

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

УДК 004.932

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-6-21>

Анализ способов комплексирования изображений, формируемых многодиапазонными радиолокационными станциями с синтезированной апертурой

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

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

² ВУНЦ ВВС "Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", Воронеж, Россия

✉ potapov@cplire.ru

Аннотация

Введение. Особое место среди систем дистанционного зондирования Земли космического и авиационного базирования занимают радиолокационные станции с синтезированной апертурой. Современный уровень развития таких систем обуславливает возможность проведения радиолокационной съемки одновременно в нескольких частотных диапазонах, при этом возникает необходимость комплексирования изображений, сформированных в каждом из частотных каналов. Задача такого класса до сих пор не решена в полном объеме вследствие специфических особенностей радиолокационных изображений.

Цель работы. Обзор принципов формирования и анализ способов совместной обработки изображений, полученных с помощью многодиапазонных радиолокационных станций с синтезированием апертуры космического и воздушного базирования.

Методы. Для достижения поставленной цели используется методология системного анализа, составными этапами которого являются декомпозиция, анализ и синтез. Так, декомпозиция задачи комплексирования многодиапазонных радиолокационных изображений выполнена по критерию влияния различных факторов на характеристики радиолокационных изображений в разных частотных диапазонах. К таким факторам относят: принципы формирования радиолокационных изображений, особенности радиолокационных изображений многодиапазонных радиолокационных станций с синтезированной апертурой с реальными характеристиками и уровни комплексирования.

Результаты. Результату обзора и анализа выявленных факторов, согласно классическому системному подходу, сопутствуют соответствующие выводы по недостаткам каждого элемента декомпозиции и синтезу предложения по достижению цели. Показано, что совместная обработка многодиапазонных радиолокационных изображений может проводиться на уровнях сигналов, пикселей, признаков и решений, а также их совокупностей. Каждый из рассмотренных подходов характеризуется своими недостатками, не позволяющими реализовать в полной мере комплексирование многодиапазонных радиолокационных изображений без потерь информации, что обусловлено отсутствием информационной избыточности радиолокационных изображений в отличие, например, от оптических.

Заключение. Результатом работы являются предложения по реализации способа и синтезу системы комплексирования радиолокационных изображений на основе текстурно-фрактального подхода. Предложены направления дальнейшей работы в данной предметной области по удовлетворению всех требований к полноте, достоверности и информативности дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: системный анализ, радиолокатор с синтезированной апертурой, многодиапазонное радиолокационное изображение, комплексирование, фрактальная парадигма

Для цитирования: Потапов А. А., Кузнецов В. А., Аликулов Е. А. Анализ способов комплексирования изображений, формируемых многодиапазонными радиолокационными станциями с синтезированной апертурой // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 6–21. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-6-21

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Статья поступила в редакцию 30.04.2021; принята к публикации после рецензирования 24.05.2021; опубликована онлайн 29.06.2021

© Потапов А. А., Кузнецов В. А., Аликулов Е. А., 2021



Methods for Complexing Images Formed by Multi-Band Synthetic Aperture Radars

Alexander A. Potapov¹✉, Viktor A. Kuznetsov², Elbek A. Alikulov²

¹ V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Moscow, Russia

² MERC AF "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin",
Voronezh, Russia

✉ potapov@cplire.ru

Abstract

Introduction. Synthetic aperture radars (SAR) are important components of aviation-based systems for remote sensing of the Earth. The current level of such systems allows simultaneous radar surveys in several frequency ranges. Such surveys require complexing of the images formed in each of the frequency channels, which task is yet to be resolved.

Aim. To review the formation principles and methods for joint processing of images using space and aviation-based multi-band synthetic aperture radar systems.

Materials and methods. The methodology of systems analysis, involving the integral stages of decomposition, analysis and synthesis, was used. Decomposition of integrating multi-band radar images was performed considering the effect of various factors on the characteristics of radar images in different frequency ranges. Such factors include the principles of radar imaging, issues of radar images of multi-band synthetic aperture radars with real characteristics, and complexing levels.

Results. According to the classical systems approach, the results of review and analysis are corresponded by appropriate conclusions on the shortcomings of each decomposition element and the synthesis of a proposal for achieving the goal. It was shown that joint processing of multi-band radar images can be carried out at the levels of signals, pixels, features and solutions, as well as their aggregates. Each approach is characterised by its shortcomings, which impede implementation of full integration of multi-band radar images without loss of information, which is due to the absence of information redundancy of radar images, compared to, e.g., optical images.

Conclusion. Recommendations on the application of a particular method and the synthesis of a system for radar complexing images based on the texture-fractal approach were formulated. Directions for further work meeting all the requirements for completeness, reliability and information content of remote sensing of the Earth were outlined.

Keywords: systems analysis, synthetic aperture radar, multi-band radar image, complexing, fractal paradigm

For citation: Potapov A. A., Kuznetsov V. A., Alikulov E. A. Methods for Complexing Images Formed by Multi-Band Synthetic Aperture Radars. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 6–21. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-6-21

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 30.04.2021; accepted 24.05.2021; published online 29.06.2021

Введение. В современных условиях развития радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) традиционным и в то же время актуальным направлением их совершенствования является улучшение технических характеристик. Особенно важную роль при этом играют противоречивые требования по обеспечению высокой информативности, достоверности и оперативности при любых условиях съемки и значительном объеме данных, а также по увеличению

числа одновременно решаемых задач в различных режимах работы. Разрешение данных несоответствий возможно при переходе к многоканальным (многочастотным или многодиапазонным) радиолокационным системам и комплексированию формируемых с их помощью данных.

Особое место среди систем ДЗЗ авиационного и космического базирования занимают радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны (РСА), позволяющие осуществлять съемку

земной поверхности при любых условиях и на больших дальностях. Высокая разрешающая способность РСА достигается путем накопления сигнала на интервале синтеза апертуры антенны. На сегодняшний день существуют области применения РСА, не имеющие аналогов в оптическом диапазоне частот электромагнитных волн (ЭМВ), – обнаружение малозаметных, малоконтрастных и скрытых лесной растительностью объектов, подповерхностная радиолокация и ледовая разведка. Синхронное использование нескольких зондирующих сигналов на разных рабочих частотах позволило существенно расширить сферу применения РСА. Помимо значительного повышения надежности и помехозащищенности многодиапазонные (МД) РСА обладают высокой информативностью получаемых данных за счет особенностей отражения от объектов радиоволн с различными длинами волн. При этом одной из главных если не научных проблем, то научно-технических задач ДЗЗ является комплексирование радиолокационных изображений (РЛИ), сформированных МД РСА космического и воздушного базирования.

Цель работы – обзор принципов формирования и анализ способов совместной обработки изображений, полученных с помощью многодиапазонных радиолокационных станций с синтезированием апертуры космического и воздушного базирования.

Методика системного анализа задачи комплексирования МД РЛИ. Для достижения поставленной цели использована методология системного анализа, основными этапами которого являются декомпозиция, анализ и синтез. Так, декомпозиция задачи комплексирования МД РЛИ выполнена по критерию влияния различных факторов на характеристики РЛИ в разных частотных диапазонах. К таким факторам относят принципы формирования РЛИ, особенности формирования РЛИ в МД РСА с реальными характеристиками и уровни комплексирования. Результату их анализа, согласно классическому системному подходу, сопутствуют соответствующие выводы по недостаткам каждого элемента декомпозиции и синтез предложений по достижению целевой функции – повышения эффективности дистанционного зондирования Земли.

Принципы формирования сигналов и РЛИ в МД РСА. Многочастотный зондирующий сигнал многодиапазонной РСА представляет собой совокупность нескольких сигналов с различными

значениями несущей частоты и ширины спектра, одинаковыми или разными законами модуляции. Принципиально возможно формирование многочастотного сигнала излучением нескольких сигналов с различными несущими частотами одновременно (синхронно), с временным разделением (со смещением во времени и межпериодной обработкой) за счет быстрой перестройки несущей частоты зондирующего сигнала или с пространственно-временным разделением в случае многопролетной съемки.

