

ТЕКСТУРНО-ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ СТАНЦИЯМИ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

© 2023 г. А. А. Потапов^а, *, В. А. Кузнецов^б

^а Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, корп. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

^б Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия
им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина”,
ул. Старых Большевиков, 54А, Воронеж, 394064 Российская Федерация

*E-mail: potapov@cplire.ru

Поступила в редакцию 24.04.2023 г.

После доработки 01.08.2023 г.

Принята к публикации 03.08.2023 г.

Приведены все известные в настоящее время методы и способы формирования фрактальных признаков поляриметрических радиолокационных изображений. Кратко рассмотрен новый текстурно-фрактальный признак — направленная мультифрактальная сигнатура, измеряемая морфологически методом итерационных покрытий. Применительно к анализу поляриметрических изображений, формируемых радиолокационной станцией с синтезированной апертурой, предложена новая концепция их обработки, основанная на возможности учета поляризационных отличий наземных пространственно-распределенных объектов с помощью выявления мультифрактальных и анизотропных свойств их текстуры. Показан вариант интерпретации полученных результатов для автоматизации дальнейшего успешного решения специфических задач сегментации (классификации) подстилающей поверхности, обнаружения и распознавания наземных объектов.

DOI: 10.31857/S0033849423100145, EDN: DPWRXU

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время обладание своевременной и достоверной информацией о нашей планете является важнейшим фактором успешного решения прикладных задач как глобального, так и локального характера. Новые технологические достижения, реализуемые в современных системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), и прежде всего широко внедряемые в образцах космической и авиационной техники средства автоматизации и вычислительной техники, фундаментальным образом меняют характер и содержание мониторинга подстилающей поверхности. Это находит отражение во многих областях жизнедеятельности человека — от картографирования и мониторинга последствий чрезвычайных ситуаций до военных и сельскохозяйственных задач.

Огромный объем и многомерность данных, формируемых сенсорами различных диапазонов электромагнитных волн (ЭМВ), обуславливают необходимость поиска и развития новых, более эффективных по информативности и достоверности подходов к анализу сложно формализуемых данных, получаемых зачастую в очень сложных условиях, в том числе помеховых и погодных. К

таким подходам авторы уверенно относят текстурный анализ, основанный на фрактальных параметрах, что позволяет извлечь больше информации о наземных объектах, расположенных на поверхности Земли, по сравнению с анализом по энергетическим (яркостным) характеристикам изображений, формируемых средствами ДЗЗ.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Одним из основных средств дистанционного зондирования Земли являются радиолокационные станции с синтезированной апертурой (РСА) космического и воздушного (в том числе беспилотного) базирования — как самостоятельные средства мониторинга [1], осуществляющие непрерывное наблюдение земной (морской) поверхности и объектов на больших дальностях независимо от времени суток и метеорологических условий (рис. 1).

Одним из перспективных направлений совершенствования РСА в целях повышения достоверности тематического анализа, представленных на рис. 2, является реализация поляриметрического



Рис. 1. Преимущества радиолокационных систем.

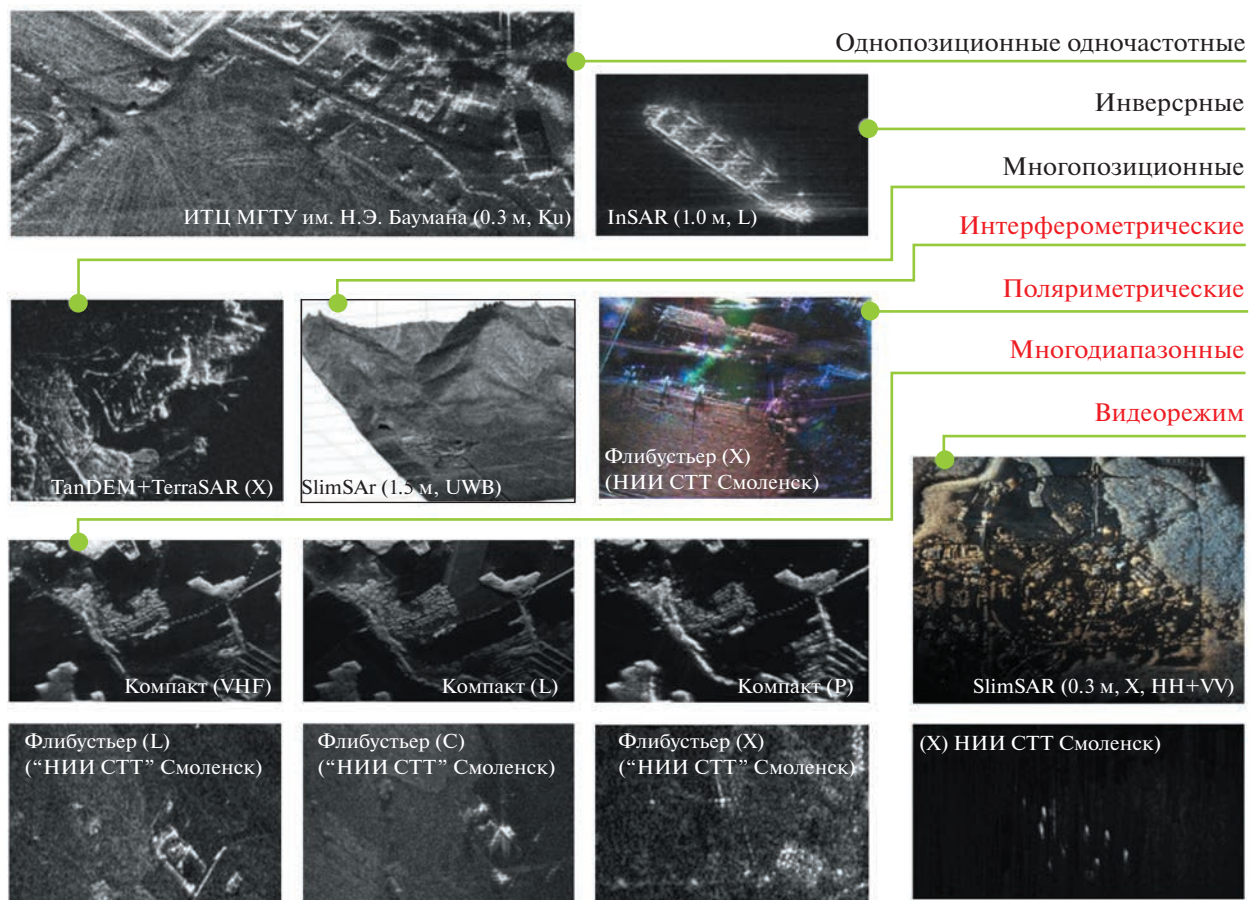


Рис. 2. Направления совершенствования РСА и примеры формируемых РЛИ.

