

Ю. В. Марков, А. С. Боков, В. Г. Важенин, В. В. Мухин, М. Ю. Нестеров, А. А. Иофин

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Yu. V. Markov, A. S. Bokov, V. G. Vazhenin, V. V. Mukhin, M. Yu. Nesterov, A. A. Iofin

### MODELING REFLECTED RADAR SIGNALS FOR MULTI-CHANNEL EARTH REMOTE SENSING SYSTEM

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Разработка и совершенствование радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли воздушного базирования актуальна для повышения точности и безопасности полетов, особенно при автоматической навигации и беспилотном использовании, а также при плохой видимости, на высоких скоростях (не допускающих ручное пилотирование) или в плохих погодных условиях. Для разработки и исследования алгоритмов обработки сигналов, принятых РЛС, целесообразно использовать компьютерное математическое моделирование. *Материалы и методы.* По известным алгоритмам и математическим выражениям построена модель отраженного сигнала для многоканальных бортовых РЛС. Построенная математическая модель была программно реализована в среде MATLAB. При моделировании проводится дополнительная обработка сигнала, выраженная в построении радиолокационного изображения поверхности. *Результаты.* Разработана и реализована модель отраженных сигналов, которая позволяет строить и исследовать радиолокационные изображения поверхности в широком диапазоне условий применения РЛС. *Выводы.* Разработанная модель и ее реализация позволяют проводить исследования сигналов и данных радиолокационного изображения в координатах дальность-доплер, которые могут быть использованы при решении широкого круга задач радиолокации и радионавигации.

**Ключевые слова:** математическая модель, многоканальный радиолокационный сигнал, бортовая радиолокационная система с синтезированной апертурой, радиолокационное изображение, координаты доплеровского диапазона.

**Abstract.** *Background.* The development and improvement of airborne radar systems for remote sensing is relevant for improving the accuracy and safety of flights, especially with automatic navigation and unmanned use, as well as with poor visibility, at high speeds (not allowing manual piloting) or in bad weather conditions. For the development and research of signal processing algorithms adopted by the radar, it is advisable to use computer mathematical modeling. *Materials and methods.* Using well-known algorithms and mathematical expressions, a model of the reflected signal for multichannel airborne radars is built. The constructed mathematical model was software implemented in the MATLAB environment. When modeling, additional signal processing is carried out, expressed in constructing a radar image of the surface. *Results.* A model of reflected signals was developed and implemented, which allows one to construct and study radar images of the surface in a wide range of radar conditions. *Conclusions.* The developed model and its implementation allow the study of signals and radar data in the range-Doppler coordinates, which can be used to solve a wide range of radar and radio navigation issues.

**Keywords:** mathematical model, multichannel radar signal, airborne synthetic-aperture radar system, radar image, Doppler-range coordinates.

#### Введение

Неконтактные методы получения информации о поверхности Земли, ее рельефе, объектах на ней или в ее недрах составляют основу дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1]. Для случая активных авиационных и космических радиолокационных систем (РЛС) при этом измеряются коли-

чественные характеристики отраженного Землей электромагнитного поля: мощность, фаза, время распространения, спектральный состав, поляризационные свойства и др.

Для эффективного решения ряда навигационных и локационных задач рассматриваются вопросы измерения абсолютных и относительных координат летательных аппаратов (ЛА) и параметров целей, в том числе при совершенствовании существующих и разработке новых бортовых РЛС (БРЛС), многофункциональных радиовысотометрных систем (РВС) и радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА).

Разработка и совершенствование перспективных радиолокационных систем ДЗЗ воздушного базирования актуальна для повышения точности и безопасности полетов, особенно при автоматической навигации и беспилотном использовании, а также при плохой видимости, на высоких скоростях (не допускающих ручное пилотирование) или в плохих погодных условиях.

