

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МНОГОДИАПАЗОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. А. Потапов¹, В. А. Кузнецов², Е. А. Аликулов²

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

²Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж

В работе кратко рассмотрены существующие подходы к комплексированию радиолокационных изображений, полученных в разных частотных диапазонах. Предложен новый способ их комплексирования на основе фрактального подхода, в котором участок подстилающей поверхности анализируется на различных масштабах. Применение предложенного способа позволяет повысить информативность результирующего изображения.

Ключевые слова: радиолокационная станция с синтезированной апертурой, радиолокационное изображение, многодиапазонность, комплексирование.

Современные радиолокационные системы представляют собой сложные информационно-управляющие технические системы реального масштаба времени, включающие иерархическую пространственно-распределенную совокупность средств радиолокации, комплексов средств автоматизации, средств приема, обработки, отображения и передачи радиолокационных изображений (РЛИ), а также средств, технологий и субъектов управления, предназначенные для информационного обеспечения широкого круга военно-технических, научно-экспериментальных и социально-экономических задач [1]. Радиолокационные станции с синтезированной апертурой (РСА) как самостоятельные средства видовой воздушной разведки, осуществляющие непрерывное наблюдение земной (морской) поверхности и объектов не зависимо от времени суток и метеорологических условий играют все большую роль в информационном обеспечении боевых действий войск [2].

Традиционно в РСА используется сантиметровый диапазон радиоволн для пилотируемых воздушных судов и в последнее время начал использоваться миллиметровый диапазон волн для беспилотных летательных аппаратов. Однако следует иметь в виду, что диапазон радиоволн этим не ограничивается. Каждый из диапазонов ЭМВ имеет свои особенности по отношению к радиолокации земной поверхности и объектов и, в принципе, так или иначе может быть использован в целях радиолокационной воздушной разведки. В настоящее время ведутся интенсивные поиски оптимального для радиолокационного комплекса воздушной разведки набора частот радиоволн, который можно было бы объединить в многодиапазонную РСА. При этом учитываются как информационные, так и тактико-технические и технологические возможности разработки, производства и применения таких комплексов [2]. Один из проблемных вопросов на сегодняшний день – комплексная обработка РЛИ многодиапазонной РСА.

Результаты анализа современных решений в области комплексирования РЛИ [3] показали, что обработка изображений может производиться на нескольких уровнях: сигналов или данных (пикселей применительно к РЛИ), признаков и решений, а также их совокупности. Слияние изображений на уровне пикселей характеризуется высокими трудозатратами на их совмещение и низкой точностью – РЛИ, сформированные в различных частотных диапазонах, отличаются пространственным разрешением и полосой обзора. Разработчикам приходится решать задачи автоматического поиска

на всех совмещаемых РЛИ опорных точек, что не всегда возможно. Кроме того, проводимые по таким точкам аффинные преобразования обуславливают потерю информации, в частности, высока вероятность сглаживания так называемых «блестящих точек» какого-либо объекта. Одним из недостатков комплексирования РЛИ на уровнях признаков и решений является снижение достоверности дальнейшего дешифрирования вследствие перемножения вероятностей правильного обнаружения. Кроме того, одним из наиболее часто используемых при комплексировании подходов является снижение размерности пространства данных или признаков различными методами, что ведет к потере незначительной (со слов авторов этих методов) информации и, по нашему мнению, существенному снижению достоверности анализа вследствие нарушения принципа целостности сложной системы.