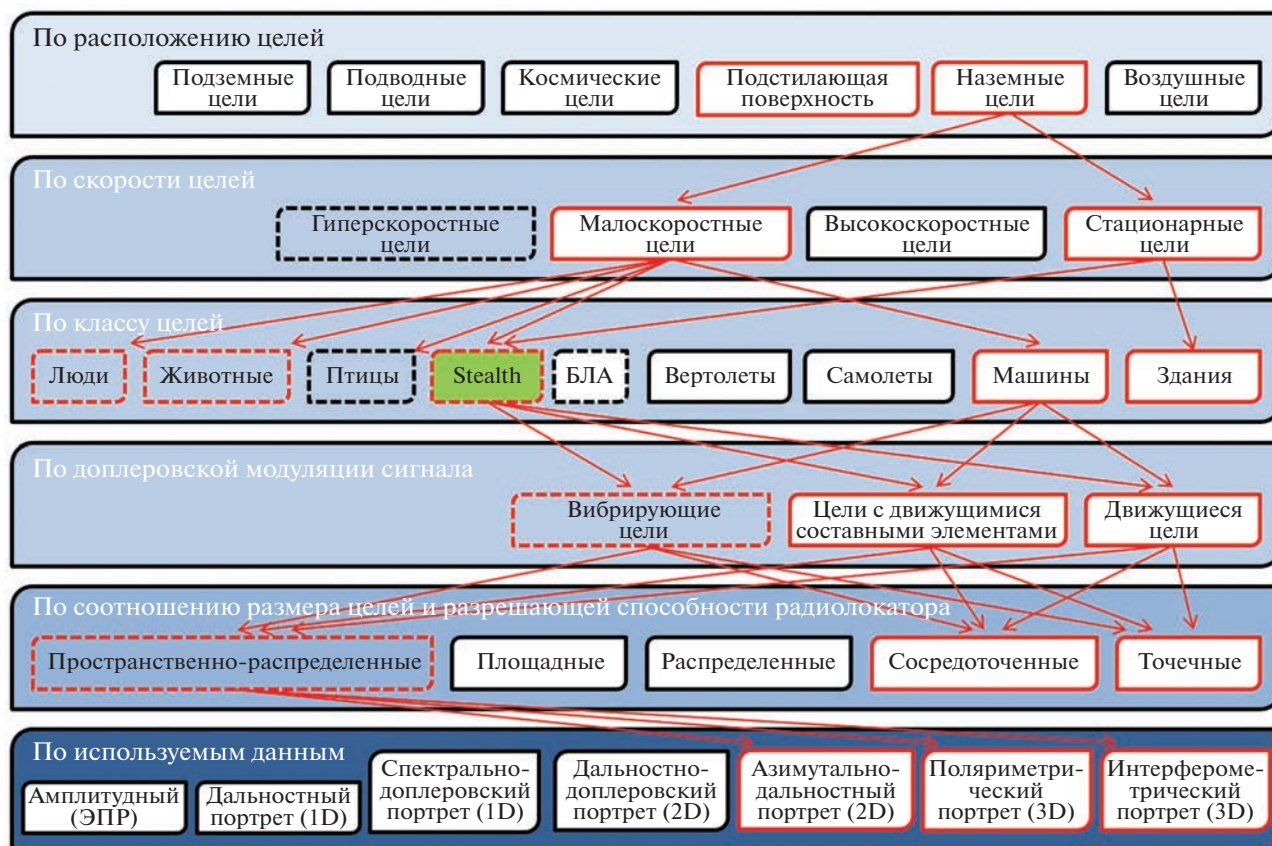


Рис. 3. Пример классификации радиолокационных наземных целей (БЛА – беспилотные летательные аппараты).

режима съемки с формированием радиолокационных изображений (РЛИ) высокого разрешения.

Если современные РСА обладают высокой разрешающей способностью, то наземные объекты, представляющие интерес при решении прикладных задач ДЗЗ, на двумерных РЛИ занимают несколько десятков элементов разрешения (пикселей) [2], а на интерферометрических РЛИ – несколько сотен вокселей. Тогда такие объекты необходимо классифицировать как пространственно-распределенные с проявлением их уникальных топологических сигнатур (рис. 3).

Поскольку поляризационные отличия пространственно-протяженных радиолокационных объектов добавляют информацию в топологию их радиолокационных портретов, применение математического аппарата теории фракталов приобретает все большую востребованность [3–5]. Однако при создании единого (универсального) научно-методического подхода к текстурно-фрактальному анализу многомерных РЛИ вопросы оценки фрактальной (ФР) и мультифрактальной (МФР) размерностей и сигнатур в контексте учета поляризации зондирующих сигналов остаются в настоящее время мало изученными.

Цель работы – исследовать процесс формирования и ввести в научный обиход новый признак направленной мультифрактальной сигнатуры поляриметрических РЛИ для дальнейшего успешного решения задач классификации подстилающей поверхности, автоматического обнаружения и распознавания наземных пространственно-распределенных объектов.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Базовым описанием поляризационных характеристик объектов радиолокации является поляризационная матрица рассеяния (ПМР) $\mathcal{S}$, представляющая собой матрицу комплексных коэффициентов отражения $\mathcal{S}_{ab}$ при облучении объекта двумя сигналами с ортогональной поляризацией ($a, b = \text{В}, \Gamma$ – вертикальная и горизонтальная поляризации) и приеме отраженного сигнала двухкомпонентной антенной в том же поляризационном базисе:

$$\dot{\mathcal{S}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{S}}_{\Gamma\Gamma} & \dot{\mathcal{S}}_{\Gamma\text{В}} \\ \dot{\mathcal{S}}_{\text{В}\Gamma} & \dot{\mathcal{S}}_{\text{ВВ}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

при этом, в случае моностатической радиолокации, кросс-поляризационные составляющие принимают равными $\dot{S}_{\text{ВГ}} = \dot{S}_{\text{ГВ}}$, что, зачастую, не соответствует действительности.

Результаты поиска возможностей достоверной интерпретации поляриметрической информации, проводимого рядом авторов [5–10], показали, что к выделению поляризационных характеристик объектов существует, как минимум, четыре принципиально различных подхода, определяющих методологию как когерентной, так и некогерентной обработки поляриметрических РЛИ:

- когерентная декомпозиция ПМР (1) объекта – представление собственными числами и собственными векторами, которые определяются некоторым характеристическим уравнением и рядом вещественных параметров (“заметность или величина объекта”, “угол скольжения объекта”, “угол поляризации объекта”) [10];

- феноменологическая декомпозиция ПМР объекта – определение коэффициентов подобия объекта сфере, двугранному отражателю и спирали [11, 12];

- декомпозиция ковариационной матрицы объекта – представление ЭМВ в виде частично-поляризованной волны, предполагающее усреднение измеряемых данных для нахождения статистик второго порядка: на основе лексикографической векторизации ПМР объекта в трехмерном пространстве формируется ковариационная матрица, содержащая в недиагональных элементах коэффициенты корреляции между элементами ПМР объекта и характеризующие “поверхностное рассеяние”, “двугранность”, “объемное рассеяние” и “спиральность” объекта [13, 14];

- декомпозиция матрицы когерентности объекта – описание поляризационных свойств объекта, содержащихся в ПМР, совокупностью коэффициентов “подобия” объекта теоретическим эталонам: ПМР приводится к системе матриц Паули, что дает вектор рассеяния, на основе которого формируется матрица когерентности, имеющая три положительных собственных числа и три ортогональных собственных вектора, связанные с различными типами рассеяния и образующие систему параметров: “ориентация отражателя”, “тип рассеяния”, “энтропия рассеяния” и “анизотропия рассеяния” [15–17]).

Результаты анализа известных подходов к интерпретации поляриметрических данных показывают, что, несмотря на многообразие методов декомпозиции, получаемые на их основе поляризационные характеристики в ряде случаев либо не инвариантны, либо взаимозависимы (коррелированы), и не образуют полного множества параметров объекта, позволяющих однозначно классифицировать типы подстилающей поверхности, достоверно обнаруживать и распознавать назем-

ные объекты на РЛИ (при несомненном и существенном повышении эффективности решения данных задач за счет поляризационных отличий или идентификации механизма рассеяния ЭМВ).

Поскольку ПМР является энергетической оценкой элемента разрешения РЛИ, расчет вышеуказанных коэффициентов, характеризующих ряд механизмов рассеяния, выполняется для каждого элемента разрешения (пикселя) РЛИ. В случае высокого разрешения поляриметрических РЛИ, топология радиолокационного портрета объекта имеет внутреннюю текстуру, характерную для конкретного класса или типа цели. Поэлементное (для каждого пикселя) вычисление поляризационных характеристик объекта не позволяет с помощью существующих методов декомпозиции выполнить текстурно-фрактальный анализ в интересах сегментации (классификации) подстилающей поверхности, автоматического обнаружения и распознавания наземных объектов, что обуславливает постановку задачи: с помощью предложенного в [18–20] фрактального признака – направленной морфологической мультифрактальной сигнатуры (НММФС) – исследовать и интерпретировать поляризационные характеристики пространственно-распределенных объектов.

3. ИЗВЕСТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ФРАКТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В прикладной теории фракталов [3–5, 21–24] ряд существенных задач, связанных с вычислением фрактальных характеристик поляриметрических РЛИ, остаются до настоящего времени нерешенными [25]. Приведем далее достаточно известные, но пока малочисленные, методы решения. Так, например, известны методы оценки фрактальной размерности цветных изображений, сформированных в видимом диапазоне частот ЭМВ [26–28]. Изображение рассматривается как пятимерный массив значений яркости $F = f(x, y, R, G, B)$, где x, y – координаты пикселя каждого изображения, R, G, B – красная, зеленая и синяя компоненты цветного изображения. В работе [26] фрактальная размерность цветного изображения D_{color} рассчитывается в соответствии с выражением:

$$D_{\text{color}} = 2 + D_R + D_G + D_B, \quad (2)$$

где $D_R = D_{\text{IDBC}(R)} - 2$, $D_G = D_{\text{IDBC}(G)} - 2$, $D_B = D_{\text{IDBC}(B)} - 2$ – значения фрактальной размерности каждой из RGB-составляющих, рассчитанные усовершенствованным разностным методом кубов (Improved Differential Box Counting, IDBC) [29]. Поскольку используются 24-битные цветные изображения, в [26] для повышения точности оценки фрактальной размерности предложено

шесть комбинаций формирования цвета пикселя изображения $I_{x,y}$:

$$\begin{aligned} I_{x,y}(i) &= R_{x,y} \times 2^{16} + G_{x,y} \times 2^8 + B_{x,y} \times 2^0; \\ I_{x,y}(i) &= R_{x,y} \times 2^{16} + B_{x,y} \times 2^8 + G_{x,y} \times 2^0; \\ I_{x,y}(i) &= G_{x,y} \times 2^{16} + R_{x,y} \times 2^8 + B_{x,y} \times 2^0; \\ I_{x,y}(i) &= G_{x,y} \times 2^{16} + B_{x,y} \times 2^8 + R_{x,y} \times 2^0; \\ I_{x,y}(i) &= B_{x,y} \times 2^{16} + G_{x,y} \times 2^8 + R_{x,y} \times 2^0; \\ I_{x,y}(i) &= B_{x,y} \times 2^{16} + R_{x,y} \times 2^8 + G_{x,y} \times 2^0; \\ I_{x,y} &= \frac{\sum_{i=1}^6 I_{x,y}(i)}{3}. \end{aligned} \quad (3)$$

По изображению, сформированному в соответствии с соотношением (3), тем же методом IDBC [29] рассчитывается значение фрактальной размерности $D_{24 \text{ бит}}$. Как показали результаты оценки ФР по цветным изображениям из альбома Бродаца [30] и модельным изображениям, точность вычислений $D_{24 \text{ бит}}$ оказалась достаточно высокой и адекватной задаваемым при моделировании значениям ФР. Примечательно, что после известного преобразования цветного изображения в полутоновое в градациях серого согласно выражению

$$I_{\text{сер}} = 0.2989R + 0.5870G + 0.1140B, \quad (4)$$

полученные значения ФР также вполне адекватны задаваемым. Следует отметить, что, несмотря на известное представление поляриметрических данных в формате RGB-изображения, рассмотренный подход невозможно применить для интерпретации поляризационных РЛИ, поскольку отсутствует учет механизмов рассеяния ЭМВ даже на примитивных (эталонных) объектах, позволяющий выявить отличия.

В работе [31] для определения наличия анизотропии в шероховатости поверхности и/или повышения точности оценки фрактальной размерности предложен метод формирования фрактального изображения на основе полно-поляриметрических радиолокационных данных, полученных с помощью PCA AirSAR L-диапазона. Результирующее изображение формируется в соответствии с выражением

$$I_1 = \frac{2S_{\text{ГВ}}}{S_{\text{ВВ}} - S_{\text{ГГ}}}. \quad (5)$$

С учетом выражения для ПМР в соответствии с двухмасштабной поляриметрической моделью [32]

соотношение (5) можно переписать следующим образом:

$$I_1 = \frac{2\text{tg}\beta}{1 - \text{tg}^2\beta} = \text{tg}2\beta, \quad (6)$$

где β — локальный угол визирования, связанный с азимутальным наклоном $\vartheta_{\text{аз}}$, наклоном дальности ϑ_r и углом визирования ϑ_0 выражением

$$\text{tg}\beta = \frac{\vartheta_{\text{аз}}}{-\vartheta_r \cos \vartheta_0 + \sin \vartheta_0}. \quad (7)$$

Несложно заметить, что подстановка (7) в (6) с аппроксимацией первого порядка позволяет сделать вывод о зависимости I_1 только от азимутальных углов наблюдения. Изображение I_1 (5) может быть применено для оценки фрактальной размерности [33] только при неравных составляющих в знаменателе, что не всегда возможно, особенно при малых углах наблюдения (линия визирования практически перпендикулярна к поверхности, когда велик уровень спекл-шума при большой мощности отражения). Поэтому в большинстве практических ситуаций может быть использована комбинация элементов поляриметрической матрицы когерентности $\mathbf{T}$ [34]:

$$I_2 = \frac{4 \text{Re} \left(\left\langle (S_{\text{ГГ}} - S_{\text{ВВ}}) S_{\text{ГВ}}^* \right\rangle \right)}{4 \left\langle |S_{\text{ГВ}}|^2 \right\rangle - \left\langle |S_{\text{ГГ}} - S_{\text{ВВ}}|^2 \right\rangle}, \quad (8)$$

где $\langle \cdot \rangle$ — операция усреднения, $\text{Re}(\cdot)$ — действительная часть. По аналогии с (6) и (7), выражение (8) можно преобразовать к следующему виду:

$$I_2 = \text{tg}4\beta. \quad (9)$$

В работе [35] рассмотрен оригинальный подход к интерпретации поляриметрических РЛИ. Предложена фрактальная поляризационная сигнатура поляриметрических РЛИ, основанная на вычислении ФР каждого изображения или, в случае формирования поля ФР (называемого также “фрактальным изображением” или “фрактальной картой”), окрестности каждого пикселя по наклону аппроксимированной с помощью линейной регрессии зависимости $E(\Delta I_{\Delta r})$ от Δr , где $E(\cdot)$ — операция усреднения,

$$\begin{aligned} \Delta I_{\Delta r} &= |I(x_2, y_2) - I(x_1, y_1)|, \\ \Delta r &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \end{aligned}$$

в двойном логарифмическом масштабе с последующим усреднением полученных значений относительно набора углов соответственно ориентации и эллиптичности поляризационного эллипса:

$$\{\Psi_i\}_{i=0}^N \quad \text{и} \quad \{\chi_j\}_{j=0}^M.$$

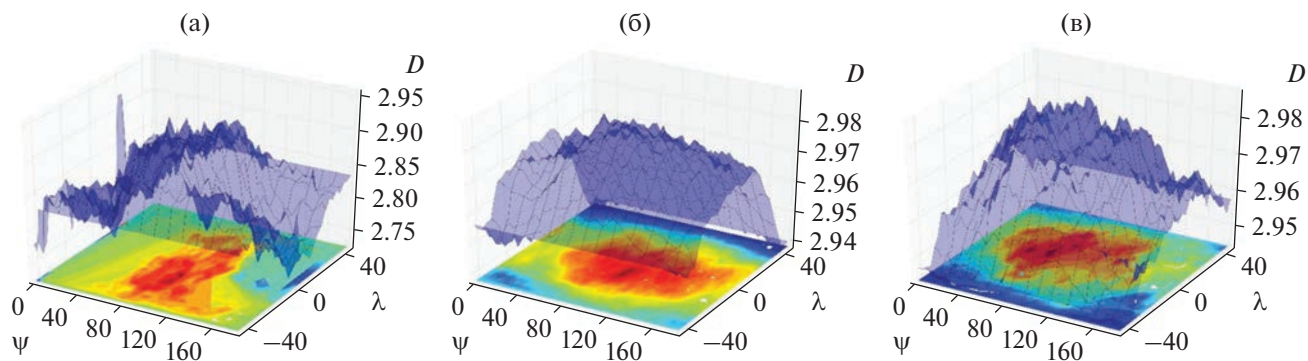


Рис. 4. Фрактальные поляризационные сигнатуры РЛИ PCA SIR-C (а), PALSAR (восходящая орбита) (б) и PALSAR (нисходящая орбита) (в).

