге в 1° требуется обработать уже $L = 16471$ изображение, что приводит к значительному увеличению времени вычислений.

Исходные данные, результаты и обсуждение. Для построения сигнатур были использованы данные космических поляриметрических РСА: спутника SIR-C, выполнявшего съёмку в октябре 1994 года, и спутника ALOS, осуществлявшего съёмку в 2006–2009 годах (см. таблицу).

Изображения SIR-C были получены одновременно в двух частотных диапазонах (L- и C-диапазоны с длинами волн 24 и 5,6 см соответственно) на восходящей орбите с углом наклона орбиты $62,6^\circ$ и углом падения волны $23,9^\circ$, при этом зондирование выполнялось по направлению на юго-юго-восток (рис. 2, стрелка 1). Угол наклона орбиты ALOS PALSAR-1 составлял $98,1^\circ$, угол падения — 24° ; на восходящей орбите направление зондирования близко к восточному (стрелка 2), а на нисходящей орбите изменялось на западное (стрелка 3). Для исходных данных в целях устранения спекл-шума проводилось некогерентное накопление. В результате размер пикселя на изображениях составил 24×24 м. В качестве тестового полигона для апробации разработанной методики был выбран участок размером 1×1 км преимущественно соснового леса на равнинной части дельты реки Селенга. На нескольких пробных лесных выделах проведено таксационное описание и

Данные поляриметрических радаров

SIR-C	ALOS PALSAR-1 (восходящая орбита)	ALOS PALSAR-1 (нисходящая орбита)
09.10.1994	28.06.2006	30.05.2006
10.10.1994	13.08.2006	15.07.2006
—	28.09.2006	30.08.2006
—	13.11.2006	15.10.2006
—	31.03.2007	—
—	16.05.2007	—
—	16.11.2007	—
—	02.04.2008	—
—	05.04.2009	—

