

Ю. В. Петров¹, В. А. Рогожин¹

¹ БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ ПРИ НАЛИЧИИ МОЩНЫХ ПОМЕХ

В статье анализируются проблемы, возникающие в процессе формирования радиолокационных изображений (РЛИ) в бортовых радиолокационных станциях (РЛС). На результат формирования РЛИ, особенно в условиях ограниченного времени обработки, существенно влияет ряд факторов, которые могут снизить качество РЛИ и ограничить возможности их дальнейшего использования. Авторами выполнен анализ этих факторов и рассмотрены некоторые возможные пути снижения их влияния и улучшения характеристик РЛИ. Предложен новый адаптивный алгоритм обработки и формирования РЛИ, проведено моделирование его работы. Полученные результаты подтвердили эффективность разработанного решения, выражающуюся в улучшении качества сформированного РЛИ и его информативности. Предлагаемые новые алгоритмы обработки и формирования РЛИ требуют значительных дополнительных вычислительных ресурсов и объемов памяти, однако могут быть реализованы с использованием современных бортовых вычислительных средств.

Ключевые слова: радиолокационное изображение, алгоритм обработки, моделирование

Введение

Современные отечественные и зарубежные самолеты и вертолеты оборудуются радиолокационными станциями (РЛС) различных типов. Круг задач, при решении которых используется РЛС, постоянно увеличивается и уже не ограничивается формированием «простых» обзорных радиолокационных изображений (РЛИ) [1, 2]. К классическому формированию обзорного РЛИ добавляются различные задачи, основные из которых перечислены ниже:

- поиск движущихся целей на фоне условно неподвижных элементов подстилающей поверхности с отображением соответствующей информации на формируемом РЛИ в удобном для экипажа виде (задача селекции движущихся целей – СДЦ);
- автосопровождение неподвижных и движущихся целей (АС) с одновременным формированием соответствующей информации – графической (для экипажа) и параметрической (для бортового комплекса);
- совместное использование РЛИ различных масштабов и разрешений и цифровых карт местности с формированием единого комбинированного изображения, включающего в себя также различную визуализирующую информацию, в том числе по задачам СДЦ, АС и др. [3];

- формирование РЛИ высокого разрешения с использованием режимов цифрового синтеза искусственной апертуры антенны (РСА), сложных сигналов.

Как показывает анализ [2, 4], отраженный радиолокационный сигнал, получаемый при помощи современных РЛС, содержит в себе всю необходимую для решения поставленных задач информацию. Однако извлечение этой информации требует достаточно сложной и ресурсоемкой обработки, которая может быть выполнена как на уровне радиолокационного сигнала [5–7], так и на уровне изображения [8, 9] с целью повышения его качества и информативности.

Несмотря на широкий круг теоретических возможностей обработки, на практике часто оказывается, что вычислительные ресурсы бортовых систем ограничены, и это сказывается на характеристиках формируемых РЛИ. В сочетании с требованием формировать РЛИ на борту практически в реальном времени данный фактор существенно ограничивает возможности обработки сигналов и влияет на качество получаемой информации, особенно в условиях воздействия мощных помех в зоне обзора, наличия очень сильных целей, а также при существенно неоднородном типе поверхности, попадающей на РЛИ. Ниже

представлены результаты выполненного авторами анализа влияния указанных факторов и методов противодействия им.

Анализ факторов, влияющих на качество РЛИ

По результатам теоретических исследований и анализа экспериментальных данных, выявлены основные факторы, влияющие на качество формируемого РЛИ. Условно их можно разделить на две группы. К первой относятся проблемы, связанные с собственным движением РЛС:

- ошибки измерения радиальной скорости, приводящие к линейному набегу фазы траекторного сигнала, что обуславливает сдвиг РЛИ по азимуту. Это, в свою очередь, ведет, во-первых, к ошибкам определения координат объектов, во-вторых, к искажениям при построении больших РЛИ (ошибкам совмещения отдельных фрагментов изображения);
- применение синтезирования искусственной апертуры антенны приводит к ухудшению РЛИ на направлениях, близких к направлению вектора скорости летательного аппарата [10]. Как следствие, возможны потери информации об объектах, находящихся в наиболее важном направлении.