Одновременное (синхронное) излучение сигналов с различными несущими частотами может быть осуществлено несколькими способами [1]. Наиболее простым из них является способ, при котором многочастотный сигнал формируется набором передатчиков с различными несущими частотами. В таких МД РСА, как правило, каждый передатчик сопряжен с отдельной передающей антенной, а каждый приемник подключен к отдельной приемной антенне. Такая схема передающего тракта характерна для МД РСА непрерывного (НИ) или квазинепрерывного (КНИ) излучения. Одновременное излучение сигналов с различными несущими частотами может быть реализовано в передающем устройстве в качестве задающего генератора многочастотного автогенератора. Одним из современных и широко используемых способов одновременного формирования сигналов с различными несущими частотами является синтезирование частот.

Реализация любого из перечисленных способов одновременного формирования многочастотного сигнала сопряжена с рядом особенностей, связанных с усложнением схемы передающего тракта, исключением взаимного влияния сигналов различных частот, одновременным усилением сигналов в широком диапазоне частот и увеличением массогабаритных характеристик РСА. Следует также иметь в виду, что при наличии в тракте передачи общих элементов для сигналов всех частот одновременное формирование многочастотного сигнала оказывается энергетически невыгодным, поскольку мощность каждого из составляющих сигналов в среднем не может быть больше величины отношения предельно допустимой передаваемой мощности к числу несущих частот.

Существует также способ формирования многочастотного сигнала с пространственно-временным разделением, когда радиолокационная съемка проводится в несколько пролетов по при-

близительно одной траектории, с разными несущими частотами в каждом пролете. Такой подход является самым трудоемким, сложно реализуемым по причине необходимости совмещения всех формируемых в каждом диапазоне ЭМВ изображений, компенсации траекторных нестабильностей в каждом пролете и в рамках данной работы не рассматривается.

Принцип формирования РЛИ за счет синтеза апертуры известен и широко освещен в современной литературе [1–3]. При использовании активной фазированной антенной решетки (АФАР) синтез изображения проводится согласно схеме, приведенной на рис. 1.

Геометрия синхронной радиолокационной съемки в режиме синтезирования апертуры в каждом из рассмотренных случаев является классической как для космических, так и для РСА воздуш-

ного базирования, в том числе с помощью комплексов с беспилотными летательными аппаратами. Безусловно, принцип формирования изображений существенно зависит от используемых режимов работы РСА, например полосового или телескопического обзора. В самом общем случае принцип формирования радиолокационных изображений с помощью МД РСА в режиме полосового обзора представлен на рис. 2.

Как видно из рис. 2, одновременная съемка в нескольких $1...n...Q$ частотных диапазонах ЭМВ обусловлена рядом особенностей формирования РЛИ, связанных, в частности, с интервалом накопления (синтеза) зондирующего сигнала $T_{c1}...T_{cQ}$ (рис. 3) и разрешающей способностью РСА $\delta_1... \delta_Q$ (рис. 4), не позволяющих использовать те же способы совместной обработки, что и в случае

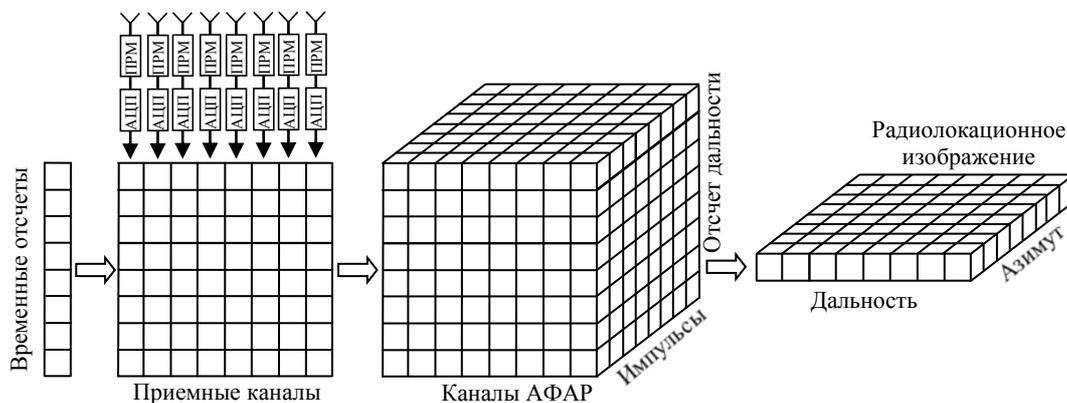


Рис. 1. Принцип формирования радиолокационного изображения РСА

Fig. 1. SAR image forming principle

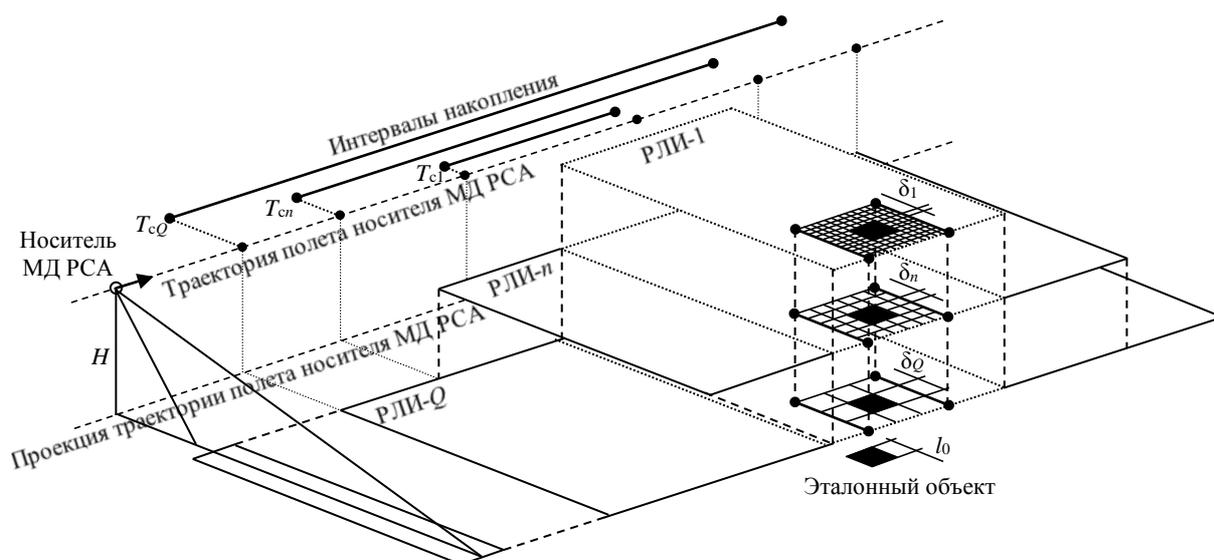


Рис. 2. Геометрия радиолокационной съемки с помощью МД РСА

Fig. 2. Radar sensing geometry with multi-band SAR

оптического диапазона, например при мульти- и гиперспектральной съемке.

Как видно из рис. 3 и 4, при комплексировании таких РЛИ, безусловно, возникают трудности с их совмещением вследствие ряда особенностей их формирования.

Особенности формирования РЛИ в различных диапазонах ЭМВ. Основными характеристиками РЛИ являются: разрешение по дальности

δ_R , по азимуту (путевой дальности) δ_{Az} , динамический диапазон и зона обзора.

Формирование РЛИ с помощью одноканальной РСА НИ проводится известным образом [1–3], при этом потенциальное разрешение по дальности рассчитывается согласно выражению

$$\delta_R = \frac{c}{2\Delta f_c}, \quad (1)$$

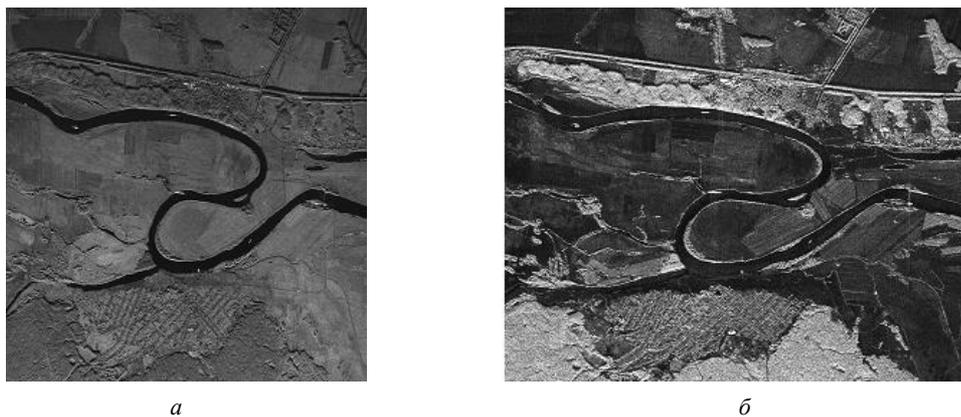


Рис. 3. Пример РЛИ одного участка местности, полученных РСА "Компакт" [4]:
 а – в X-диапазоне; б – в L-диапазоне