Общим для всех систем ДЗЗ активной радиолокации является то, что они используют в качестве источника информации эхо-сигнал, отраженный подстилающей поверхностью. А оценка информационных параметров отраженного сигнала и построение радиолокационного изображения (РЛИ) подстилающей поверхности возможны благодаря точно известной форме излученного зондирующего радиосигнала.

С этой точки зрения бортовые РЛС, РВС (в том числе на базе радиовысотометров – РВ) могут использовать общие алгоритмы формирования и обработки радиолокационных сигналов, отраженных от различных типов земной поверхности [11]. Поэтому они, их модели и алгоритмы работы, могут быть рассмотрены в обобщенной задаче ДЗЗ, в том числе для получения РЛИ в координатах дальность-доплер [2, 3].

### Постановка задачи и методы ее решения

Для разработки и исследования алгоритмов обработки принятых РЛС сигналов очень важно обладать информацией об этих сигналах, их статистических и функциональных свойствах на выходе передающей антенны, на входе и выходе радиоприемного устройства РЛС. Также необходима верификация алгоритмов работы РЛС. Эти задачи могут быть решены с помощью натуральных экспериментов в виде тестовых полетов или в виде натурального, полунатурного или математического моделирования. Преимущество математического моделирования с помощью ЭВМ заключается в его высокой гибкости, простоте реализации, возможности многократного воссоздания условий и, следовательно, в экономической эффективности, т.е. в отсутствии высоких затрат всех видов ресурсов (включая время и аппаратуру) на его проведение.

Исходя из вышесказанного, был разработан программный комплекс моделирования сигналов, принимаемых многоканальной бортовой РЛС ЛА. Комплекс предусматривает возможность моделирования сигналов как одно-, так и многоканальных РЛС при различных видах зондирующих сигналов (импульсный, непрерывный), при широком диапазоне параметров полета ЛА, его траекторий, параметров сигнала и антенной системы, подстилающей поверхности. Также комплекс предусматривает построение РЛИ поверхности в координатах дальность-доплер, предназначенное для оценки возможности и совершенствования принципов применения моделируемых сигналов и самих РЛИ.

Базовой в комплексе является одноканальная версия модели. Структура моделирования сигналов одного канала представлена на рис. 1. Для построения модели одноканальной радиолокационной или радионавигационной системы ЛА необходимо построить ряд моделей ее составных частей:

- модель траектории движения ЛА;
- модель антенной системы бортовой РЛС;
- модель подстилающей поверхности и ее объектов;
- модель зондирующего и отраженного сигналов.

Подстилающая поверхность и объекты на ней моделируются в виде набора элементарных отражателей, заменяющих собой допустимо малые участки поверхности – facets.

Все созданные модели необходимо объединить в единый комплекс моделирования, обеспечить их взаимодействие и обмен информацией. После моделирования сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, с целью проверки его валидности необходимо осуществить соответствующую обработку полученных данных. В результате обработки целесообразно получить РЛИ поверхности в координатах дальность-доплер.