В данной работе предложен способ комплексирования РЛИ многодиапазонной РСА, в котором значение длины волны каждого канала РСА рассматривается как некоторая мера на определенном масштабе. Такой подход хорошо укладывается в положение о фрактальной размерности [4]. При этом, как показывают результаты исследований [3], в качестве меры следует рассматривать не длину волны или рабочую частоту, а разрешающую способность каналов РСА. Тогда с учетом линейных размеров типового объекта воздушной разведки, например, танка или бронетранспортера, появляется возможность построить график зависимости числа элементов изображения $N(\varepsilon)$, занимаемых объектом, от разрешения РСА в терминах фрактальной теории. Если рассматривать такой график с точки зрения классического способа расчета фрактальной размерности D согласно известному выражению

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(N(\varepsilon))}{\ln(1/\varepsilon)}, \quad (1)$$

то разрешающая способность РСА – не что иное, как масштаб анализа ε . Значение фрактальной размерности будет определяться тангенсом угла наклона аппроксимирующей линии. Исходя из этого, чем ближе к аппроксимирующей функции реальные значения, тем точнее можно определить фрактальную размерность. Таким способом можно сформулировать требование к выбору разрешающей способности каждого канала многодиапазонной РСА.

В связи с тем, что при обеспечении одинаковых значений разрешающей способности РСА по дальности и азимуту (продольной дальности) требуется варьировать единственный параметр – интервал синтезирования, длина полосы обзора в каждом канале будет различной, что поясняется на рис. 1.

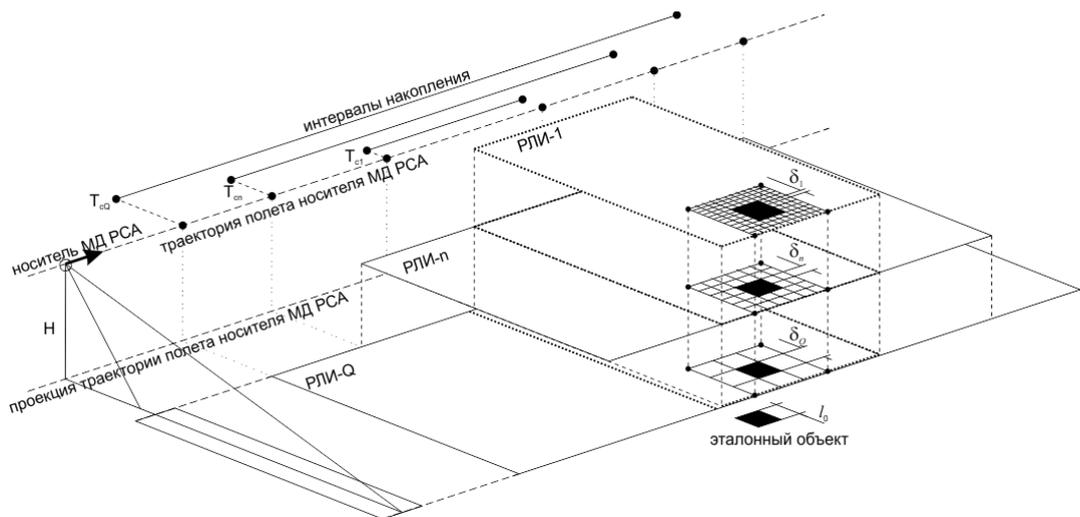


Рис. 1. Геометрия съемки многодиапазонной РСА

В работе предложено ранжировать исходные изображения в порядке убывания значений несущих частот или ширины спектра зондирующих сигналов, на которых они получены, а затем определять базовое изображение по критерию максимальной частоты зондирующего сигнала, как наиболее информативное.

Для каждого исходного n -го изображения необходимо вычислить масштаб ε_n согласно выражению

$$\varepsilon_n = \left\lceil \frac{w_n - 1}{2} \right\rceil, \quad (2)$$

где $\lceil * \rceil$ – операция округления к большему, n – порядковый номер ранжированного изображения, $w_n = \lceil l_0 / \delta_n \rceil = \lceil 2\Delta f_n l_0 / c \rceil$ – число элементов изображения, соответствующих линейному размеру l_0 некоторого эталонного объекта, c – абсолютная величина скорости распространения электромагнитных волн.