Fig. 3. An example of a ground radar image formed by SAR "Компакт" [4]: a – in X- and б – L-band respectively

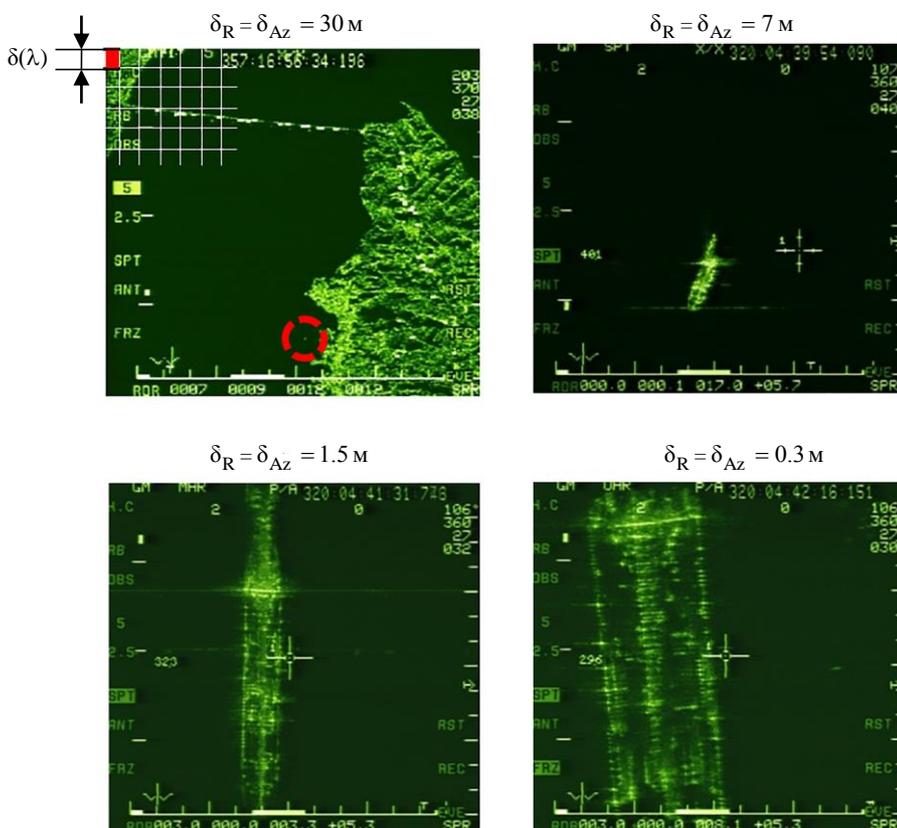


Рис. 4. Пример РЛИ одного объекта (корабля) при разном пространственном разрешении

Fig. 4. An example of object (ship) radar images with different spatial resolution

а по азимуту –

$$\delta_{Az} = \frac{R \lambda}{2v_H T_C \cos \varphi}. \quad (2)$$

Как видно из (1), требуемого разрешения по дальности можно достичь за счет задания ширины спектра. При этом существует тенденция увеличения значения Δf_c и, соответственно, разрешения по дальности с повышением рабочей частоты, обусловленная физическими возможностями и ограничениями в каждом из диапазонов. Поэтому на рис. 4 разрешение РЛИ показано условно как функция от длины волны $\delta = f(\lambda)$. Для эффективного в смысле достоверности дешифрирования РЛИ, а также для удобства интерпретации одним из требований при формировании РЛИ является равенство значений $\delta = \delta_R = \delta_{Az}$. Приравнение (1) и (2) позволяет определить требования к интервалу накопления зондирующего сигнала:

$$T_C = \frac{\Delta f_c R \lambda}{c v_H \cos \varphi}. \quad (3)$$

Как следует из (3), единственным параметром, с помощью которого имеется возможность задавать разрешающую способность одноканальной РСА, является скорость носителя v_H . Для МД РСА, размещаемой на одном носителе, такая возможность, естественно, исключается. Поэтому разработчикам МД РСА приходится искать рациональные значения длины волны λ и/или ширины спектра сигнала Δf_c . Кроме того, поскольку время начала и окончания синтезирования в каждом канале различно, то длина полосы обзора также будет отличаться (см. рис. 3). Ширина полосы обзора также будет различна, однако стремятся обеспечить ее примерно одинаковой за счет ширины диаграммы направленности антенн в угломестной плоскости, а также мощности излучения каждого канала (передатчика) $P_{прд}$ для обеспечения заданной дальности R_{max} обнаружения цели с эффективной площадью рассеяния $\sigma_{ц}$ при требуемом отношении сигнал-шум $q_{тр}$ и известных параметрах РСА $\lambda, T_M, G_{прд}, G_{прм}, N_0, N_n, L$:

$$P_{прд} = \frac{R_{max}^4 (4\pi)^3 q_{тр} N_0 L}{T_M N_n G_{прд} G_{прм} \lambda^2 \sigma_{ц}}. \quad (4)$$

Исходя из анализа (4) применительно к нескольким частотным диапазонам, можно утверждать, что динамический диапазон изображений, сформированных на разных частотах, существенно отличается, что существенно усложняет процесс комплексной обработки МД РЛИ. В [5] показано, что существует возможность выравнивания (расширения или нормирования – в зависимости от задач) динамического диапазона изображений, при этом соотношения для выравнивания динамического диапазона РЛИ, например, леса и городской застройки принципиально отличаются. В связи с высокой априорной неопределенностью и смешанностью типов подстилающей поверхности такой подход не позволяет говорить об универсальности предлагаемого решения. Однако в задачах комплексирования МД РЛИ выравнивание динамического диапазона РЛИ все же является необходимым этапом.

Одной из неочевидных, при этом важных особенностей МД РЛИ является отсутствие информационной избыточности, в отличие от оптических изображений. Так, например, в видимом диапазоне ЭМВ объект на изображениях мульти- или гиперспектральной съемки отображается без существенных искажений формы и текстуры, с одинаковым разрешением. Комплексирование таких изображений не представляет особой сложности вследствие информационной избыточности, а целью совместной их обработки является повышение информативности. На РЛИ каждого из диапазонов отображаются только те элементы конструкции объекта, линейные размеры которых сопоставимы с длиной волны. Очевидно, что информация на каждом РЛИ не будет содержать одной и той же общей информации об объекте. Кроме того, далеко не на всех РЛИ будут адекватно отображаться форма, размеры и текстура объекта, что представляет особую сложность при комплексировании МД РЛИ. Такое отображение приводит к значительной потере информации на всех этапах дешифрирования данных ДЗЗ.

Обзор существующих МД РСА. Современный уровень развития радиоэлектроники и теории радиолокации позволяет реализовать многоканальные (многодиапазонные, поляриметрические) РСА космического и воздушного базирования с интерферометрической обработкой и видеорежимом. К таким системам можно отнести достаточно большой список образцов, часть из которых представлена в таблице.