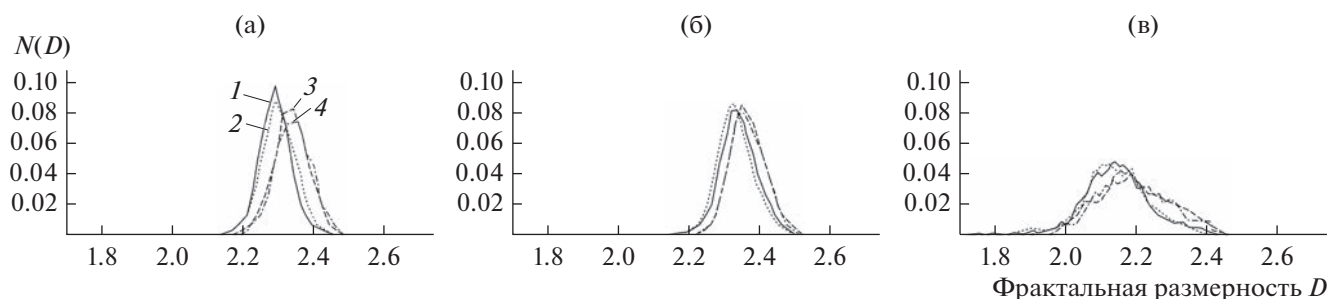


Рис. 5. Гистограммы значений ФР фрагментов РЛИ, соответствующих лицевому (а) и затененному (б) склону вулкана и городской застройке (в): кривая 1 – ВВ-поляризация, 2 – ГГ, 3 – ВГ, 4 – ГВ.

Результатом вычислений являются фрактальные поляризационные сигнатуры, для случая ко-поляризации (рис. 4). Такой подход действительно позволяет исследовать пространственную структуру поляриметрических РЛИ, однако само по себе усреднение значений ФР по всему поляризационному базису приводит к нивелированию поляризационных отличий в РЛП пространственно-протяженных целей.

С практической точки зрения представляет интерес зависимость фрактальных признаков от поляризационных эффектов и условий радиолокационного наблюдения. Так, в работе [36] представлены гистограммы значений ФР трех фрагментов поляриметрических изображений разрешением 3×3 м PCA COSMO-SkyMed (рис. 5).

На основании результатов анализа гистограмм, в [36] сделан вывод о независимости значений ФР от поляризации РЛИ как естественных, так и искусственных объектов, за исключением отличий между коллинеарными и кросс-поляризациями вследствие малого отношения сигнал-шум последних. Следует обратить внимание, что исследование проводилось только для ФР. В качестве комментария к выводам статьи [36], авторы дан-

ной статьи полагают, такой эффект может наблюдаться только для площадных объектов и условно низкого разрешения РЛИ с изотропностью (ненаправленностью) или отсутствием текстур подстилающей поверхности, соизмеримых с длиной волны РСА. Вместе с тем в работах [37, 38] представлены гистограммы значений ФР радиолокационных портретов различных наземных объектов, полученных в рамках программы MSTAR в X-диапазоне на одной линейной поляризации, в которых явным образом просматривается существенная зависимость от угла места наблюдения. В [37, 38] сделан вывод о причинах отличий ФР – появлении эффектов многократного переотражения ЭМВ и радиолокационной тени при больших (относительно вертикали) углах наблюдения.

Таким образом, известные подходы к формированию фрактальных признаков на основе поляриметрических данных не позволяют в полной мере их интерпретировать с учетом фрактальных характеристик текстуры пространственно-распределенных объектов в интересах сегментации (классификации) типов подстилающей поверхности, обнаружения и распознавания наземных объектов.

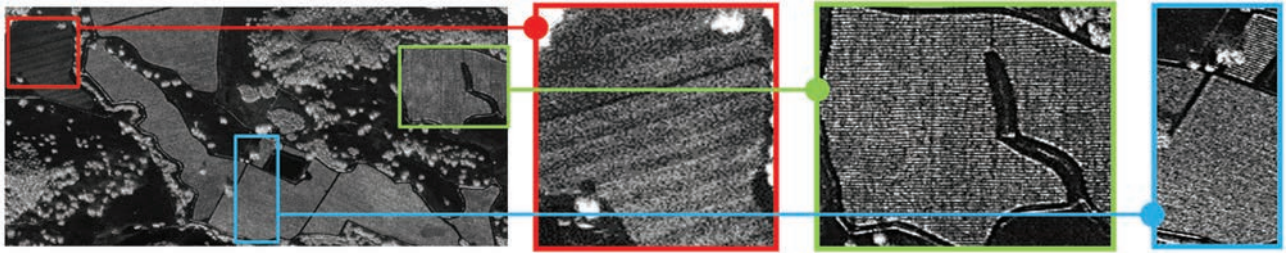


Рис. 6. Пример анизотропных текстур на РЛИ.

4. НАПРАВЛЕННАЯ МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНАЯ СИГНАТУРА

Для учета анизотропии текстуры РЛИ (рис. 6) при обеспечении высокой точности оценки значений фрактальных характеристик независимо от динамического диапазона изображений в работах [18–20] предложен морфологический метод измерения нового фрактального признака – направленной морфологической мультифрактальной сигнатуры (НММФС) одночастотных РЛИ.

Метод позволяет одновременно оценивать практически все известные фрактальные параметры (за исключением лакуарности) с учетом анизотропии и формировать соответствующие им изображения с помощью единого научно-методического аппарата, за счет чего исключаются потери информации при раздельном вычислении всех признаков различными методами (способами, алгоритмами) и достигается синергетический эффект применения данного подхода. Суть предложенного метода представлена схемой

$$\begin{array}{c}
 I(i, j) \xrightarrow{F_R} \{I_n(i, j)\} \xrightarrow{\begin{array}{l} \nearrow F_U \\ \searrow F_B \end{array}} \begin{array}{l} U_{\varepsilon, n}(i, j) \\ B_{\varepsilon, n}(i, j) \end{array} \xrightarrow{F_Z} \\
 \xrightarrow{F_Z} Z(q, \varepsilon, n) \xrightarrow{F_L} L(q, \varepsilon, n) \xrightarrow{F_{LS}} S_{q, \varepsilon, n} \xrightarrow{F_{2S}} S_{q, \varepsilon, n_{q, \varepsilon}}.
 \end{array} \quad (10)$$

Здесь

$$\Lambda = [I(i, j)], I(i, j) \in \{0, \dots, 2^v - 1\}, \\
 i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}$$

– цифровое полутоновое изображение, содержащее M строк и N столбцов, представленное в виде матрицы элементов (пикселей) с квантованными уровнями яркости в соответствующем пикселе изображения, v – степень квантования яркости; $\Lambda(n) = \{[I_n(i, j)]\}$ – массив повернутых копий изображения Λ ($n = \overline{0, n_{\max} - 1}$ – число поворотов (направлений анализа изображения)); $U_{\varepsilon, n}(i, j), B_{\varepsilon, n}(i, j)$ – набор “верхних” и “нижних” поверхностей, сформированных в результате морфологической обработки $\Lambda(n)$ (где $\varepsilon = \overline{1, \varepsilon_{\max} - 1}$ – число анализируемых масштабов); $Z(q, \varepsilon, n)$ – обобщенная статистическая сумма с числом порядков скейлинговых моментов $-\infty < q < \infty$; $L(q, \varepsilon, n)$ – локальные морфологические мультифрактальные экспоненты (ЛММЭ), сформированные для n направлений анализа; $S_{q, \varepsilon, n}$ – тензор неутонченной НММФС; $S_{q, \varepsilon, n_{q, \varepsilon}}$ – уточненная НММФС ($n_{q, \varepsilon} \in n$ – номер поворота (направление анализа) изображения, соответствующее пре-

обладающему направлению ориентации элементов текстуры); F_R – функция формирования набора повернутых копий $\Lambda(n)$ исходного изображения Λ ; F_U и F_B – функции расчета соответственно дилатации и эрозии $\Lambda(n)$; F_Z – функция расчета обобщенной статистической суммы $Z(q, \varepsilon, n)$; F_L – функция расчета ЛММЭ $L(q, \varepsilon, n)$; F_{LS} – оператор формирования $S_{q, \varepsilon, n}$; F_{2S} – оператор, осуществляющий выбор преобладающего направления ориентации элементов текстуры для каждого масштаба анализа из набора $L_{q, \varepsilon, n}$ и формирования $S_{q, \varepsilon, n_{q, \varepsilon}}$.