Влияние указанных факторов можно устранить или значительно уменьшить только за счет внесения изменений в аппаратную часть РЛС либо за счет существенного изменения алгоритмов обработки сигналов – внедрения системы микронавигации, применения алгоритмов автофокусировки [11, 12]. Решение этих задач – предмет отдельного исследования, выходящего за рамки настоящей статьи.

Вторая группа факторов – это проблемы, которые так или иначе связаны с наличием в зоне обзора неоднородностей, мощных отражений и помех. Рассмотрим их более подробно.

Во-первых, нормировка обработанного сигнала при формировании РЛИ по величине среднеквадратического отклонения (СКО) может приводить к усечению максимумов ярких целей, что ведет к потере информации о наиболее «мощной» цели в зоне обзора. Пример результатов моделирования обработки сигналов и построения РЛИ показан на рис. 1. Сравнение сигналов от двух разных целей показывает, что уровень сигнала от цели 1 почти в два раза больше уровня сигнала от цели 2 (рис. 1а и 1б соответственно). При этом на итоговом РЛИ цели 1 и 2 имеют одинаковый уровень яркости – 255 (максимальное значение). Это не позволяет провести распознавание разных целей, которые на индикаторе выглядят «одинаково».

Во-вторых, применение сложного сигнала, необходимое для обеспечения требуемой разрешающей способности по дальности [2, 4], может сопровождаться появлением боковых лепестков значительного уровня (более 10% от максимума). Их появление характерно при наличии в изображении мощных (ярких) точечных и распределенных отражающих объектов. Так, на рис. 2а показано РЛИ с «ярким» объектом и последовательностью боковых лепестков меньшей интенсивности. Их наличие рядом с отметкой от цели мешает работе РЛС в таких режимах, как СДЦ и АС. В режиме СДЦ возможен неправильный выбор отметки (от бокового лепестка вместо цели), а в режиме АС возможно его ошибочное сопровождение (либо переход на сопровождение бокового лепестка в процессе выполнения режима). Ситуация усугубляется в случае одновременного проявления некорректной нормировки. При этом уровни сигналов от отражающего объекта и от боковых лепестков могут сравняться (рис. 2б).

В-третьих, наличие в зоне обзора мощного яркого источника отражения (либо помехи, в том числе преднамеренной) без применения специальных способов обработки приводит к некорректной нормировке и, как следствие, к значительному снижению яркости остальных отметок. При этом фон изображения значительно затемняется, и объекты на нем могут стать неразличимыми. Пример проявления данного эффекта представлен на рис. 3. Исходное изображение – достаточно контрастное с хорошей детализацией целей и фона (рис. 3а). На рис. 3б показан тот же самый участок земной поверхности, но зона обзора поверхности сместилась так, что в правой части появились множественные отметки от ярких целей (населенный пункт). Видно, что остальная часть изображения затемнена, рельеф и цели различаются хуже. При этом яркость выбранной для наблюдения характерной цели практически не уменьшилась (246 и 251 соответственно). На рис. 3в – прежнее изображение, но в левую часть в рамках моделирования добавлена вертикальная светлая линия, имитирующая мощную помеху (имитирующие помеху значения были добавлены до обработки и формирования РЛИ). Видно, что исходное изображение стало менее читаемым, яркость наблюдаемой цели снизилась до 154. На рис. 3г – тот же эксперимент, но моделируется воздействие помехи большей интенсивности (три линии вместо одной). Исходное изображение при этом становится почти неразличимым, яркость цели упала до 69. Изображение на рис. 3г практически непригодно для использования.