Пример МД РСА и их характеристики
 An example of multi-band SAR and its characteristics

Название	Разработчик	Диапазон, ГГц	Разрешающая способность, м
AIRSAR	Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, США	0,439(P), 1,26(L), 5,3(C)	1
ASAR	NASA / Jet Propulsion Laboratory, США	C, L, P	2.5
DO-SAR	EADS	S, C, X, Ka	< 0.5
E-SAR	DLR, Германия	P, L, C, X	2
EMISAR	DCRS	C, L	2
F-SAR	DLR, Германия	P, L, S, C, X	0.3
GeoSAR	EarthData	P, X	1
IMARC	НПО ВЕГА-М, Россия	VHF, P, L, X	1.5
Компакт	НИИ ТП, Россия	8,6(X), 1,3(L), 0,43(P), 0,14(VHF)	0.5
LORA	FOI	0.2...0.8 (VHF, UHF)	< 1
MEMPHIS	FGAN	Ka, W	0.2
MicroSAR	Space Dynamics Laboratory, США	1,75(L), 5,4(C)	1
NanoSAR B	ImSAR, США	Ku, X, UHF	< 0.3
NanoSAR C	ImSAR, США	Ku, X, UWB, UHF	< 0.3
NuSAR	Space Dynamics Laboratory, США Brigham Young University, США	1,75(L), 9,75(X)	0.3
OrbiSAR	OrbiSAT	P, X	0.5
Pi-SAR	JAXA	L, X	1.5
RAMSES	ONERA	0.4...0.47(P), 1.2...1.4(L), S, C, 9.31...9.61(X), Ka, Ku, W	0.13
SlimSAR	Brigham Young University, США	X, L, UHF	< 0.3
TopoSAR	Intermap Technologies	X, P	1.5
Twin-Otter SAR	Sandia National Laboratories	VHF, UHF, X, Ku, Ka	0.3

Как видно из таблицы, реальных образцов МД РСА, успешно эксплуатируемых в мире, достаточно много. Однако не все разработчики указывают значения рабочих частот, что представляет некоторую сложность при проведении объемного анализа. Несмотря на это, можно получить приближенную оценку параметров косвенным путем по другим известным характеристикам конкретного образца МД РСА. Основными современными тенденциями развития РСА являются:

- повышение информативности РЛИ за счет расширения спектра зондирующего сигнала (увеличения разрешающей способности), многодиапазонного зондирования и полнополяриметрической обработки;
- создание трехмерных радиолокационных портретов за счет интерферометрической обработки;

– повышение оперативности наблюдения (особенно при решении задач видовой разведки) за счет увеличения орбитальной группировки космических аппаратов, расширения полосы, увеличения времени обзора и совместной обработки данных на борту космического или воздушного носителя.

Принципиальным вопросом, мало освещенным в открытых источниках, остается способ комплексирования РЛИ, сформированных одновременно в нескольких частотных диапазонах с помощью МД РСА. Необходимо отметить, что комплексирование РЛИ, полученных с помощью нескольких носителей РСА с разными рабочими частотами, обуславливает необходимость их ко-регистрации (совмещения), что ведет к появлению различного рода ошибок вследствие пространственной декорреляции [6]. Вопросы такого

характера в данной работе не рассматриваются и выходят за рамки проводимых исследований.

Существующие способы комплексирования РЛИ. Известные способы комплексирования изображений можно условно классифицировать по информационным уровням: сигналов, пикселей, признаков и решений (рис. 5). Следует отметить, что характер принимаемого решения зависит от поставленной задачи: в случае сегментации (классификации) подстилающей поверхности – это номер кластера, в случае обнаружения – координаты объекта, в случае распознавания – класс, тип или состояние объекта. Как следует из рис. 5, при таком многообразии подходов к принятию решений каждый из них обусловлен потерей информации на этапе комплексирования, причем характер потерь и ошибок будет различным, в зависимости от выбранного метода комплексирования и характеристик аппаратных средств. Схема комплексирования сигналов, представленная на рис. 5, а, применительно к РСА может соответствовать способам синтеза спектра зондирующего сигнала за счет применения, например, ступенчатой линейной частотной модуляции [7]. Результаты анализа известных способов комплексирования [8–10], соответствующих уровню пикселей на рис. 5, б, показывают, что потеря информации (в частности, яркостных отметок, соответствующих объектам) возможна при вычислении морфологических проекций изображений на форму наиболее информативного изображения, а также при выборе наиболее информативного изображения по критерию максимума собственной энтропии изображения, поскольку в реальных условиях функционирования РСА дестабилизирующие факторы различной природы обуславливают снижение разрешающей способности и искажения на радиолокационных изображениях, что ведет к существенному повышению энтропии РЛИ и, в конечном итоге, приводит к снижению информативности изображения.

Одним из динамичных трендов современной науки в области слияния изображений выступает развитие математического аппарата вейвлет-преобразования. Такой подход широко и успешно используется сейчас в практических приложениях комплексирования гипер- и мультиспектральных изображений. В качестве примера комплексирования на уровне признаков (рис. 5, в) можно привести совместную обработку РЛИ с помощью

вейвлет-преобразования [11, 12]. Сформированные в нескольких частотных диапазонах РЛИ подвергаются радиометрической калибровке с учетом цифровой карты высот, вейвлет-преобразованию с вычислением соответствующих коэффициентов и ко-регистрации РЛИ с формированием одного изображения. Несмотря на расширенные возможности, такой подход позволяет учесть отличия в разрешающей способности каналов РСА лишь за счет радиометрической калибровки [13], что обусловлено ошибками ко-регистрации.

Комплексирование РЛИ на уровне решений (рис. 5, г) носит в большей степени вероятностный характер, в связи с чем решение принимается с учетом вероятностей пропуска и ложной тревоги. Как видно из рис. 5, такой подход является самым трудоемким из приведенных.

Один из наиболее общих подходов, отражающих логику современного комплексирования с учетом признаков всех уровней, представлен на рис. 6 и подробно описан в [14].

Как показывает практика, такой обобщенный подход имеет весьма существенное ограничение: значительные вычислительные затраты, которые невозможно реализовать в большинстве случаев, например на борту воздушного судна или беспилотного летательного аппарата. Кроме того, на основе представленной схемы невозможно осуществить комплексирование МД РЛИ по указанным вначале причинам.

Текстурно-фрактальный подход к комплексированию МД РЛИ. Новейшие исследования в области обработки изображений показывают перспективность применения методов фрактальной теории [15–18]. Такой подход основан на понятиях самоподобия и дробной меры природных процессов и объектов. При этом изображение рассматривается не как совокупность отдельных элементов с определенными характеристиками [19], а как некоторая структура, обладающая внутренними топологическими связями между элементами и характеризующая объект в целом. Рис. 7 поясняет данную концепцию представления РЛИ в разных диапазонах ЭМВ с точки зрения отражающих элементов, соответствующих длинам волн ЭМВ.

Количественная оценка сложности структуры базируется на таких показателях, как дробная фрактальная размерность, фрактальная сигнатура и др. [20, 21]. На сегодняшний день известные методы фрактального анализа РЛИ основаны