Метод (10) заключается в практической реализации следующих этапов:

1) итерационное морфологическое формирование “верхних” и “нижних” покрытий с помощью операций соответственно дилатации (наращивания) и эрозии поворачивающимся в дискретном диапазоне углов $0^\circ \dots 180^\circ$ структурирующим элементом “строка”, длина w которого соответствует масштабу $w = 2\varepsilon + 1$. Для масштаба $\varepsilon = 0$ получаем

$$\begin{array}{l}
 U_0(i, j) = B_0(i, j) = I(i, j), \text{ при} \\
 i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N},
 \end{array} \quad (11)$$

для масштабов $\varepsilon \geq 1$

$$U_{\varepsilon,n}(i,j) = \max \left\{ I_n(i,j); \max_{(i',j') \in X_\varepsilon} I_n(i',j') \right\}; \quad (12)$$

$$B_{\varepsilon,n}(i,j) = \min \left\{ I_n(i,j); \min_{(i',j') \in X_\varepsilon} I_n(i',j') \right\}, \quad (13)$$

где $X_\varepsilon = I_n(i, j - (w-1)/2 \leq j \leq j + (w-1)/2)$ – область структурирующего элемента на масштабе ε ;

2) вычисление значений “объема” между исходным изображением и итерационными покрытиями $V_{\varepsilon,n}(i,j)$ в окне размером $W \times W$

$$V_{\varepsilon,n}(i,j) = \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W (U_{\varepsilon,n}(i,j) - B_{\varepsilon,n}(i,j)); \quad (14)$$

3) оценка площади поверхности

$$S_{\varepsilon,n}(i,j) = \frac{V_{\varepsilon,n}(i,j)}{2\varepsilon} \quad (15)$$

или, альтернативно, следующим образом:

$$S'_{\varepsilon,n}(i,j) = \frac{V_{\varepsilon+1,n}(i,j) - V_{\varepsilon,n}(i,j)}{2}; \quad (16)$$

4) расчет обобщенной статистической суммы $Z_{q,\varepsilon,n}$ как функции распределения меры мультифрактального множества q -го порядка на каждом анализируемом масштабе для каждого повернутого изображения

$$Z(q, \varepsilon, n) = S_{\varepsilon,n}(i,j) \times \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W \left(\frac{|U_{\varepsilon,n}(i,j) - B_{\varepsilon,n}(i,j)|}{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W U_{\varepsilon,n}(i,j) - B_{\varepsilon,n}(i,j)} \right)^q, \quad (17)$$

где порядок q скейлингового момента лежит в диапазоне значений $q \in \mathbb{Z}$, $q \neq 0$, здесь $\mathbb{Z}$ – множество целых чисел;

5) формирование МФС путем определения обобщенной статистической суммы $Z(q, \varepsilon, n)$ между соседними масштабами анализа, для чего выполняется расчет ЛММЭ $L_{q,\varepsilon,n}$ в соответствии с выражением

$$L(q, \varepsilon, n) = \frac{\lg Z(q, \varepsilon + 1, n) - \lg Z(q, \varepsilon, n)}{\lg \left(\frac{1}{\varepsilon + 1} \right) - \lg \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)}. \quad (18)$$

Формирование тензора неутонченной НММФС $S_{q,\varepsilon,n}$ осуществляется в соответствии с общим видом:

$$S_{q,\varepsilon,n} = \begin{bmatrix} L_{-\infty}(\varepsilon_2) & L_{-\infty}(\varepsilon_3) & \dots & L_{-\infty}(\varepsilon_{\max}) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ L_{-1}(\varepsilon_2) & L_{-1}(\varepsilon_3) & \dots & L_{-1}(\varepsilon_{\max}) \\ L_1(\varepsilon_2) & L_1(\varepsilon_3) & \dots & L_1(\varepsilon_{\max}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{\infty}(\varepsilon_2) & L_{\infty}(\varepsilon_3) & \dots & L_{\infty}(\varepsilon_{\max}) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где $L_q(\varepsilon) = [L_q(\varepsilon, 0) \ L_q(\varepsilon, 1) \ \dots \ L_q(\varepsilon, n_{\max} - 1)]^T$ – вектор-столбец ЛММЭ $n = 0, n_{\max} - 1$ – направлений q -го порядка заданного масштаба анализа ε , T – оператор транспонирования.

Выявление анизотропных свойств анализируемого изображения возможно при реализации процедуры определения преобладающих направлений ориентации текстуры, основанной на аппроксимации эллипсами значений ЛММЭ $L_q(\varepsilon)$ в полярной системе координат и определении их большой a и малой b полуосей, коэффициента эллиптичности $k_3(q, \varepsilon)$ и угла $\psi(q, \varepsilon)$ наклона эллипса. Выбор преобладающего направления ориентации элементов текстуры (номера поворота) для $L_q(\varepsilon, n_{q,\varepsilon}) \in L_q(\varepsilon)$ проводится в соответствии с правилом

$$n_{q,\varepsilon} = \begin{cases} 0, & \text{если } k_3(q, \varepsilon) \geq 0.75; \\ \left\lfloor \frac{\pi - \psi(q, \varepsilon)}{\Delta\theta} \right\rfloor, & \text{если } k_3(q, \varepsilon) < 0.75, \end{cases} \quad (20)$$

где $\lfloor \bullet \rfloor$ – оператор округления до ближайшего целого в меньшую сторону.

Направленная морфологическая мультифрактальная сигнатура с уточненными в соответствии с выражением (20) значениями ЛММЭ $L_q(\varepsilon, n_{q,\varepsilon})$ может быть представлена в виде матрицы

$$S_{q,\varepsilon}^{\text{опт}} = \begin{bmatrix} L_{q \min}(\varepsilon_2, n_{q \min, 1}) & \dots & L_{q \min}(\varepsilon_{\max}, n_{q \min, \varepsilon_{\max}}) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ L_{-1}(\varepsilon_2, n_{-1, 1}) & \dots & L_{-1}(\varepsilon_{\max}, n_{-1, \varepsilon_{\max}}) \\ L_1(\varepsilon_2, n_{1, 1}) & \dots & L_1(\varepsilon_{\max}, n_{1, \varepsilon_{\max}}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{q \max}(\varepsilon_2, n_{q \max, 1}) & \dots & L_{q \max}(\varepsilon_{\max}, n_{q \max, \varepsilon_{\max}}) \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Формируемые с помощью метода НММФС в заданном диапазоне масштабов мультифрактальные сигнатуры адекватны общеизвестному предположению о масштабно-инвариантном характере фрактальных поверхностей. Мультифрактальный, сингулярный и анизотропный характер реальных изображений наиболее полно может быть описан новым текстурным признаком. Данный признак является наиболее репрезентативным по сравнению с известными, поскольку обеспечивается функциональная взаимосвязь извлекаемых при-

знаков — одновременное вычисление одним методом с уточнением их значений в соответствии с преобладающим направлением ориентации элементов текстуры изображения. Результаты проведенных авторами исследований показали возможность обработки с помощью нового метода как фрактальных изображений, так и изображений, не обладающих фрактальными свойствами, что свидетельствует о целесообразности и потенциально высокой эффективности применения метода НММФС в задачах сегментации изображений, обнаружения и распознавания распределенных объектов.

На основе рассмотренного метода НММФС [18] авторами разработан оригинальный способ комплексирования синхронно получаемых многодиапазонных РЛИ [37–39], в котором впервые реализовано слияние текстурных характеристик изображений с формированием результирующего фрактального изображения. Так же, как и в случае одночастотных РЛИ, метод формирования признака НММФС многодиапазонных РЛИ обеспечивает синергетический эффект — повышение полноты и достоверности фрактального анализа за счет единства вычислений (свойства эмерджентности сложной системы) на основе фрактального подхода. На основе фрактального подхода в целях комплексирования многодиапазонных РЛИ предложен критерий обоснования оптимальных параметров зондирующих сигналов многоканальной РСА, обеспечивающих максимальную точность оценки фрактальных характеристик. Вместе с тем, применение предложенного фрактального подхода для интерпретации поляриметрических данных ранее не было рассмотрено.