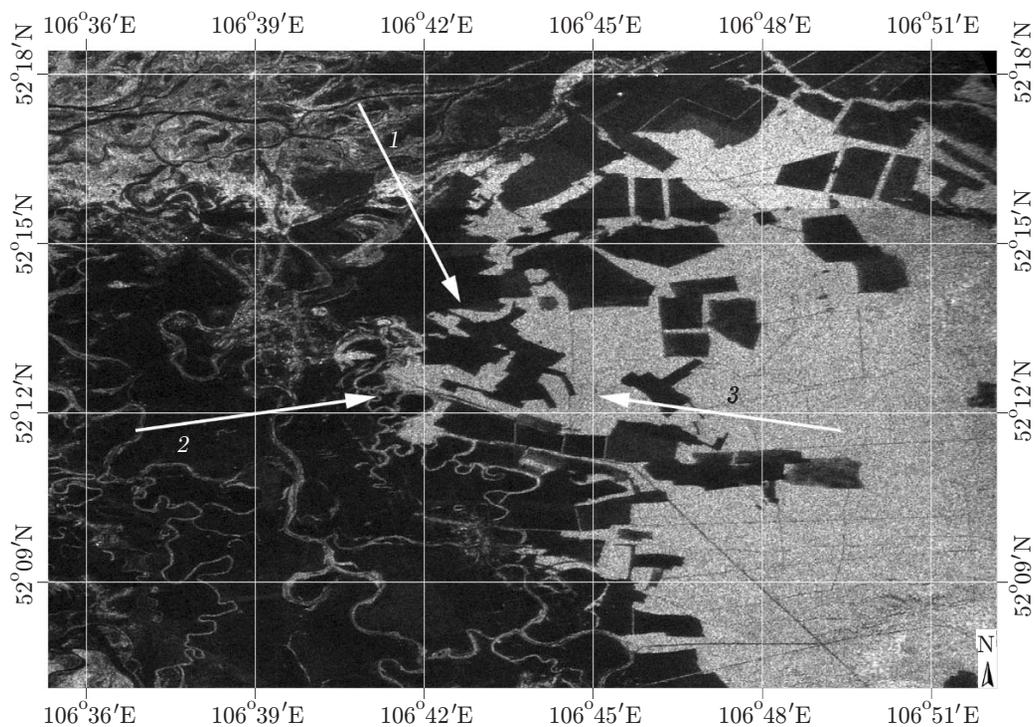


Рис. 2. Геометрия радарного зондирования

измерено распределение направления ветвей деревьев по азимуту, а также угловое распределение в вертикальной плоскости. Результаты этих измерений показали, что у 60–75 % деревьев наибольшая густота ветвей наблюдается в диапазоне азимутальных углов от юго-востока до юго-запада. В качестве иллюстрации приведена фотография дерева с вышеописанным распределением ветвей (рис. 3). Изображение, полученное при съёмке с запада на восток, соответствует случаю радиолокационного зондирования, обозначенному стрелкой 2 на рис. 2. Наклон ветвей деревьев варьируется примерно в промежутке углов 0° – 80° от горизонтали, причём значение 0° относится к нижним ветвям, а значение 80° — к верхним. В средней части стволов наклоны составляют преимущественно 40° – 50° . Во-



Рис. 3. Пример фотоснимка дерева на тестовом участке

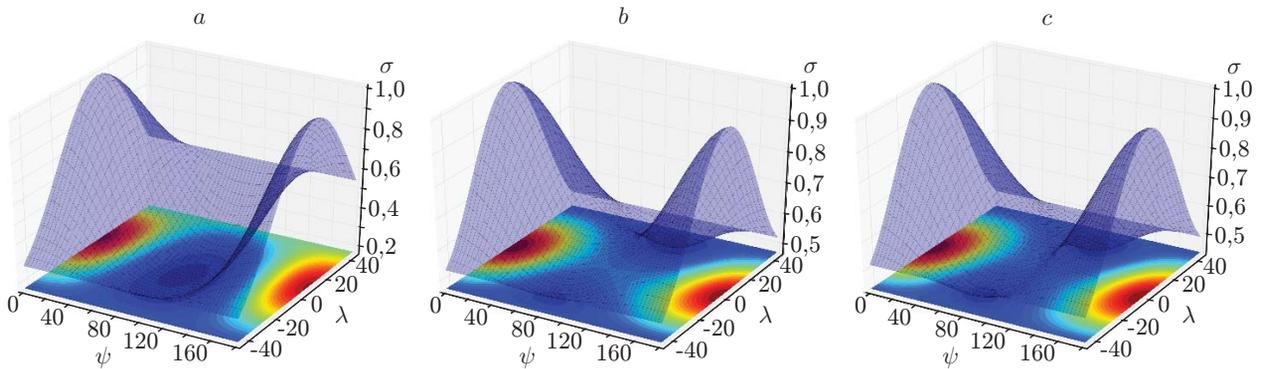


Рис. 4. Поляризационные сигнатуры (согласованная поляризация): *a* — SIR-C, *b* — PALSAR (восходящая орбита), *c* — PALSAR (нисходящая орбита)

обще структура наклонов ветвей в вертикальной плоскости разнообразна и зависит от локальной плотности деревьев.

На рис. 4 представлены классические сополяризованные сигнатуры, характеризующие усреднённые величины обратного радарного рассеяния, а на рис. 5 — фрактальные сополяризованные сигнатуры, описывающие пространственные вариации радарного эхосигнала.

На рис. 4, 5 по оси абсцисс отложен угол ориентации эллипса поляризации, по оси ординат — угол эллиптичности, по оси аппликат для классической сигнатуры (см. рис. 4) — усреднённая нормированная величина обратного радарного рассеяния, для фрактальной — фрактальная размерность.

Сигнатуры, представленные на рис. 4, сходны по содержанию и форме, но различаются по пьедестальной высоте, которая также является значимой характеристикой поляриметрического анализа. Однако в данной работе зависимость от пьедестальной высоты не рассматривается.