Влияние указанных факторов можно уменьшить за счет дополнительной обработки информации

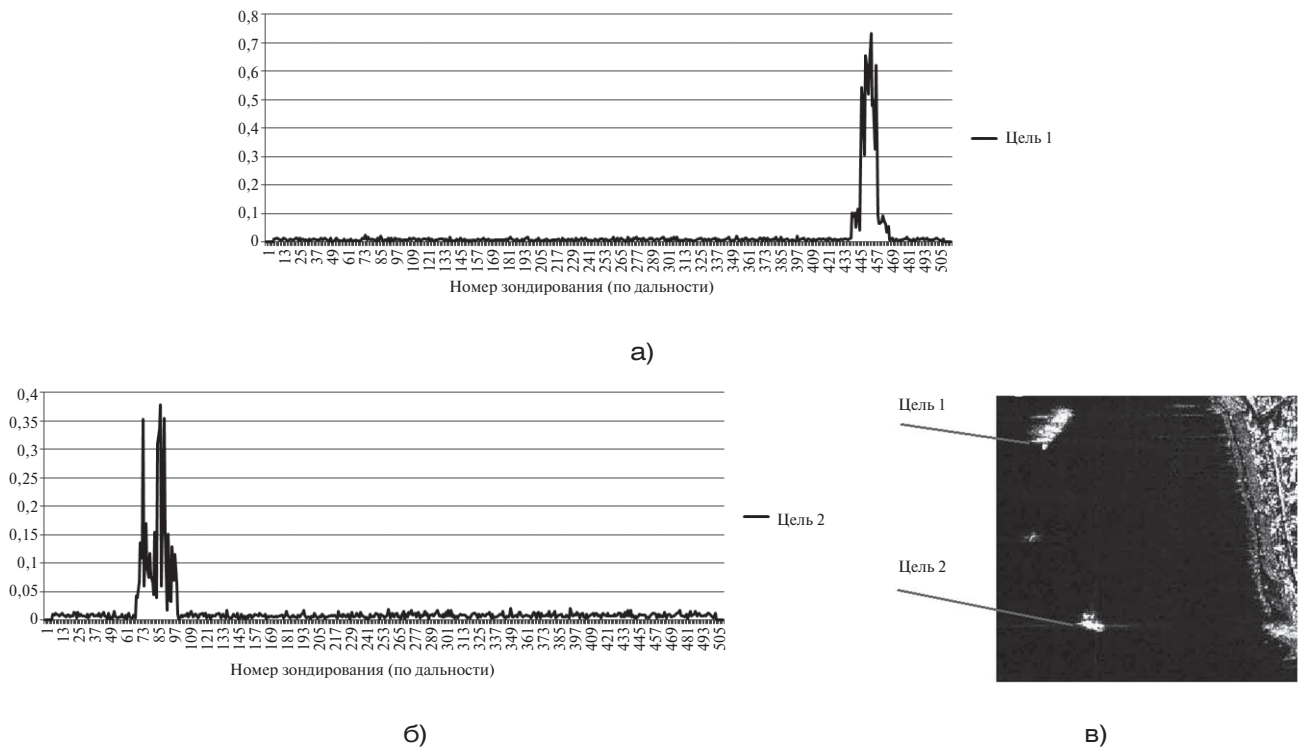


Рисунок 1. Влияние нормировки сигналов на распознавание целей

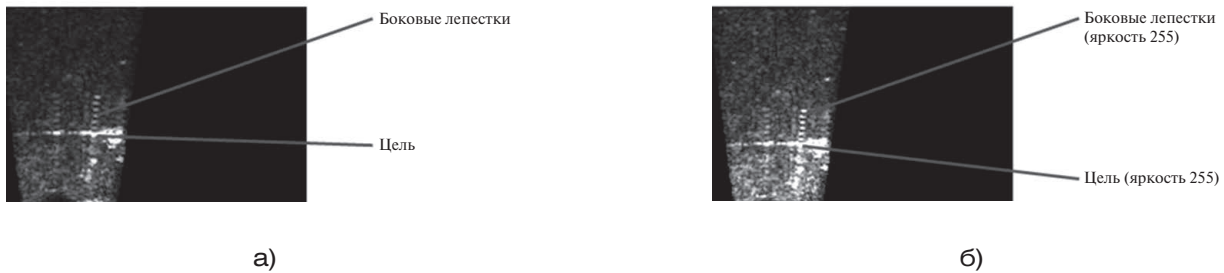


Рисунок 2. Радиолокационные изображения при корректной (а) и некорректной (б) нормировках сложных сигналов

перед либо непосредственно на этапе формирования РЛИ без доработок аппаратной части РЛС – только за счет внесения изменений в программную часть.