5. ФОРМИРОВАНИЕ НММФС ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ РЛИ

Как известно, повышение информативности радиолокационного мониторинга за счет применения поляриметрии основано на интерпретации механизмов рассеяния ЭМВ. Вследствие высокой разрешающей способности современных поляриметрических РСА, когда составные части пространственно-протяженных объектов соответствуют элементам (пикселям) изображений, появляется возможность выявления поляризационных отличий текстур РЛП наземных целей в интересах их обнаружения и распознавания. Очевидно, что помимо отличий в ПМР каждого элемента разрешения (пикселя) РЛИ текстура РЛП объектов и ее характеристики также оказываются разными, что позволяет обосновать применимость текстурно-фрактального анализа поляриметрических данных.

В теории и практике фрактального анализа известна параметрическая интерпретация мультифрактального спектра $f(\alpha)$ [40], используемая, в основном, для классификации типов подстилаю-

щей поверхности на одночастотных РЛИ, полученных на одной поляризации. Как показано на рис. 7, основными параметрами МФС являются: $\alpha_{\min}$ и $\alpha_{\max}$ — минимальное ($\alpha_{\min}$) и максимальное ($\alpha_{\max}$) значения абсцисс МФС, a_s — асимметрия, $w = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ — ширина спектра.

Ширина мультифрактального спектра w является мерой степени или сложности мультифрактальности и показывает диапазон, в котором изменяется экспонента фрактала, а также характеризует насыщенность топологической структуры РЛИ. Чем больше значение w , тем более развита мультифрактальность. Наоборот, для чистого монофрактала ширина спектров w равна нулю. Тип текстуры на исследуемом РЛИ указывается параметрами α . Параметр $\alpha_{\min}$ указывает на наиболее экстремальные текстуры, а $\alpha_{\max}$ — на наиболее плавные. Параметр α_0 дает ценную информацию о топологии РЛИ — большое значение указывает на то, что изображение менее скоррелировано и обладает тонкой структурой. Если исследуемое изображение коррелировано и не обладает тонкой структурой (более регулярное) по внешнему виду, то значение α_0 , соответствующее максимальному значению мультифрактальных спектров α , является низким.

Форма мультифрактального спектра определяется асимметрией $a_s = f(\alpha_{\max}) - f(\alpha_{\min})$. Отрицательные значения a_s (форма спектров сингулярностей скошена влево) указывают на низкие фрактальные показатели малых весов, т.е. экстремальные текстуры играют заметную роль в пространственной структуре изображения. Напротив, спектр с асимметрией вправо (положительное значение a_s) означает довольно сильные взвешенные фрактальные показатели, типичные для участков РЛИ с тонкой структурой. Таким образом, значения параметров мультифрактального спектра (α_0, w, a_s) могут быть использованы для количественной и качественной оценки текстуры РЛИ.

Однако, несмотря на широкую известность такой интерпретации, в данной работе впервые публикуются результаты исследования поляриметрических РЛИ, которые представляют как научный, так и практический интерес для глобального текстурно-фрактального анализа.

Поскольку необходимо выявить поляризационные отличия текстур РЛИ, в соответствии с методом измерения НММФС авторами предложено формировать тензор $S_{q,\varepsilon}^{\text{опт}}$ направленных мультифрактальных сигнатур $L_q(\varepsilon, n_{q,\varepsilon})$ (21), оптимальный по преобладающему направлению текстуры изображения, для каждого из поляриметрических РЛИ. Поляризационные отличия рассчитываются согласно выражению

$$\Delta L_q(\varepsilon, n_{q,\varepsilon}) = \max \left\{ \left| L_q^{ab}(\varepsilon, n_{q,\varepsilon}) - L_q^{a'b'}(\varepsilon, n_{q,\varepsilon}) \right| \right\}, \quad (22)$$

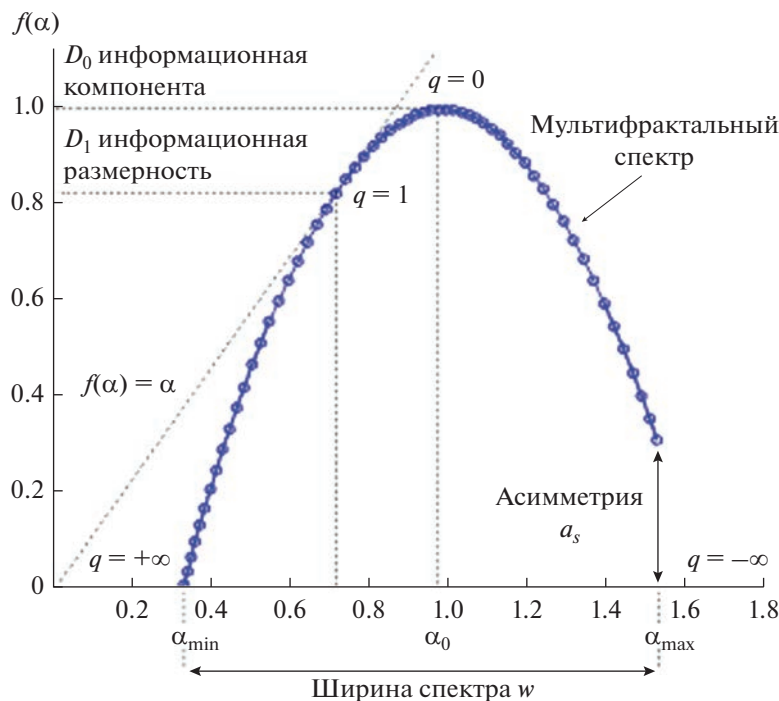


Рис. 7. Интерпретация параметров мультифрактального спектра.

где $a, b, a', b' = В, Г$ — вертикальная, горизонтальная поляризации при $a, b \neq a', b'$. Суть выражения (22) заключается в определении максимальной по модулю разности между значениями ЛММЭ на всем множестве вариантов (например, для линейного поляризационного базиса — ГГ, ГВ, ВГ, ВВ). Максимуму ЛММЭ, определенному таким образом, будет соответствовать масштаб ϵ , который становится “новым” масштабом для вычисления ФР известным способом по тангенсу угла наклона аппроксимированной зависимости $\Delta L_q(\epsilon, n_{q,\epsilon})$.

6. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе выполнено исследование процесса формирования НММФС по поляризметрическим РЛИ различных диапазонов ЭМВ. В качестве примера на рис. 8 представлены фрагменты РЛИ, полученные полно-поляризметрической РСА беспилотного летательного аппарата “Мерлин-21Б” [41, 42].

Набор поляризметрических РЛИ представляет собой пять изображений, четыре из которых (см. рис. 8а–8г) получены в С-диапазоне (С1, С2, С3, С4тчк), а одно — в Л-диапазоне (см. рис. 8д). Причем РЛИ С4тчк (см. рис. 8г) фактически не является текстурным, поскольку на нем только точечные отражатели.

На рис. 9 представлены мультифрактальные спектры, рассчитанные по всем поляризметрическим РЛИ (см. рис. 8). Согласно приведенной в

разд. 4 методике интерпретации результатов вычисления мультифрактальных спектров можно сделать следующие выводы.

Поляризметрические РЛИ Л-диапазона обладают очень высокой степенью мультифрактальности вследствие большей, по сравнению с С-диапазоном, длиной волны. Кроме того, изображения С4тчк с точечными отражателями можно охарактеризовать несложной и ненасыщенной с точки зрения мультифрактальности текстурой. Максимальное из полученных значение α_0 для изображения с точечными отражателями С4тчк свидетельствует о низкой коррелированности и наличии тонкой структуры — фактически, по причине соответствия фрагмента РЛИ однородному участку.