Участок сцены, соответствующий базовому изображению, согласно рис. 1, вырезается на остальных изображениях относительно середины интервалов накопления зондирующих сигналов T_{cn} (фазовых центров синтезированной апертуры антенн). Поскольку для обеспечения одинаковой дальности обнаружения в каждом частотном канале РСА требуется различная мощность излучения, а также в случае различной чувствительности приемников РСА, требуется выравнивание динамического диапазона РЛИ. Как показано в [5], нормировка динамического диапазона может быть осуществлена несколькими способами. С учетом вычисленных масштабов каждого РЛИ ε_n , их динамический диапазон может быть выравнен, например, согласно выражению

$$z_{\varepsilon n} = \frac{z_n - \min(z_n)}{\max(z_n) - \min(z_n)} + \varepsilon_n, \quad (3)$$

где $z_{\varepsilon n}$ – множество значений яркости элементов преобразованного n -го изображения с учетом масштаба, z_n – множество значений яркости элементов исходного n -го изображения, $\min(z_n)$ и $\max(z_n)$ – минимальное и максимальное значения яркости исходного n -го изображения соответственно.

Непосредственно комплексирование проводится путем формирования поля фрактальных размерностей $D(i, j)$, $i = 1 \dots M$, $j = 1 \dots N$, для этого в скользящем окне размером $W \times W$, где W – нечетное целое число, рассчитывается локальная мультифрактальная размерность L_q [6]

$$L_q = \frac{1}{|q|} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(I(q, \varepsilon))}{\ln(1/\varepsilon)}, \text{ при } q \neq 0, \quad (4)$$

где q – порядок скейлингового момента, при $q=1$ локальная мультифрактальная размерность соответствует фрактальной размерности, при $q \neq 1$ выявляются мультифрактальные свойства, которые также возможно использовать при комплексировании,

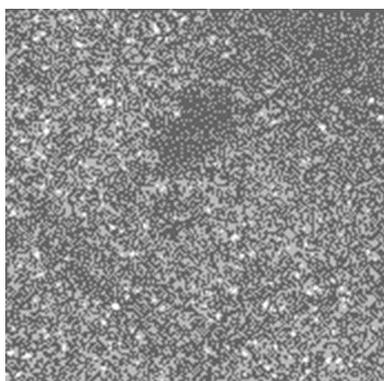
$$I(q, \varepsilon) = \alpha \sum_i^W \sum_j^W \mu_\varepsilon(i, j)^q - \text{обобщенная статистическая сумма, } \alpha = \frac{\sum_i^W \sum_j^W |z_\varepsilon(i, j) - z(i, j)|}{\varepsilon_n - \varepsilon_B},$$

$$\varepsilon_B - \text{масштаб базового изображения } z, \mu_\varepsilon(i, j) = \frac{|z_\varepsilon(i, j) - z(i, j)|}{\sum_i^W \sum_j^W |z_\varepsilon(i, j) - z(i, j)|}.$$

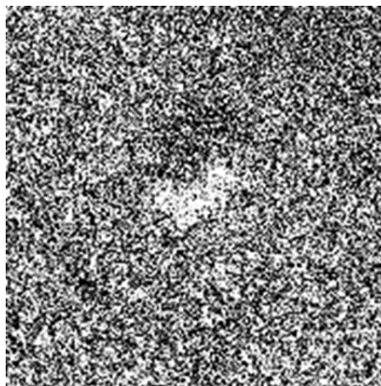
Вычисленные таким способом значения L_q каждого центрального элемента скользящего окна запоминаются в соответствующем элементе двумерной матрицы $D(i, j)$, $i = 1 \dots M$, $j = 1 \dots N$,

а в случае $q \neq 1$ – в соответствующем элементе трехмерной матрицы $D(q, i, j)$, содержащей элементы исходных радиолокационных изображений одной и той же сцены, полученных одновременно в различных частотных диапазонах.