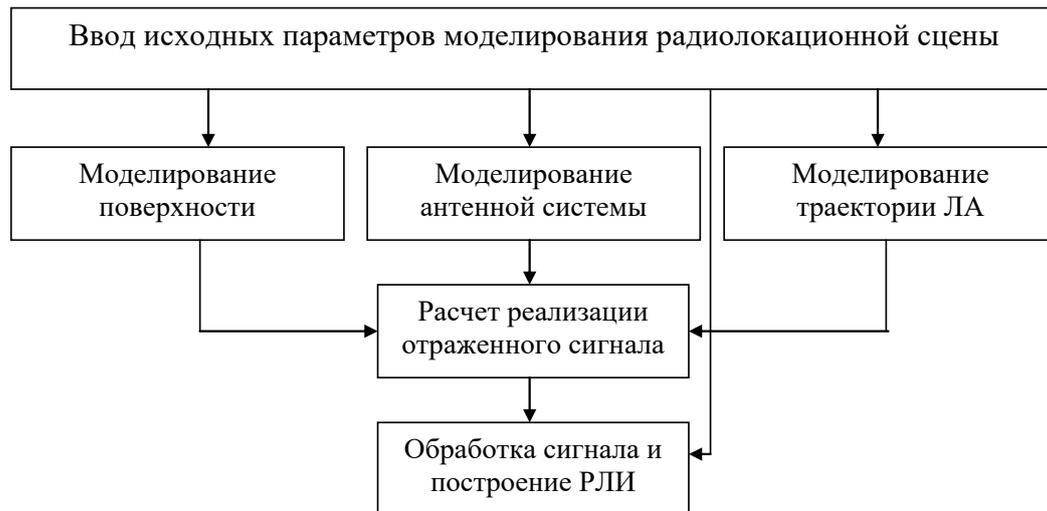


Рис. 1. Структура модели одного канала БРЛС

На первом этапе моделирования вводятся исходные данные для моделирования различных компонентов программного комплекса. Некоторые исходные данные могут быть общими для разных элементов общей модели. Необходимо ввести следующие исходные данные:

- исходная высота полета  $H$ ;
- скорости полета по трем составляющим вектора движения  $V_x, V_y, V_z$ ;
- углы эволюции ЛА (крен и тангаж);
- параметры диаграмм направленности приемных и передающих элементов антенной системы (КНД, ширина, при особых требованиях – форма ДНА);
- углы отклонения осей антенн от вертикальной оси ЛА;
- несущая частота передатчика;
- длина зондирующего импульса (для импульсной БРЛС);
- скважность следования импульсов (для импульсной БРЛС);
- количество импульсов, излученных на траектории моделирования (для импульсной БРЛС);
- девиация частоты (для БРЛС с непрерывным излучением);
- период модуляции (для БРЛС с непрерывным излучением);
- количество целых периодов модуляции на траектории моделирования (для БРЛС с непрерывным излучением);
- период или частота дискретизации сигналов;
- отношение мощности сигнала к мощности шумов;
- параметры ДОР поверхности;
- средняя величина крупномасштабных неровностей поверхности;
- тип поверхности и число facets;
- скорость и направление ветра в приповерхностном воздушном слое;
- балльность волнения водной поверхности;
- средний коэффициент затухания при отражении от facets;
- степень использования лучей ДНА антенн при формировании пятна облучения.

На базе введенных исходных данных строятся первичные модели: отражающей поверхности, антенной системы и траектории полета ЛА. На основе первичных моделей по известным алгоритмам и математическим выражениям [4–10] строится (рассчитывается), собственно, модель отраженного сигнала. При необходимости (при обработке сигнала) можно построить РЛИ поверхности.

Многоканальная система радиолокационного обзора строится на основе группы взаимосвязанных одноканальных систем. Ее структура представлена на рис. 2.

При моделировании многоканальной системы принимается, что каждый из моделируемых каналов независим, т.е. каждый из каналов представляет собой сигнал, принимаемый одной приемной антенной. Передающая антенна при этом может быть как общей для всех или группы каналов, так и собственной для каждого.