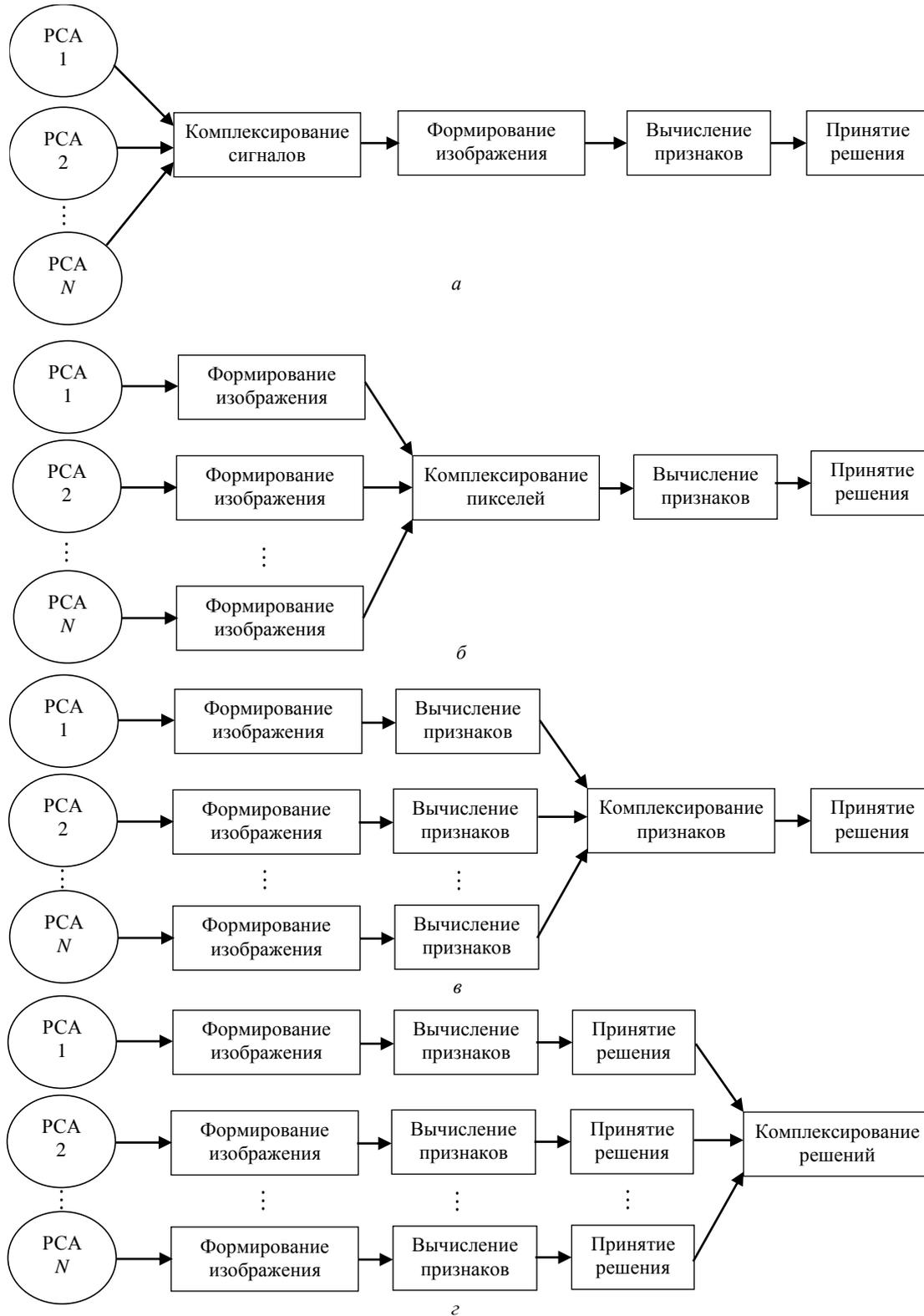


Рис. 5. Комплексирование РЛИ на уровнях: *a* – сигналов; *б* – пикселей; *в* – признаков; *г* – решений

Fig. 5. Radar image fusion on signals (*a*), pixels (*б*), features (*в*) and decisions (*г*) levels

на вычислении отдельных фрактальных признаков. При определении фрактальной размерности проводится масштабирование одного РЛИ, полученного в

одном диапазоне ЭМВ, или генерация дополнительных изображений из исходного. Так, при оценке фрактальной размерности одночастотного РЛИ мето-

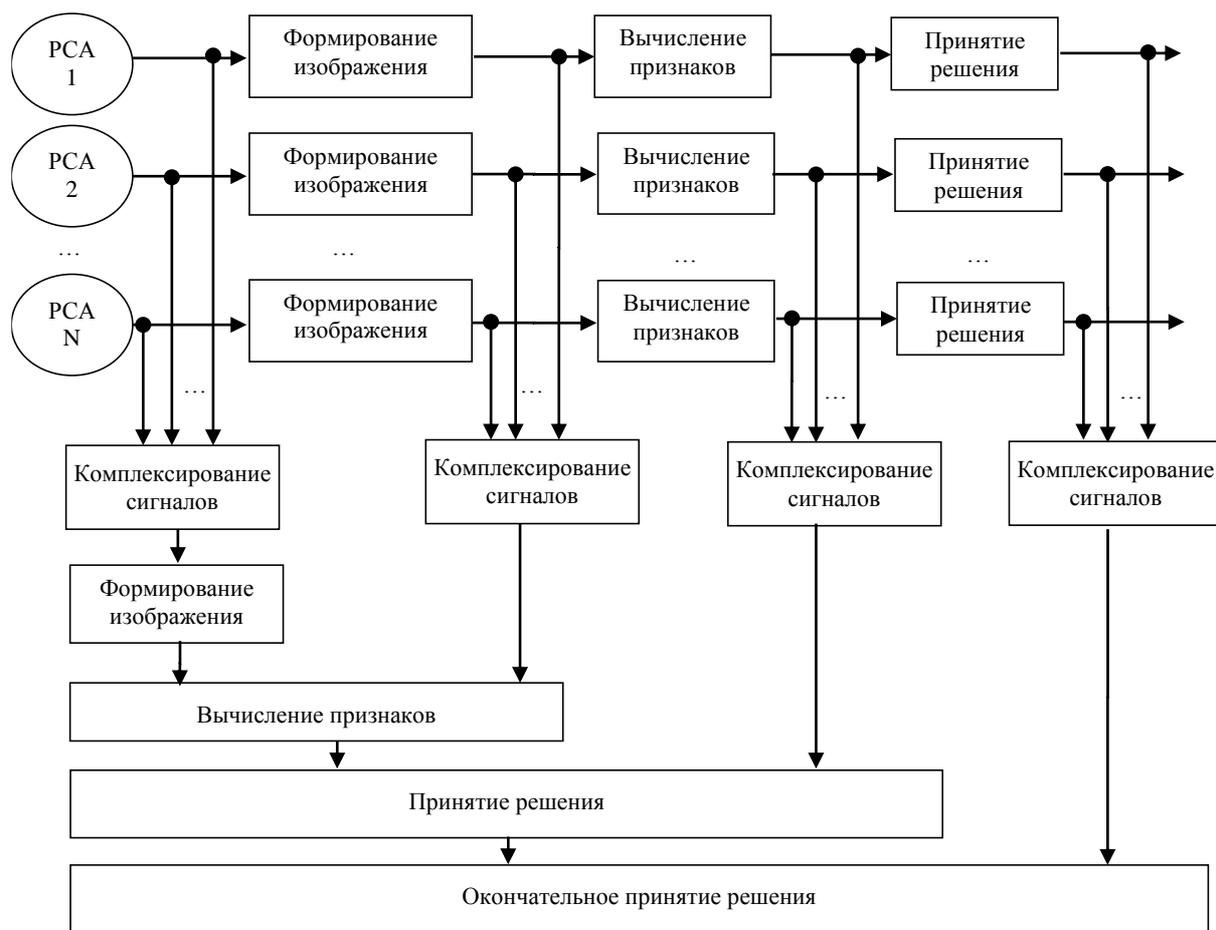


Рис. 6. Комплексирование РЛИ на всех уровнях принятия решения

Fig. 6. Radar complexing image at all decision-making levels

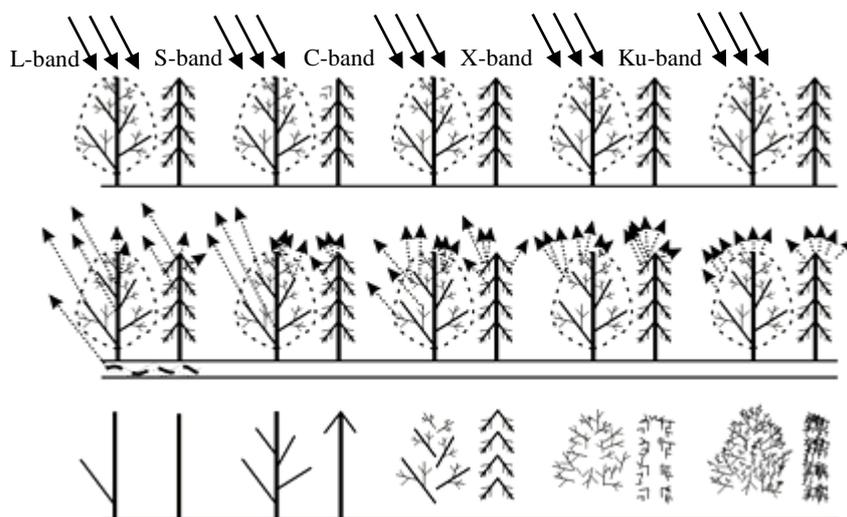


Рис. 7. Отражающие части дерева для различных диапазонов ЭМВ

Fig. 7. Reflective wood parts for different frequency bands

дом итерационных покрытий, выяснилось, что результат вычисления "верхних" покрытий (рис. 8) сопоставим с РЛИ, полученными с разным разрешением в разных частотных диапазонах.

Как видно из рис. 8, методы фрактальной теории органично вписываются в МД РСА, поскольку формируются изображения одного и того же участка местности на разных масштабах (длинах волн), по



Рис. 8. Результаты вычисления "верхних" покрытий и идея их соответствия РЛИ разного разрешения

Fig. 8. Calculation of the "upper" coverings and the idea of their correspondence to radar images with different resolutions

которым возможно непосредственное обнаружение эффекта масштабной инвариантности и вычисление фрактальных и мультифрактальных сигнатур. Таким образом, появляется новая возможность фрактального анализа МД РЛИ, основой которого служит их фрактальное комплексирование – в предположении о том, что наземные объекты обладают (или наоборот, не обладают) масштабно-инвариантными свойствами.