Отрицательные значения асимметрии всех мультифрактальных спектров объясняются наличием спекл-шума на всех исследуемых РЛИ. Достаточно близкое взаимное расположение мультифрактальных спектров ко-поляризованных (ВВ и ГГ) РЛИ и следующих за ними в сторону сужения спектра кросс-поляризованных (ВГ и ГВ) свидетельствует о меньшей степени мультифрактальности последних, что подтверждается общепринятым и очевидным объяснением — меньшей насыщенностью текстур вследствие меньшего динамического диапазона и меньших значений отношения сигнал–шум по сравнению с ко-поляризованными РЛИ. Совпадение спектров ко-поляризованных (ВВ и ГГ) РЛИ и РЛИ С4тчк свидетельствует о независимости механизмов рассеяния от поляриза-

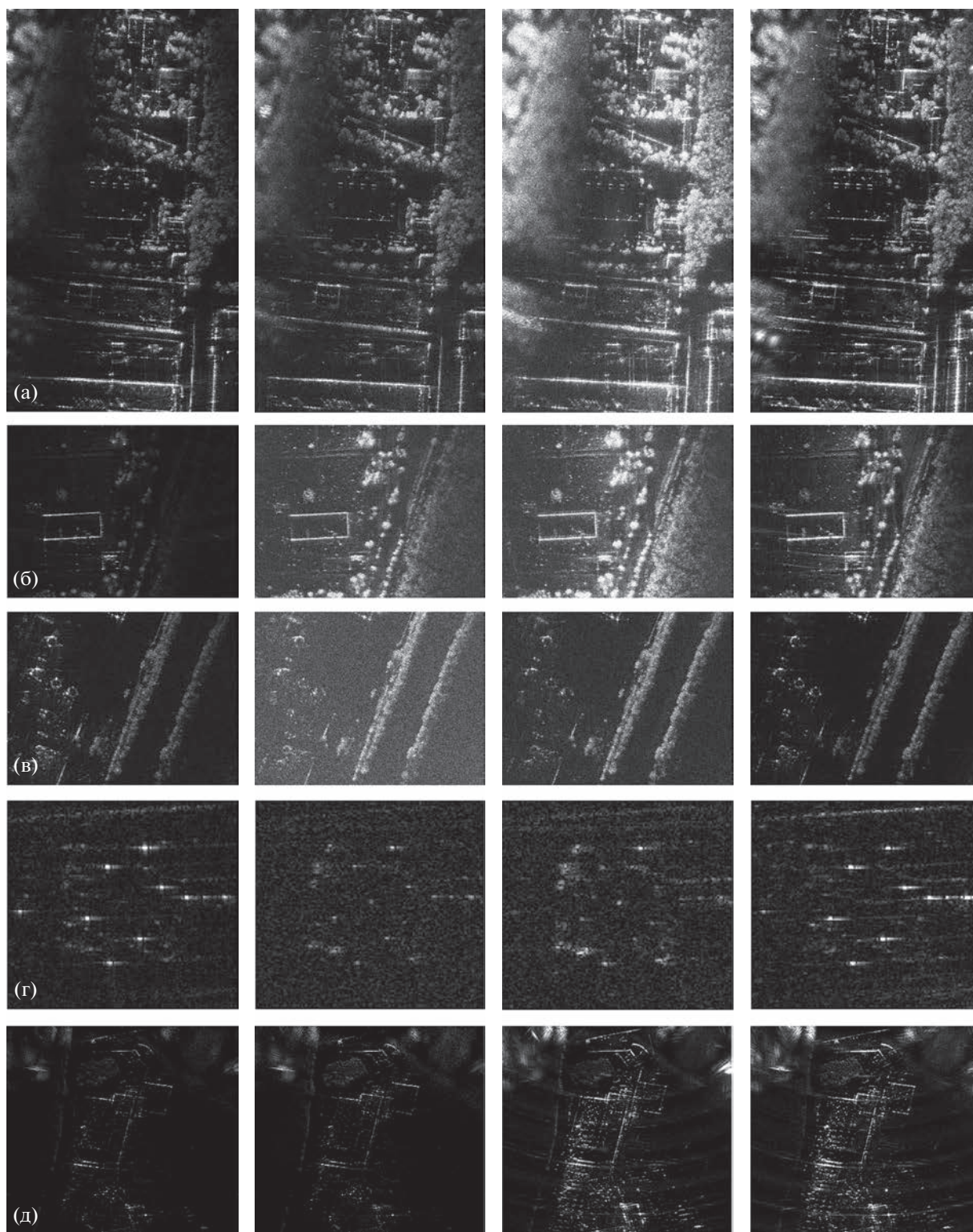


Рис. 8. Пример полно-поляриметрических РЛИ для диапазонов C1 (а), C2 (б), C3 (в), S4+L (г) и L (д); колонки слева направо: поляризация ГГ, ГВ, ВГ, ВВ.

ции и указывает на наличие отражателей по типу линз Люнеберга. В свою очередь, отличия спектров кросс-поляризованных РЛИ (ВГ и ГВ) на

всех РЛИ свидетельствуют о присутствии механизмов многократного переотражения ЭМВ с эффектом переполаризации и могут указывать на

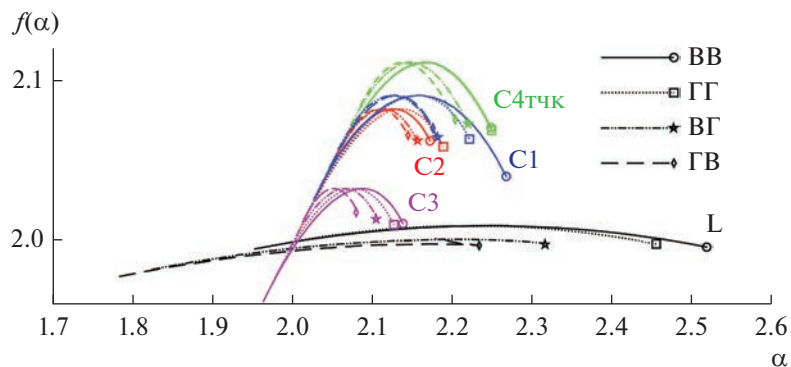


Рис. 9. Мультифрактальные спектры поляриметрических РЛИ разных диапазонов.

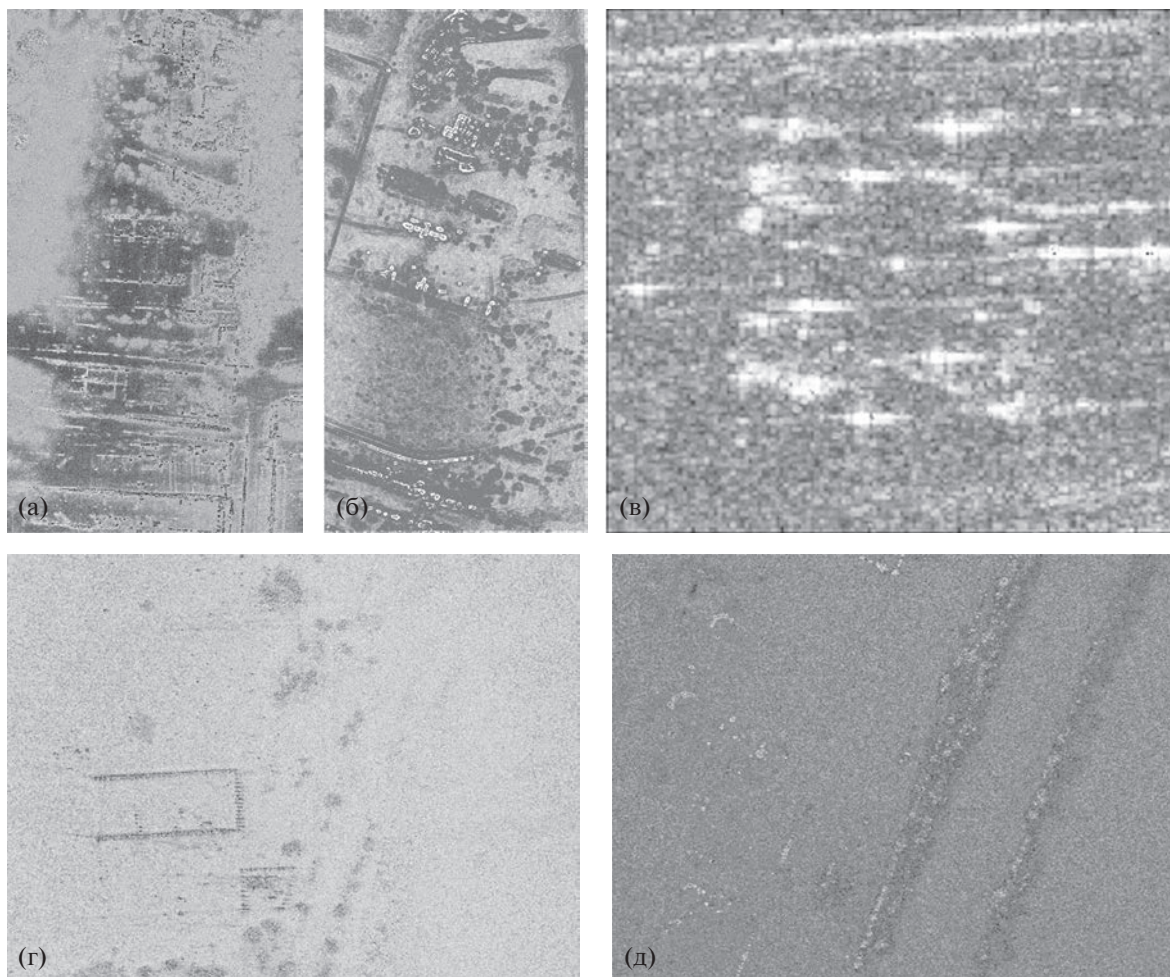


Рис. 10. Пример результатов формирования поля НММФС при $q = 1$ для фрагментов полно-поляриметрических РЛИ, представленных на рис. 8.