Анализ РЛИ, полученных с использованием существующих алгоритмов обработки, показал, что изображения формируются преимущественно лишь в ограниченном диапазоне яркостей даже в тех случаях, когда итоговый результат можно считать удовлетворительным. Так, на рис. 4 представлены достаточно качественное РЛИ и график распределения яркостей в нем. Видно, что примерно 40% диапазона (от значений яркости 150 до 254) практически не используется, хотя для визуального восприятия этот диапазон наиболее удобен, а яркости уровней от 0 до 30 – напротив, слабо различимы и сливаются с черным. Также необходимо отметить большое количество точек с максимальной

яркостью 255 (3409, то есть около 1,3%), что свидетельствует об усечении максимумов ярких целей и потере информации о них.

На рис. 5 представлены «неудачное» (малоинформативное) РЛИ и анализ распределения яркостей в нем. Видно, что максимальных значений яркости практически нет (всего 13 против 3409 на рис. 4), около 80% диапазона яркостей не используются (от значений яркости 50 до 254). Само изображение не может эффективно применяться экипажем для обнаружения целей на фоне подстилающей поверхности, совмещения с цифровыми картами и решения других задач.

Анализ большого количества изображений показал, что в ряде случаев их можно улучшить существующими алгоритмами (нормировка к максимуму, нормировка по СКО, подбор коэффициентов и др.). Но пока не удается решить задачу