В [22] предложен способ фрактального комплексирования РЛИ, сформированных одновременно в нескольких частотных диапазонах с разным разрешением. Согласно геометрии радиолокационной съемки (см. рис. 2) проводится зондирование участка подстилающей поверхности с некоторым "эталонным" объектом, размеры которого соответствуют цели зондирования, например воздушной радиолокационной разведке объектов бронетехники. Расчет синтезируемой апертуры проводится по (3) для каждого частотного канала РСА в отдельности для достижения требуемой разрешающей способности по дальности и азимуту.

В работе было 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 согласно

$$\varepsilon_n = \left\lceil \frac{w_n - 1}{2} \right\rceil, \quad (5)$$

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

скорость 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. С учетом вычисленных согласно (5) масштабов каждого РЛИ ε_n , их динамический диапазон может быть выравнен, например, согласно выражению

$$z_{\varepsilon n} = \frac{z_n - \min(z_n)}{\max(z_n) - \min(z_n)} + \varepsilon_n, \quad (6)$$

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 изображений с нормированным по (6) с учетом масштабов динамическим диапазоном 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 [23]

$$L_q = \frac{1}{|q|} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln[I(q, \varepsilon)]}{\ln(1/\varepsilon)}, \quad \text{при } q \neq 0, \quad (7)$$

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; $I(q, \varepsilon) = \alpha \sum_i^W \sum_j^W \mu_\varepsilon(i, j)^q$ – обобщенная

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

ε_B – 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 по (7) значения L_q каждого центрального элемента скользящего окна запоминаются в соответствующем элементе двумерной матрицы $D(i, j); i = 1 \dots M; j = 1 \dots N$, $q = 1$, а в случае $q \neq 1$ – в соответствующем элементе трехмерной матрицы $D(q, i, j)$, содержа-

щей элементы исходных радиолокационных изображений одной и той же сцены, полученных одновременно в различных частотных диапазонах.

Результаты. В качестве примера фрактального комплексирования РЛИ многодиапазонной РСА на рис. 9, *a–д* приведены результаты обработки РЛИ одного и того же объекта, синтезированные на пяти разных частотах с различным разрешением. Рис. 9, *e* представляет собой результат комплексирования как поле фрактальных размерностей, вычисленное методом скользящего окна согласно (7) при $q = 1$. На рис. 9, *ж, з* представлены поля мультифрактальных размерностей при порядке скейлингового момента $q = 2$ и $q = 3$ соответственно.

Как следует из самой концепции такого способа комплексирования, заключающейся в задании априорной информации о размере объекта, данный подход можно использовать как вариант структурно-параметрического синтеза системы комплексирования МД РЛИ в целом. Предложенная в [22, 24] схема структурно-параметрического синтеза системы оптимальной текстурно-фрактальной обработки многомерных РЛИ представлена на рис. 10.

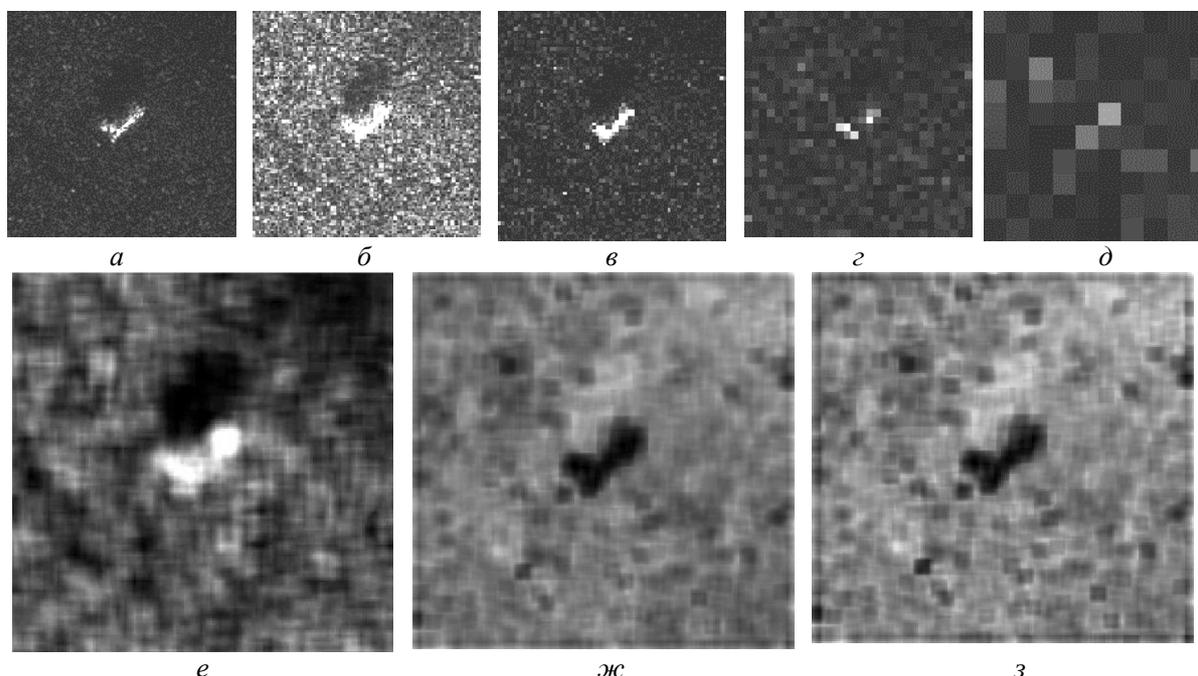


Рис. 9. Исходные РЛИ пяти каналов МД РСА (*a–д*) и результат комплексирования при $q = 1$ (*e*), $q = 2$ (*ж*), $q = 3$ (*з*)

Fig. 9. Initial radar images of five channels of multi-band SAR (*a–д*) and the result of fusion $q = 1$ (*e*), $q = 2$ (*ж*), $q = 3$ (*з*)

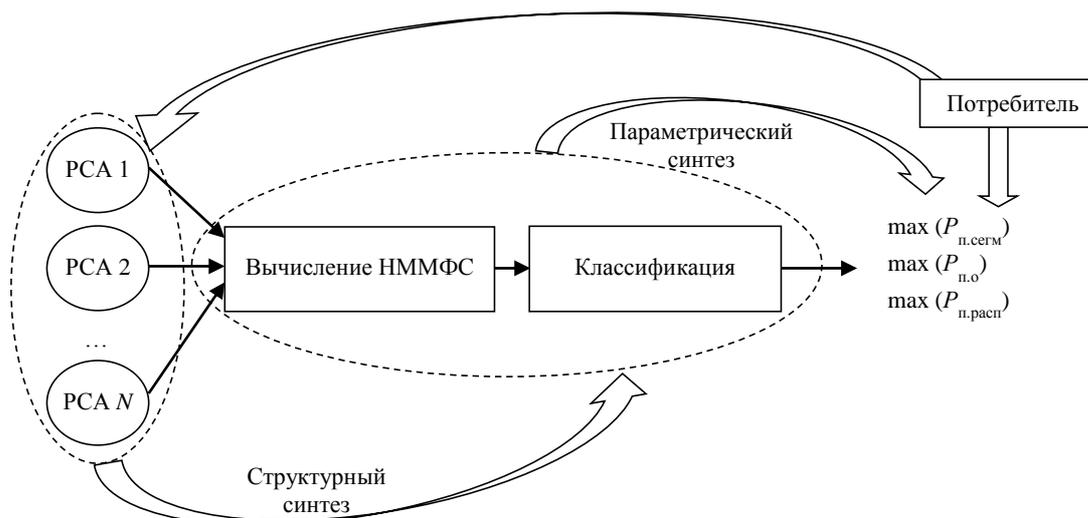


Рис. 10. Схема структурно-параметрического синтеза системы комплексирования МД РЛИ

Fig. 10. A scheme of the structural-parametric synthesis of a multi-band radar complexing image system

Согласно приведенной схеме, потребитель тематической информации сначала определяет целевую функцию – классификация (сегментация) подстилающей поверхности, обнаружение или распознавание объектов, определяемую требованиями к соответствующим вероятностям. На этой основе автоматически формируется состав сенсоров и структура вычислительной системы (структурный синтез), затем определяются параметры вычислителя, обеспечивающие заданные характеристики.