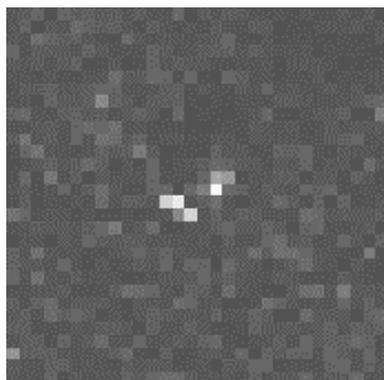
В качестве примера мультифрактального комплексирования РЛИ многодиапазонной РСА на рис. 2 приведены результаты обработки РЛИ одного и того же объекта, синтезированные на разных частотах с различным разрешением. Следует отметить, что, как видно из примера, все изображения отличаются динамическим диапазоном и сильно зашумлены, а на первом РЛИ объект замаскирован (видна только радиолокационная тень), поэтому его на изображении не видно.



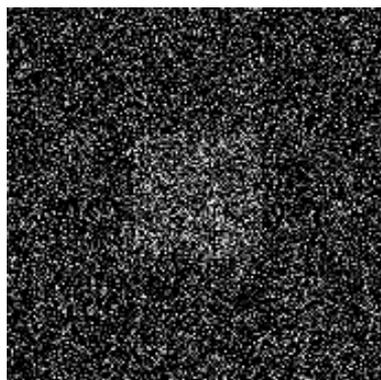
а



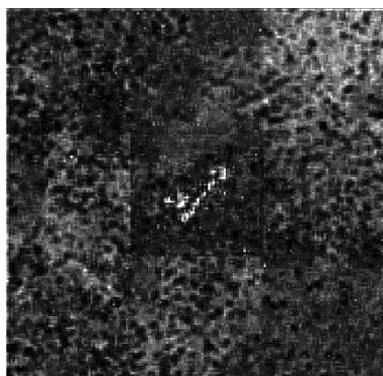
б



в



г



д

Рис. 2. Пример мультифрактального комплексирования РЛИ: а – г исходные РЛИ; д – результат фрактального комплексирования (яркости преобразованы для наглядности)

Однако благодаря существенным отличиям текстур РЛИ подстилающей поверхности и замаскированного объекта удается получить достоверный результат. Информативность каждого из исходных РЛИ, оцененная известным образом по энтропии, оказалась в среднем не менее чем на 37 % ниже, чем у результирующего, что подтверждает высокую эффективность предложенного способа.

Таким образом, в работе предложен новый способ комплексирования РЛИ многодиапазонной РСА, основанный, в отличие от известных, на одновременном вычислении скользящим окном по всем исходным РЛИ локальных мультифрактальных размерностей методом итерационных покрытий, и позволяющий существенно повысить информативность комплексирования в целом при значительном сокращении вычислительных затрат на обработку.

Литература

1. Ботов М. И., Вяхирев В. А. Основы теории радиолокационных систем и комплексов / Под общ. ред. Ботова М. И. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013.
2. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов ВВИА имени профессора Жуковского Н. Е. / Под ред. Школьного Л. А. – М.: ВВИА, 2008.
3. Кузнецов В. А., Аликулов Е. А., Потоцкий А. Н. Состояние и перспективы комплексирования многомерных радиолокационных изображений // Сб. трудов XXVI Междунар. науч.-практ. конфер. «Радиолокация, навигация, связь». Т. 2. Воронеж: ВГУ, 2020. С. 181–188.
4. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: топология выборки. – М.: Университетская книга, 2005.
5. Гурьянов М. А. Преобразование динамического диапазона радиолокационных изображений для различных снимаемых поверхностей // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 12.
6. Yong Xia, Dagan Feng, Rongchun Zhao Morphology-Based Multifractal Estimation for Texture Segmentation // IEEE Transactions on Image Processing. 2006. Vol. 15, №. 3. P. 614–623.

FRACTAL FUSION OF MULTI-BAND RADAR IMAGES

A. A. Potapov, V. A. Kuznetsov, E. A. Alikulov

¹ Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Moscow

² Zhukovsky – Gagarin Air Force Academy, Voronezh

The paper briefly discusses existing approaches to the radar images fusion obtained in different frequency bands. A new method of their fusion based on the fractal approach is proposed, in which a section of the underlying surface is analyzed at different scales. Application of the proposed method makes it possible to increase the information content of the resulting image.

Key words: synthesized aperture radar, radar image, multi-band, fusion.