Исследуем зависимости от угла наклона поляризации, полагая, что зависимость от угла эллиптичности симметрична относительно линейной поляризации (0° по оси ординат). Построенная сигнатура (рис. 5, *a*) также имеет симметричное распределение относительно угла наклона поляризации 90° , который отвечает вертикальной согласованной поляризации. Значения фрактальной размерности более 2,85 [18] соответствуют существенным пространственным флуктуациям радиолокационного эхосигнала. При этом флуктуации коррелируют с пространственным распределением неоднородностей в виде стволов и крупных

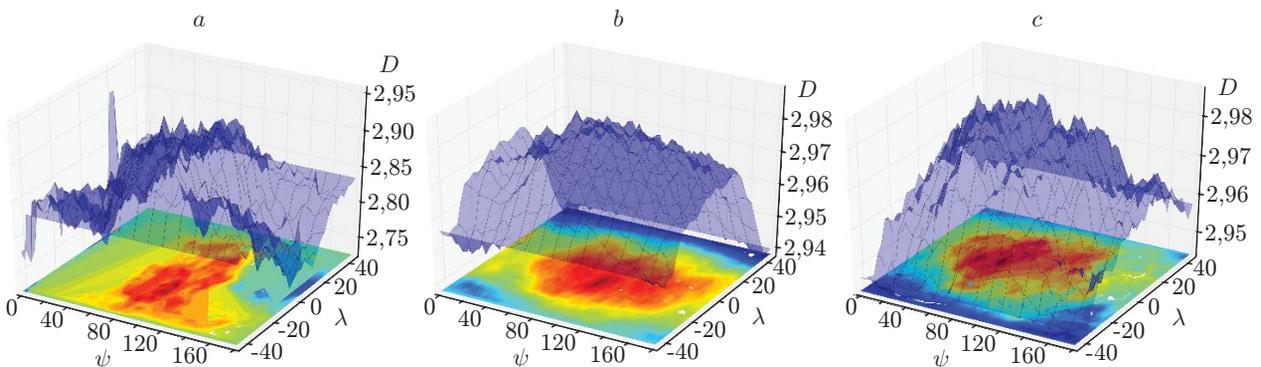


Рис. 5. Фрактальные поляризационные сигнатуры (согласованная поляризация): *a* — SIR-C, *b* — PALSAR (восходящая орбита), *c* — PALSAR (нисходящая орбита)

ветвей деревьев [19]. Определённая симметричность сигнатуры относительно угла ориентации эллипса 90° (вертикальная поляризация) связана с аналогичным распределением ветвей с западной и восточной сторон деревьев при зондировании в южном направлении (в случае SIR-C).

Для ALOS PALSAR при зондировании на восходящей орбите (см. рис. 2), т. е. в направлении на восток, отмечается распределение пространственных вариаций интенсивности (фрактальная размерность более 2,97) в диапазоне изменения углов наклона эллипса поляризации $90\text{--}170^\circ$ (рис. 5, *b*). При данной геометрии зондирования, когда нулевой угол ориентации эллипса поляризации совпадает с направлением на юг, подобное угловое распределение свидетельствует о том, что с южной стороны деревьев ветви образуют более густой слой отражения, а с северной стороны ветви располагаются реже, т. е. наблюдается анизотропия пространственного распределения ветвей.

Напротив, на нисходящих орбитах при зондировании в сторону запада (нулевой угол ориентации эллипса поляризации совпадает с направлением на север) пространственные вариации увеличиваются при углах ориентации эллипса поляризации $20\text{--}90^\circ$ (рис. 5, *c*), что также может быть обусловлено большей густотой ветвей, растущих в южную сторону.

Для сравнительной оценки результатов фрактального анализа по аналогии с [22] были построены поляризационные сигнатуры на основе расчёта локальных индексов Морана и Гири, которые по сути определяют пространственные флуктуации автокорреляционным методом. Указанные сигнатуры, как и классическая поляризационная сигнатура [16], не показали описанного выше эффекта.