Заключение. Таким образом, в работе проведен системный анализ задачи комплексирования МД РЛИ, в процессе которого дан обзор принципов формирования сигналов и изображений в РСА, указаны особенности формирования РЛИ в различных диапазонах ЭМВ, приведены примеры существующих МД РСА, а также проведен анализ существующих способов комплексирования РЛИ, в результате чего сделан вывод о наличии характерных потерь информации на каждом из уровней принятия решения. В работе предложено использовать текстурно-фрактальный подход, заключающийся в учете масштабно-инвариантных свойств изображений при их формировании – в качестве масштаба изображения целесообразно использовать разрешающую способность РСА. Впервые

введен термин "фрактальное комплексирование", под которым понимается формирование результирующего изображения фрактальным методом, в отличие от известных на данный момент способов комплексирования по фрактальным признакам. Фрактальное комплексирование изображений проводится на основе модифицированного метода итерационных покрытий, в котором вместо верхних покрытий подаются сами изображения разного разрешения. Применение данного способа позволяет существенно повысить информативность систем ДЗЗ, особенно в случае постановки преднамеренных помех и маскирования объектов в некоторых или всех частотных диапазонах. Исходя из возможности «целевого» комплексирования предложен вариант структурно-параметрического синтеза системы комплексирования МД РЛИ. Для достижения требуемых полноты, достоверности и оперативности ДЗЗ с помощью МД РСА необходимо в дальнейшей работе обосновать критерий выбора числа диапазонов, рабочих частот и разрешающей способности, а также исследовать возможности решения задач обнаружения объектов и их распознавания по сформированным в результате комплексирования полям фрактальных и мультифрактальных размерностей.

Список литературы

1. Лихачев В. П., Купряшкин И. Ф., Рязанцев Л. Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. М.: Радиотехника, 2020. 279 с.
 2. Cheney M., Borden B. Synthetic Aperture Radar

Imaging // In: Scherzer O. (eds) Handbook of Mathematical Methods in Imaging. New York: Springer, 2015. P. 763–799. doi: 10.1007/978-1-4939-0790-8_49
 3. Soumekh M. Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MatLab Algorithms. New York: Wiley, 1999, 648 p.

4. Внотченко С. Л., Достовалов М. Ю. Авиационные мобильные малогабаритные радиолокаторы с синтезированной апертурой семейства «Компакт» (принципы реализации и опыт применения) // Журн. радиоэлектроники. 2009. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct09/5/text.html> (дата обращения 27.04.2021)
5. Гурьянов М. А. Преобразование динамического диапазона радиолокационных изображений для различных снимаемых поверхностей // Журн. радиоэлектроники. 2014. № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/9/text.html> (дата обращения 27.04.2021)
6. Кузнецов В. А., Лихачев В. П., Унковский А. В. Алгоритм совмещения радиолокационных изображений по энтропии радиолокационных природных и антропогенных объектов в интересах двухпроходной интерферометрической радиолокационной станции с синтезированной апертурой антенны // Радиотехника. 2021. Т. 85, № 1. С. 104–111. doi: 10.18127/j00338486-202101-14
7. Пат. RU 2372627 C1 G01S 13/89 (2008.03). Способ получения двумерного радиолокационного изображения объекта в большом диапазоне изменения величин эффективных площадей рассеивания локальных центров при многочастотном импульсном зондировании / А. М. Блинковский, С. В. Крюков. Оpubл. 24.03.2009. Бюл. № 31.
8. Пат. RU 2520424 C2 G06T 5/40 (2012.07). Способ комплексирования цифровых многоспектральных изображений земной поверхности / О. Р. Никитин, А. Н. Кисляков, А. А. Шулятьев. Оpubл. 27.06.2014. Бюл. № 18.
9. Пат. RU 2540778 C1 G06T 5/50 (2013.10). Способ комплексирования цифровых полутоновых изображений / В. Н. Тикменов, С. В. Купцов, В. В. Лаптепа, И. А. Козлитин. Оpubл. 10.02.2015. Бюл. № 4.
10. Пат. RU 2692575 C1 G06T 5/50 (2018.01). Способ комплексирования цифровых полутоновых изображений / В. В. Шипко. Оpubл. 25.06.2019. Бюл. № 18.
11. Пат. RU 2342701 C2 G06K 9/40 (2007.08). Способ комплексирования цифровых многоспектральных полутоновых изображений / Е. И. Травина, И. Н. Фадеев. Оpubл. 27.12.2008. Бюл. № 36.
12. Karhe R. R., Chandratre Y. V. RADAR Image Fusion Using Wavelet Transform // International J. of Advanced Engineering, Management and Science (IJAEMS). 2016. Vol. 2, iss. 3. P. 4–13.
13. Simone G., Morabito F. C., Farina A. Multifrequency and Multiresolution Fusion of SAR Images for Remote Sensing Applications // Proc. of 4th International Conf. on Information Fusion, 2001. P. 1321–1327.
14. Multisensor Data Fusion. From Algorithms and Architectural Design to Applications / Ed. by H. Fourati, K. Iniewski. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2016. 663 p. doi: 10.1201/b18851
15. Мандельброт Б. Б. Фрактальная геометрия природы: пер. с англ. А. Р. Логунова / Ин-т компьютерных исследований. М., 2002. 656 с.
16. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. М.: Университетская кн., 2005. 848 с.
17. Potapov A. A., Hao W., Shan X. Fractality of Wave Fields and Processes in Radar and Control. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2020. 280 p.
18. Гуляев Ю. В., Потапов А. А. Применение теории фракталов, дробных операторов, текстов, эффектов скейлинга и методов нелинейной динамики в синтезе новых информационных технологий для задач радиоэлектроники (в частности, радиолокации) // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64, № 9. С. 839–854.
19. Кузнецов В. А. Структура и свойства наземных объектов на изображениях PCA в задачах распознавания // Телекоммуникации. 2012. № 10. С. 31–38.
20. Кузнецов В. А., Потоцкий А. Н. Метод измерения направленной морфологической мультифрактальной сигнатуры текстуры изображений // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 3. С. 39–52.
21. Потапов А. А., Кузнецов В. А., Потоцкий А. Н. Новый класс топологических текстурно-мультифрактальных признаков и их применение для обработки радиолокационных и оптических малоcontrastных изображений // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66, № 5. С. 457–467. doi: 10.31857/S0033849421050107
22. Пат. RU 2746038 C1 G06T 5/50 (2020.09). Способ фрактального комплексирования цифровых полутоновых изображений / А. А. Потапов, В. А. Кузнецов, Е. А. Аликулов. Оpubл. 06.04.2021. Бюл. № 10.
23. Xia Y., Feng D., Zhao R. Morphology-Based Multifractal Estimation for Texture Segmentation // IEEE Transactions on Image Processing. 2006. Vol. 15, iss. 3. P. 614–623. doi: 10.1109/TIP.2005.863029
24. Кузнецов В. А., Марюхненко В. С. Системный подход к решению проблемы фрактального анализа многомерных радиолокационных изображений // Сб. тр. XXIV Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь», 17–19 апр. 2018 г.: в 5 т. Воронеж: Вэлборн, 2018. Т. 2. С. 26–38.

Информация об авторах

Потапов Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук (1994), главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (2002), академик Российской академии естественных наук (2007), академик Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова (2008), почетный профессор Евразийского национального университета (Астана, Казахстан, 2010), почетный профессор Джинанского университета (Гуанджоу, Китай, 2011), президент совместной китайско-русской лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов (2012), член Нижего-

родского математического общества (2017). Автор более 1150 научных работ в отечественных и зарубежных изданиях, в том числе двух патентов и 45 монографий и глав в книгах на русском и английском языках. Сфера научных интересов – статистическая радиофизика, рассеяние и дифракция электромагнитных волн, радиолокация, обработка и распознавание изображений и сигналов, детерминированный хаос, современная топология, фрактальный анализ, дробные операторы, эффекты скейлинга, фрактальные антенны, фрактальная электродинамика, фотоника, метаматериалы и метаповерхности.

Адрес: Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, ул. Моховая, д. 11, корп. 7, Москва, 125009, Россия

E-mail: potapov@cplire.ru

Кузнецов Виктор Андреевич – кандидат технических наук (2012), доцент кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования (2019) ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (Воронеж). Автор более 140 научных работ. Сфера научных интересов – системный анализ, распознавание образов, радиолокация, теория фракталов.