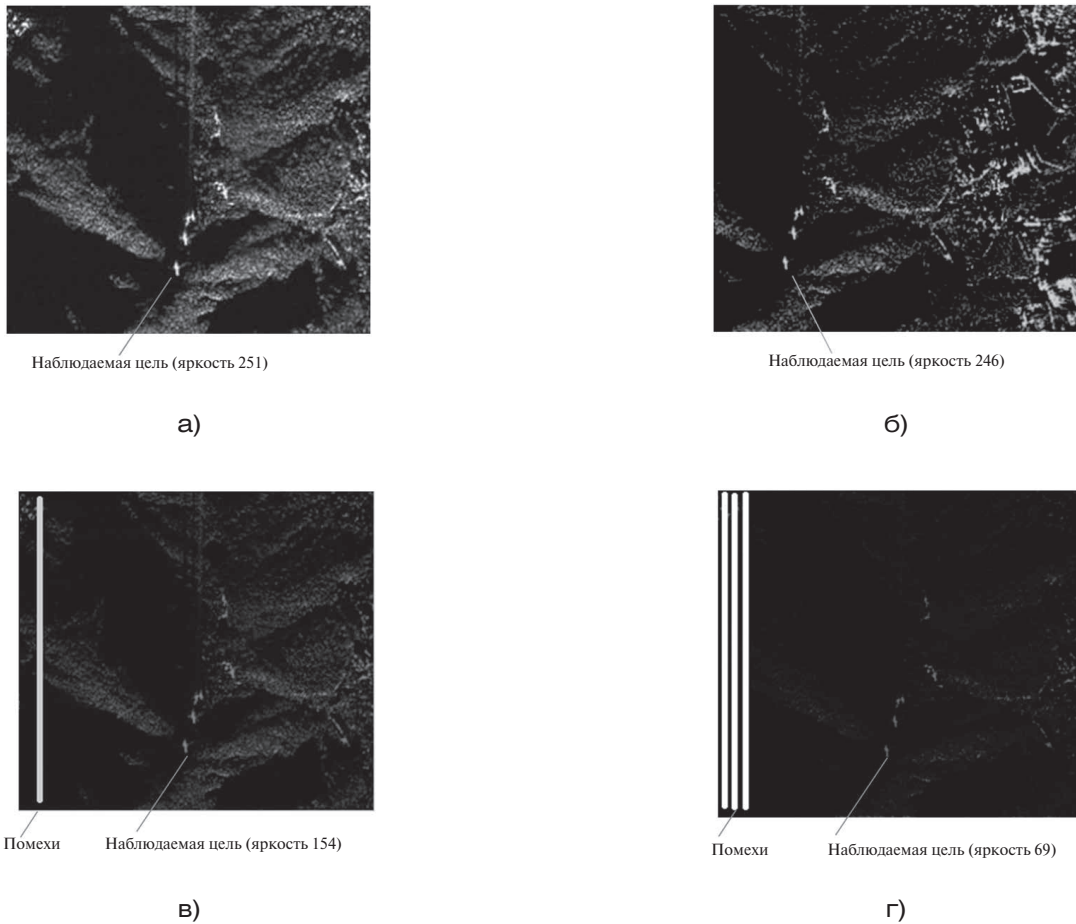


Рисунок 3. Исходное радиолокационное изображение (а); влияние на него ярких целей (б) и мощных помех (в, г)

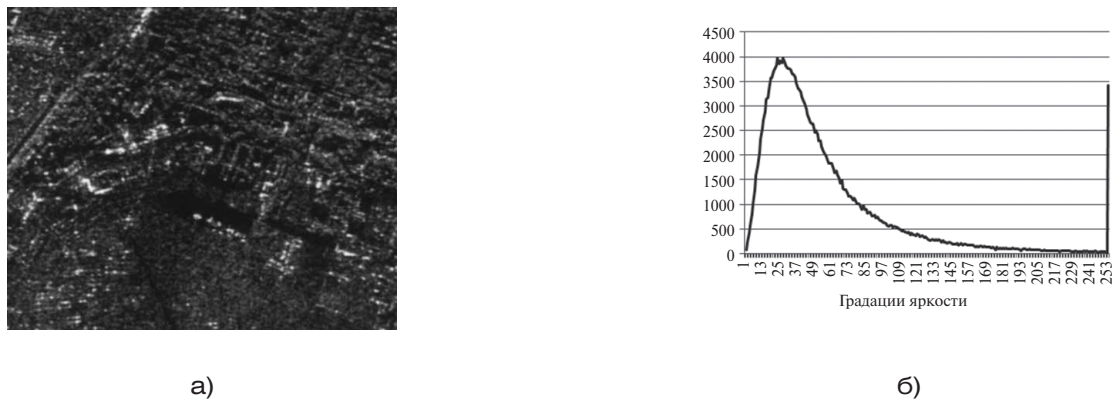


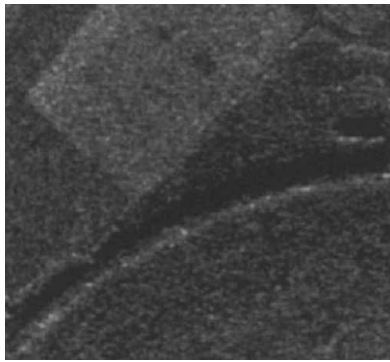
Рисунок 4. Высокдетальное радиолокационное изображение (а) и распределение яркостей в нем (б)

автоматизации подбора параметров, при этом диапазон используемых яркостей в большинстве случаев недостаточен – на уровне примера, представленного на рис. 4, или хуже.

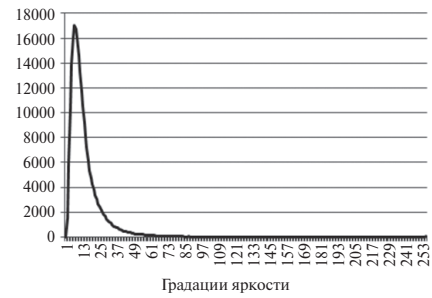
Адаптивный алгоритм обработки и формирования РЛИ

С целью повышения качества РЛИ в существующих и перспективных бортовых РЛС были

рассмотрены различные методики обработки сигналов и уже сформированных изображений. В частности, рассмотрена возможность нормировки не по всему сформированному массиву сигнала, а на основе предварительного анализа и построения гистограмм распределения. Также проанализированы применяемые в оптике методы и алгоритмы адаптивного выравнивания яркостей изображения.