Заключение. В данной работе предложен новый тип поляризационной сигнатуры для оценки структуры пространственных флуктуаций интенсивности обратного радарного рассеяния с помощью фрактального анализа, предполагающего самоподобие на различных пространственных масштабах. Физический механизм образования флуктуаций связан с влиянием спекл-шума и пространственных вариаций обратного радарного рассеяния вследствие неоднородностей рассеивающих объектов. Рассмотренная фрактальная сигнатура позволяет оценить анизотропию пространственного распределения дискретных неоднородностей, в частности ветвей деревьев. На основе анализа сигнатур, полученных при зондировании соснового леса, установлена азимутальная зависимость распределения интенсивности обратного радарного рассеяния, которая коррелирует с результатами полевого обследования распределения ветвей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шовенгердт Р. А.** Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений: Пер. с англ. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
2. **Борзов С. М., Потатуркин А. О., Потатуркин О. И.** Обнаружение изменений территории застройки на основе применения структурных признаков спутниковых изображений // Автометрия. 2015. **51**, № 4. С. 3–11.
3. **Захаров А. И., Яковлев О. И., Смирнов В. М.** Спутниковый мониторинг Земли: радиолокационное зондирование поверхности. М.: Либроком, 2012. 248 с.
4. **Richards J. A.** Remote Sensing with Imaging Radar. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 361 p.
5. **Ouchi K.** Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics // Remote Sensing. 2013. **5**, N 2. P. 716–807.
6. **Sinha S., Jeganathan C., Sharma L. K., Nathawat M. S.** A review of radar remote sensing for biomass estimation // Intern. Journ. Environmental Sci. and Technol. 2015. **12**, N 5. P. 1779–1792.

7. **Jawak S. D., Bidawe T. G., Luis A. J.** A review on applications of imaging synthetic aperture radar with a special focus on cryospheric studies // *Adv. Remote Sensing*. 2015. **4**, N 2. P. 163–175.
8. **Chen F., Lasaponara R., Masini N.** An overview of satellite synthetic aperture radar remote sensing in archaeology: From site detection to monitoring // *Journ. Cultural Heritage*. 2015. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S129620741500093X> (дата обращения: 24.11.2015).
9. **Cloude S. R.** *Polarisation: Applications in Remote Sensing*. N. Y.: Oxford University Press, 2009. 472 p.
10. **Lee J.-S., Pottier E.** *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2009. 438 p.
11. **Treuhaft R. N., Siqueira P. R.** Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar // *Radio Sci.* 2000. **35**, N 1. P. 141–177.
12. **Papathanassiou K. P., Cloude S. R.** Single-baseline polarimetric SAR interferometry // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*. 2001. **39**, N 11. P. 2352–2363.
13. **Neumann M., Ferro-Famil L., Reigber A.** Estimation of forest structure, ground, and canopy layer characteristics from multibaseline polarimetric interferometric SAR data // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*. 2010. **48**, N 3. P. 1086–1104.
14. **Reigber A., Moreira A.** First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*. 2000. **38**, N 5. P. 2142–2152.
15. **Tebaldini S.** Single and multipolarimetric SAR tomography of forested areas: A parametric approach // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*. 2010. **48**, N 5. P. 2375–2387.
16. **Van Zyl J. J., Zebker H. A., Elachi C.** Imaging radar polarization signatures: theory and observation // *Radio Sci.* 1987. **22**, N 4. P. 529–543.
17. **De Grandi G., Lee J.-S., Schuler D., Nezry E.** Texture and speckle statistics in polarimetric SAR synthesized images // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*. 2003. **41**, N 9. P. 2070–2088.
18. **Чимитдоржиев Т. Н., Архинчеев В. Е., Дмитриев А. В., Цыдыпов Б. З.** Фрактальный анализ радиолокационных поляриметрических данных для классификации земных покровов // *Исследование Земли из космоса*. 2007. № 4. С. 27–33.
19. **Чимитдоржиев Т. Н., Архинчеев В. Е., Дмитриев А. В.** Поляриметрическая оценка пространственных флуктуаций радарных изображений для восстановления структуры лесного полога // *Исследование Земли из космоса*. 2007. № 5. С. 80–82.
20. **Mandelbrot B. B., van Ness J. W.** Fractional Brownian motions, fractional noises and applications // *SIAM Rev.* 1968. **10**, N 4. P. 422–437.
21. **Tustison N., Gee J.** Stochastic fractal dimension image // *The Insight Journ.* 2009. URL: <http://hdl.handle.net/1926/1525> (дата обращения: 24.11.2015).
22. **Myint S. W.** Fractal approaches in texture analysis and classification of remotely sensed data: comparisons with spatial autocorrelation techniques and simple descriptive statistics // *Intern. Journ. Remote Sensing*. 2003. **24**, N 9. P. 1925–1947.

Поступила в редакцию 24 ноября 2015 г.