Адрес: ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, д. 54А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: kuzzvictor@mail.ru

Аликулов Елбек Абдукаимович – адъюнкт кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования (2019) ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (Воронеж). Автор более 10 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация, фрактальное комплексирование.

Адрес: ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, д. 54А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: adunkt83@bk.ru

References

1. Lihachev V. P., Kuprjashkin I. F., Rjazancev L. B. *Malogabaritnye mnogofunkcional'nye RLS s nepreryvnyim chastotno-modulirovannym izlucheniem* [Small-sized multifunctional radar with continuous frequency-modulated radiation]. M., *Radiotekhnika*, 2020. 279 p. (In Russ.)
2. Cheney M., Borden B. Synthetic Aperture Radar Imaging. In Scherzer O. (eds) *Handbook of Mathematical Methods in Imaging*. New York, Springer, 2015. doi: 10.1007/978-1-4939-0790-8_49
3. Soumekh M. *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*. New York, Wiley, 1999, 648 p.
4. Vnotchenko S. L., Dostovalov M. Ju. Aviation mobile small-size synthetic aperture radars of the "Compact" family (implementation principles and application experience). *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics]. 2009, vol. 10. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct09/5/text.html> (accessed 27.04.2021) (In Russ.)
5. Gur'janov M. A. Conversion of the dynamic range of radar images for various surveyed surfaces. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics]. 2014, vol. 12. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/9/text.html> (accessed 27.04.2021) (In Russ.)
6. Kuznetsov V. A., Lihachev V. P., Unkovskij A. V. Matching radar images by the entropy of radar shadows of objects in the interests of two-pass interferometric survey. *Radiotekhnika* [Journal Radioengineering]. 2021, vol. 85, no. 1, pp. 104–111. doi: 10.18127/j00338486-202101-14 (In Russ.)
7. Blinkovskij A. M., Krjukov S. V. *Sposob poluchenija dvumernogo radiolokacionnogo izobrazhenija ob#ekta v bol'shom diapazone izmenenija velichin jeffektivnyh ploshhadej rasseivaniya lokal'nyh centrov pri mnogochastotnom impul'snom zondirovanii* [Method of obtaining two-dimensional radar image of object in wide range of Variation of values of effective scattering area of local centres during multifrequency pulsed probing]. Pat. RF 2372627. Publ. 24.03.2009. Bul. 31. (In Russ.)
8. Nikitin O. R., Kisljakov A. N., Shuljat'ev A. A. *Sposob kompleksirovaniya cifrovyh mnogosppektral'nyh izobrazhenij zemnoj poverhnosti* [Method for complexing digital multispectral images of earth's surface]. Pat. RF 2520424. Publ. 27.06.2014. Bul. 18. (In Russ.)
9. Tikmenov V. N., Kupcov S. V., Lapteva V. V., Kozlitin I. A. *Sposob kompleksirovaniya cifrovyh polutonovyh izobrazhenij* [Method for integrating digital half-tone images]. Pat. 2540778. Publ. 10.02.2015. Bul. 4. (In Russ.)
10. Shipko V. V. *Sposob kompleksirovaniya cifrovyh polutonovyh izobrazhenij* [Method of integrating digital halftone images]. Pat. RF 2692575. Publ. 25.06.2019. Bul. 18. (In Russ.)
11. Travina E. I., Fadeev I. N. *Sposob kompleksirovaniya cifrovyh mnogosppektral'nyh polutonovyh izobrazhenij* [Method of complexing digital multispectral half-tone images]. Pat. RF 2342701. Publ. 27.12.2008. Bul. 36. (In Russ.)
12. Karhe1 R. R., Chandratre Y. V. RADAR Image Fusion Using Wavelet Transform. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science (IJAEMS)*. 2016, vol. 2, no. 3, pp. 4–13.

13. Simone G., Morabito F.C., Farina A. Multifrequency and Multiresolution Fusion of SAR Images for Remote Sensing Applications. Proc. of 4th International Conf. on Information Fusion. 2001, pp. 1321–1327.
14. *Multisensor Data Fusion. From Algorithms and Architectural Design to Applications*. Ed. by H. Fourati, K. Iniewski. Taylor & Francis Group, 2016, 663 p. doi: 10.1201/b18851
15. Mandel'brot B. B. *Fraktal'naja geometrija prirody* [Fractal geometry of nature]. M., Institut komp'yuternyh issledovanij, 2002, 656 p. (In Russ.)
16. Potapov A. A. *Fraktaly v radiofizike i radiolokacii: Topologija vyborki* [Fractals in Radiophysics and Radar: Sample Topology]. M., Universitetskaja kniga, 2005, 847 p. (In Russ.)
17. Potapov A. A., Hao W., Shan X. *Fractality of Wave Fields and Processes in Radar and Control*. Guangzhou, South China University of Technology Press, 2020, 280 p.
18. Guljaev Ju. V., Potapov A. A. Application of fractal theory, fractional operators, textures, scaling effects, and nonlinear dynamics methods in the synthesis of new information technologies in radio electronics (specifically, radiolocation). *Radiotekhnika i jelektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics]. 2019, vol. 64, no. 9, pp. 839–854. (In Russ.)
19. Kuznetsov V. A. Structure and properties of ground objects on SAR images in recognition problems. *Telekommunikacii* [Telecommunications]. 2012, vol. 10, pp. 31–38. (In Russ.)
20. Kuznetsov V. A., Pototskii A. N. Method of measuring directional morphological multifractal signatures of the texture images. *Uspehi sovremennoj radiojelektro-niki* [Telecommunications and Radio Engineering]. 2017, vol. 3, pp. 39–52. (In Russ.)
21. Potapov A. A., Kuznetsov V. A., Pototskii A. N. New Class of Topological Textural Multifractal Descriptors and Their Application for Processing Low-Contrast Radar and Optical Images. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2021, vol. 66, no. 5, pp. 581–590. doi: 10.1134/S1064226921050090
22. Potapov A. A., Kuznetsov V. A., Alikulov E. A. *Sposob fraktal'nogo kompleksirovanija cifrovyh polutonovyh izobrazhenij* [Method for fractal complexing of multifrequency radar images]. Pat. RF 2746038. Publ. 06.04.2021. Bul.10. (In Russ.)
23. Xia Y., Feng D., Zhao R. Morphology-Based Multifractal Estimation for Texture Segmentation. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2006, vol. 15, no. 3, pp. 614–623. doi: 10.1109/TIP.2005.863029
24. Kuznetsov V. A., Maryuhnenko V. S. *Sistemnyj podhod k resheniju problemy fraktal'nogo analiza mnogomernyh radiolokacionnyh izobrazhenij* [System approach to solving the problem of multidimensional radar images fractal analysis]. Proc. XXIV Int. Scientific-technical Conference "Radiolocation, navigation, communication" 17–19 Apr. 2018. Voronezh, Vjelborn, 2018, vol. 2, pp. 26–38. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander A. Potapov, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (1994), Chief Research of V. A. Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences (2002), Academician of Russian Academy of Natural Sciences (2007, Russia), Academician of the Academy of engineering science of A. M. Prokhorov (2008, Russia), Honorary Professor of the Eurasian National University (Kazakhstan, Astana, 2010), Honorary Professor of the University of Jinan (China, Guangzhou, 2011). President of the Sino-Russian Laboratory of Informational Technologies and Signals Fractal Processing (2012), member of the Nizhny Novgorod Mathematical Society (2017). Author of over 1150 scientific publications in domestic and foreign publications, including two patents and 45 monographs and chapters in books in Russian and English. Area of expertise: statistical radio physics, scattering and diffraction of electromagnetic waves, radar, image and signal processing and recognition, deterministic chaos, modern topology, fractal analysis, fractional operators, scaling effects, fractal antennas, fractal electrodynamics, photonics, metamaterials and metasurfaces.

Address: V. A. Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, 11-7 Mokhovaya St., Moscow, 125009 Russia

E-mail: potapov@cplire.ru

Viktor A. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.) (2012), Assistant professor (2019). Author of over 140 scientific publications. Area of expertise: systems analysis, pattern recognition, radar, fractal theory.

Address: MERC AF Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, 54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh, 394064 Russia

E-mail: kuzzviktor@mail.ru

Elbek A. Alikulov, postgraduate (2019). Author of over 10 scientific publications. Area of expertise: radar, fractal radar image fusion.

Address: MERC AF Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, 54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh, 394064 Russia

E-mail: adunkt83@bk.ru