наличие угловых отражателей или класса подстилающей поверхности типа “лес”.

Сформулированные выводы подтверждают возможность применения параметров мультифрактальных спектров, вычисленных с помощью метода формирования НММФС, для интерпретации поляриметрических радиолокационных данных в интересах как классификации типов под-

стилающей поверхности, так и обнаружения и распознавания объектов.

В работе также получены с помощью предложенного метода НММФС фрактальные изображения как результат текстурно-фрактальной обработки поляриметрических РЛИ (см. рис. 8), пример которых для $q = 1$ приведен на рис. 10.

Как видно из рис. 10, мультифрактальные изображения (“карты”) всех поляриметрических РЛИ являются универсальным форматом представления радиолокационных данных. Возможность выявления и параметризации текстур РЛИ с учетом их анизотропии, а также очевидное сохранение и усиление энергетических характеристик точечных отражателей на РЛИ позволяет сделать вывод о потенциально высокой степени дифференциации классов однородных участков РЛИ и радиолокационных портретов для автоматизации дальнейшего успешного решения специфических задач сегментации (классификации) подстилающей поверхности, обнаружения и распознавания наземных объектов.

Таким образом, на основе опубликованного ранее метода авторами предложен оригинальный способ формирования НМФС поляриметрических РЛИ разных диапазонов и впервые рассмотрена интерпретация полученных результатов в контексте поляризационных отличий механизмов рассеяния ЭМВ, образующих текстуру РЛИ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. М.: ВВИА, 2008.
2. Кузнецов В.А. // Телекоммуникации. 2012. № 10. С. 31.
3. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М.: Логос, 2002; 2-е изд., 2005.
4. Профессор Александр Алексеевич Потапов. Биобиблиографический указатель: Фракталы в действии / Под ред. Ю.В. Гуляева. М.: ЦПУ Радуга, 2019.
5. Lee J.-S., Pottier E. Polarimetric Radar Imaging: from Basics to Applications. Boca Raton: CRC Press, 2009.
6. Татаринов В.Н., Татаринов С.В., Лузтхарт Л.П. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Т. 1. Поляризация плоских электромагнитных волн и её преобразование. Томск: Томский ун-т, 2012.
7. Zyl J., Kim Y. Synthetic Aperture Radar Polarimetry. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
8. Лихачев В.П., Куприяшкин И.Ф., Семенов В.В. Поляриметрические и интерферометрические режимы работы РСА в условиях помех. Воронеж: ВУНЦ ВВС “ВВА”, 2014.
9. Huijnen J.R. // Electromagnetic Scattering. 1978. P. 653.
10. Krogager E., Cyszk Z.H. // Proc. 3rd Int. Workshop on Radar Polarimetry, IRESTE, Univ. Nantes, 1995. P. 106.
11. Cameron W.L., Youssef N., Leung L.K. // IEEE Trans. 1996. V. GRS-34. № 3. P. 793.
12. Freeman A., Durden S. // Proc. of SPIE. Radar Polarimetry. 1992. V. 1748. P. 213.
13. Yamaguchi Y., Moriyama T., Ishido M. // IEEE Trans. 2005. V. GRS-43. № 8. P. 1699.
14. Pauli W., Rose M.E. // Phys. Rev. 1936. V. 49. № 6. P. 462.
15. Cloude S.R. Polarisation: Applications in Remote Sensing. Oxford: Oxford Univ. Press, 2009.
16. Cloude S.R., Pottier E. // IEEE Trans. 1996. V. GRS-34. № 2. P. 498.
17. Кузнецов В.А., Потоцкий А.Н. // Успехи совр. радиоэлектроники. 2017. № 3. С. 39.
18. Потапов А.А., Кузнецов В.А., Потоцкий А.Н. // РЭ. 2021. Т. 66. № 5. С. 757.
19. Потапов А.А., Кузнецов В.А., Потоцкий А.Н. // Радиолокация. Теория и практика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2023. С. 97.
20. Potapov A.A., Hao W., Shan X. Fractality of Wave Fields and Processes in Radar and Control. Guangzhou: South China Univ. Technol. Press, 2020.
21. Potapov A.A. // 2022 IEEE Conf. Antenna Measurements & Applications (IEEE CAMA). Guangzhou, 14–17 Dec. N.Y.: IEEE, 2022. Paper No. 10002640. <https://doi.org/10.1109/CAMA56352.2022.10002640>
22. Potapov A.A., German V.A. // Pattern Recognition and Image Analysis. 1998. V. 8. № 2. P. 226.
23. Potapov A.A. // Universal J. Phys. Appl. 2017. V. 11. № 1. P. 13.
24. Кузнецов В.А., Лихачев В.П., Потапов А.А. // Радиолокация, навигация, связь: Сб. тр. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., посв. 70-летию кафедры радиофизики ВГУ. В 5 тт. Воронеж: ИД ВГУ, 2023. Т. 2. С. 283.
25. Nayak S.R., Mishra J. // Perspectives in Science. 2016. V. 8. P. 412.
26. Ivanovici M., Richard N. // IEEE Trans. 2011. V. IP-20. № 12. P. 227.
27. Nikolaidis N.S., Nikolaidis I.N., Tsouros C.C. // Appl. Math. Comput. 2011. ArXiv abs/1107.2336 (2011). P. 1.
28. Alsaidi N.M.G., Abdulaal W.J. // Eng. & Tech. J. 2015. V. 33. Pt B. № 4. P. 714.
29. Brodatz P. Textures: A Photographic Album for Artists and Designers. N.Y.: Dover Publ., 1966.
30. Martino G.D., Franceschetti G., Iodice A. et al. // 2014 IEEE Geosci. and Remote Sensing Symp. Quebec. 13–18 Jul. N.Y.: IEEE, 2014. Paper No. 6947232. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947232>
31. Iodice A., Natale A., Riccio D. // IEEE Trans. 2011. V. GRS-49. № 7. P. 2531.
32. Martino G. Di, Riccio D., Zinno I. // IEEE Trans. 2012. V. GRS-50. № 2. P. 630.
33. Schuler D.L., Ainsworth T.L., Krogager E. et al. // IEEE Trans. 2002. V. GRS-40. № 1. P. 30.
34. Dmitriev A.V., Chimitdorzhiyev T.N., Dagurov P.N. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2016. V. 52. № 3. P. 245.
35. Martino G.D., Iodice A., Riccio D. et al. // Proc. POLinSAR. Frascati, 28 Jan.–1 Feb. 2013. Frascati: ESA-ESRIN, 2013. P. 123.
36. Потапов А.А., Кузнецов В.А. // Радиолокация. Теория и практика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2023. С. 108.
37. Потапов А.А., Кузнецов В.А., Аликулов Е.А. // РЭ. 2022. Т. 67. № 1. С. 51.
38. Потапов А.А., Кузнецов В.А., Аликулов Е.А. // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24. № 3. С. 6.
39. Krzyszczyk J., Baranowski P., Zubik M. et al. // Theoret. Appl. Climatology. 2019. V. 137. P. 1811.
40. Куприяшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. // Журн. Радиоэлектроники. 2019. № 4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/12/text.pdf>
41. Куприяшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. М.: Радиотехника, 2020.