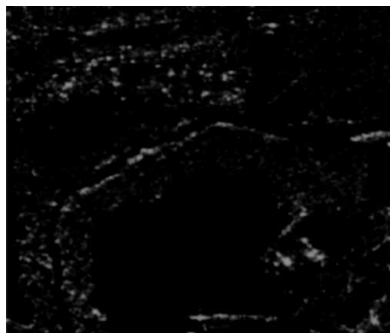


а)

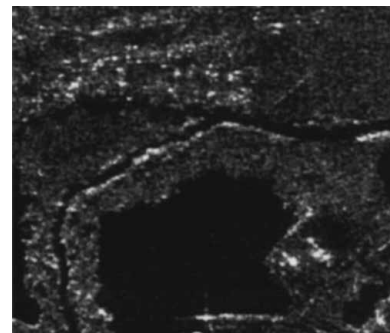


б)

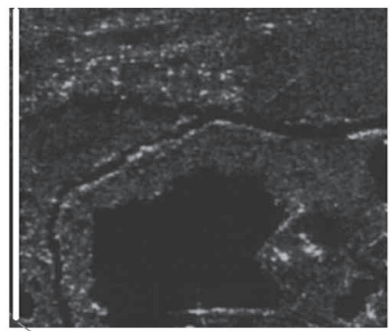
Рисунок 5. Радиолокационное изображение низкого качества (а) и распределение яркостей в нем (б)



а)

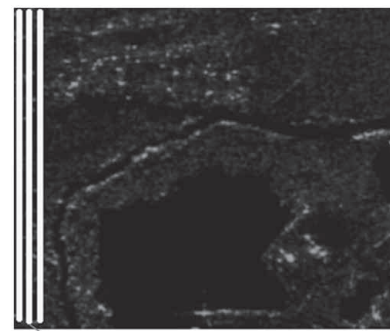


б)



Помехи

в)



Помехи

г)

Рисунок 6. Исходное радиолокационное изображение низкого качества (а); РЛИ после адаптивной обработки (б) и РЛИ при наличии мощных помех после адаптивной обработки (в, г)

Выполнена разработка и адаптация алгоритмов к применению в существующих бортовых РЛС, проведено предварительное моделирование их работы. Результаты представлены на рис. 6. В качестве примера исходного РЛИ было взято изображение низкого качества с практически неразличимым фоном и сложно идентифицируемыми яркими целями (рис. 6а). В результате адаптивной обработки, которая применялась к сигналу до формирования РЛИ (вместо традиционного алгоритма

нормировки), получено изображение, представленное на рис. 6б. Видно, что появился фон местности, цели стали «читаемы», а само РЛИ – удобным для восприятия.

В качестве эксперимента в исходный сигнал были добавлены значения, моделирующие воздействие мощной помехи различной интенсивности (по аналогии со случаем, рассмотренным на рис. 3в и 3г). В результате применения адаптивной обработки сформированы РЛИ (рис. 6в и 6г),

которые имеют чуть меньшую яркость по сравнению с исходным (рис. 6б), однако сохранили информативность и удобство для восприятия. Анализ распределения яркостей изображений на рис. 6в и 6г показывает, что при построении РЛИ используется практически весь диапазон яркостей. Для примера представлен график распределения яркостей с РЛИ на рис. 6в (рис. 7). Максимальная яркость 255 на рис. 7 не показана для удобства восприятия графика, количество точек с яркостью 255 – около 5 тыс., что соответствует площади добавленной помехи.

Выводы

Качество формирования РЛИ в бортовых РЛС зависит не только от аппаратных возможностей комплекса и алгоритмов обработки радиолокационных сигналов, но и от обработки, производимой при формировании РЛИ. Наличие в зоне обзора РЛС большого числа ярких отражающих объектов, а также мощных помех приводит к существенным яркостным искажениям формируемых РЛИ, причем в ряде случаев РЛИ становятся практически непригодными для дальнейшего использования. Яркостные искажения РЛИ можно устранить или в значительной степени уменьшить только за счет разработки и внедрения соответствующих алгоритмов обработки (на этапе формирования РЛИ) и модернизации существующего программного обеспечения. По результатам моделирования предложенный новый адаптивный алгоритм обработки и формирования РЛИ подтвердил свою



Рисунок 7. График распределения яркостей РЛИ после адаптивной обработки

эффективность, выражающуюся в практически полном использовании диапазона яркостей. Так, в примере на рис. 6б и 6в используется весь диапазон градаций яркости – от 0 до 255. Наличие очень интенсивных помех (рис. 6г) приводит лишь к незначительному ухудшению качества РЛИ, а количество точек с максимальной яркостью на изображении при этом составляет чуть более 5% от площади РЛИ. Большая же часть точек РЛИ лежит в наиболее удобном для зрительного восприятия диапазоне яркостей от 50 до 150.

Внедрение новых алгоритмов требует значительных дополнительных вычислительных ресурсов и объемов памяти. Поэтому новые алгоритмы обработки РЛИ могут быть внедрены либо после модернизации существующих бортовых вычислителей, либо в новых РЛС, создаваемых с использованием современных вычислительных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов В. Н., Горяинов В. Т., Кулин А. Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.
2. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиовидение. Радиолокационные станции дистанционного зондирования земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
3. Комплексирование информации от разнородных источников в бортовых комплексах обеспечения поисково-спасательных операций / В. Н. Гармаш, Д. М. Коробочкин, С. А. Матвеев, Ю. В. Петров, С. А. Рудыка, Т. М. Сухов // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 139–146.
4. Справочник по радиолокации. В 2-х книгах. Книга 1 / под ред. М. И. Скольника. М.: Техносфера, 2014. 672 с.
5. Доросинский Л. Г. Оптимальная обработка радиолокационных изображений, формируемых в РСА. М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2017. 212 с.
6. Методы формирования и обработки сигналов в первичных радиолокационных станциях / В. А. Сеницын, Е. А. Сеницын, С. Ю. Страхов, С. А. Матвеев. СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, 2016. 214 с.
7. Кузьмин С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. радио, 1974. 432 с.
8. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. 3-е изд. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
9. Гуров В. С. и др. Обработка изображений в авиационных системах технического зрения. М.: Физматлит, 2016. 234 с.
10. Справочник по радиолокации. В 2-х книгах. Книга 2 / под ред. М. И. Скольника. М.: Техносфера, 2014. 680 с.
11. Рогожин В. А. Оценка допустимых величин ошибок определения проекции скорости ЛА при синтезировании апертуры антенны // Актуальные вопросы ракетно-космической техники и технологий: сб. трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых БГТУ. Вып. 4. СПб.: БГТУ «Военмех», 2006. С. 237–239.
12. Петров Ю. В., Рогожин В. А., Аникин С. Н., Куликов Е. А. Компенсация сдвига радиолокационных изображений в РСА ДЗЗ. 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017). Севастополь, 10–16 сентября 2017 г. С. 1555–1561.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Юрий Витальевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры радиоэлектронных систем управления, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (921) 926-63-39, e-mail: petrov-i4@yandex.ru.

Рогожин Василий Александрович, к.т.н., доцент кафедры радиоэлектронных систем управления, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (921) 955-70-48, e-mail: rogozhin@mail.ru.

For citation: Petrov Yu. V., Rogozhin V. A. Images formation with powerful interference in on-board radars. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 6, pp. DOI

Yu. V. Petrov, V. A. Rogozhin

IMAGES FORMATION WITH POWERFUL INTERFERENCE IN ON-BOARD RADARS

The article analyzes the problems arising in the process of radar images (RI) formation in onboard radar. In conditions of limited processing time the RI formation a number of factors can reduce the results. This can reduce the quality of the RI and limit their future use. The article analyzes these factors and considers some possible ways to reduce their influence and improve the characteristics of the generated radar images. The development of a new adaptive algorithm for processing and formation of the RI, the simulation of its work. The results confirmed the effectiveness of the proposed solution, expressed in improving the quality of the formed RI and its information content. Proposed by the authors new algorithms for processing and formation of RI require significant additional computing resources and memory, but can be implemented using modern on-Board computing facilities.

Keywords: radar image, processing algorithm, modeling

REFERENCES

1. Antipov V.N., Goryainov V.T., Kulin A.N., et al. *Radiolokatsionnye stantsii s tsifrovym sintezirovaniem apertury anteny* [Radar with digital synthesizing antenna aperture]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1988, 304 p. (In Russian).
2. Kondratenkov G.S., Frolov A. Yu. *Radiovidenie. Radiolokatsionnye stantsii distantsionnogo zondirovaniya zemli* [Radio vision. Earth remote sensing radar stations]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2005, 368 p. (In Russian).
3. Garmash V.N., Korobochkin D.M., Matveev S.A., Petrov Yu. V., Rudyka S.A., Sukhov T.M. Complexing information from different sources in the on-board systems search and rescue operations. *Voprosy radioelektroniki*, 2018, no. 7, pp. 139–146. (In Russian).
4. Skolnik M., editor. *Radar Handbook*. McGraw-Hill, 2008, 1328 p.
5. Dorosinskii L.G. *Optimalnaya obrabotka radiolokatsionnykh izobrazhenii, formiruemykh v RSA* [Optimum processing of radar images, generated in SAR]. Moscow, Akademiya Estestvoznaniya Publ., 2017, 212 p. (In Russian).
6. Sinitsyn V.A., Sinitsyn E.A., Strakhov S. Yu., Matveev S.A. *Metody formirovaniya i obrabotki signalov v pervichnykh radiolokatsionnykh stantsiyakh* [Methods of forming and processing signals in primary radar stations]. Saint-Petersburg, BSTU VOENMEH Publ., 2016, 214 p.
7. Kuzmin S.Z. *Osnovy teorii tsifrovoi obrabotki radiolokatsionnoi informatsii* [Fundamentals of the theory of digital processing of radar information]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974, 432 p. (In Russian).
8. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. 3rd ed. Pearson, 2007, 976 p.
9. Gurov V.S., et al. *Obrabotka izobrazhenii v aviatsionnykh sistemakh tekhnicheskogo zreniya* [Image processing in aviation vision systems]. Moscow, Fizmatlit Publ, 2016, 234 p. (In Russian).
10. Skolnik M., editor. *Radar Handbook*. McGraw-Hill, 2008, 1328 p.
11. Rogozhin V. A. Estimation of permissible errors of determining the projection speed of the aircraft during the synthesis of the antenna aperture. In: *Actual issues of rocket and space technique and technology*. 4th ed. Saint-Petersburg, BSTU VOENMEH Publ., 2006, pp. 237–239.
12. Petrov Yu. V., Rogozhin V. A., Anikin S.N., Kulikov E. A. Radar image shift compensation in remote sensing SAR. (Conference proceedings) XXVII Mezhdunarodnaya Krymskaya konferentsiya «SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii». Sevastopol, 10–16.09.2017, pp.1555–1561. (In Russian).

AUTHORS

Petrov Yuriy, Ph. D., assistant professor, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», 1, 1st Krasnoarmejskaja St., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (921) 926-63-39, e-mail: petrov-i4@yandex.ru.

Rogozhin Vasiliy, Ph. D., assistant professor, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», 1, 1st Krasnoarmejskaja St., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (921) 955-70-48, e-mail: rogozhin@mail.ru.