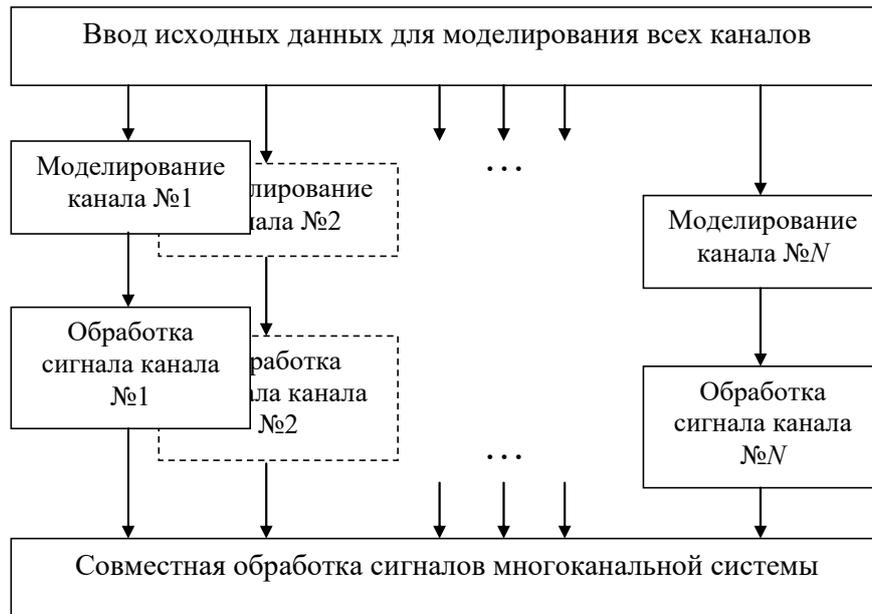


Рис. 2. Структура многоканальной модели

Также при моделировании поверхности принимается, что фацетное поле модели поверхности общее для всех каналов и отраженные сигналы для всех каналов в той или иной мере учитывают свойства этой поверхности.

На первом этапе моделирования вводятся исходные данные для моделирования  $N$  одноканальных БРЛС. Некоторые исходные данные могут быть общими для разных элементов общей модели. Необходимо ввести исходные данные, которые можно разбить на несколько групп.

Исходные данные о параметрах полета ЛА, общие для всех каналов:

- исходная высота полета  $H$ ;
- скорости полета по трем составляющим вектора движения  $V_x, V_y, V_z$ ;
- углы эволюции ЛА (крен и тангаж).

Исходные данные о модели и параметрах поверхности, общие для всех каналов:

- ширина ДОР поверхности;
- средняя величина крупномасштабных неровностей поверхности;
- тип поверхности и число фацетов;
- скорость и направление ветра в приповерхностном воздушном слое;
- балльность волнения водной поверхности;
- средний коэффициент затухания при отражении от фацета;

Исходные данные о параметрах антенной системы и параметрах зондирующего сигнала:

- ширины диаграмм направленности приемной и передающей антенны (при особых требованиях – их формы);
- углы отклонения осей антенн от вертикальной оси ЛА;
- несущая частота передатчика;
- длина зондирующего импульса (для импульсной БРЛС);
- скважность следования импульсов (для импульсной БРЛС);
- количество импульсов, излученных на траектории моделирования (для импульсной БРЛС);
- девиация частоты (для БРЛС с непрерывным излучением);
- период модуляции (для БРЛС с непрерывным излучением);
- количество целых периодов модуляции на траектории моделирования (для БРЛС с непрерывным излучением);
- период дискретизации сигналов;
- отношение мощности сигнала к мощности шумов.

При этом параметры приемной антенны для каждого канала будут уникальными, остальные параметры могут быть как общими, так и уникальными.

На основе исходных данных, как общих для каждого канала, так и собственных, рассчитываются реализации принимаемого траекторного сигнала для всех каналов системы. Затем для каждого канала проводится обработка сигнала и строится РЛИ. На заключительном этапе работы комплекса построенные РЛИ могут пройти совместную обработку с целью получения общего изображения, построения стереоизображения, оценки перемещений объектов и т.д.

### Результаты модельных экспериментов

Для оценки работы комплекса были проведены несколько модельных экспериментов.

В первом эксперименте смоделирован случай горизонтального полета ЛА, одноканальная версия системы. Антенна РЛС направлена вертикально вниз (высотомерный вариант).

Проведем моделирование при следующих тестовых условиях:

- высота – 100 м;
- скорость ЛА – 100 м/с;
- число facets поверхности – 10 000;
- дистанция синтезирования – 5 м.

Использовался импульсный зондирующий сигнал:

- длительность импульса – 20 нс;
- скважность импульсов – 5409;
- количество импульсов – 287.

РЛИ поверхности представлено на рис. 3.

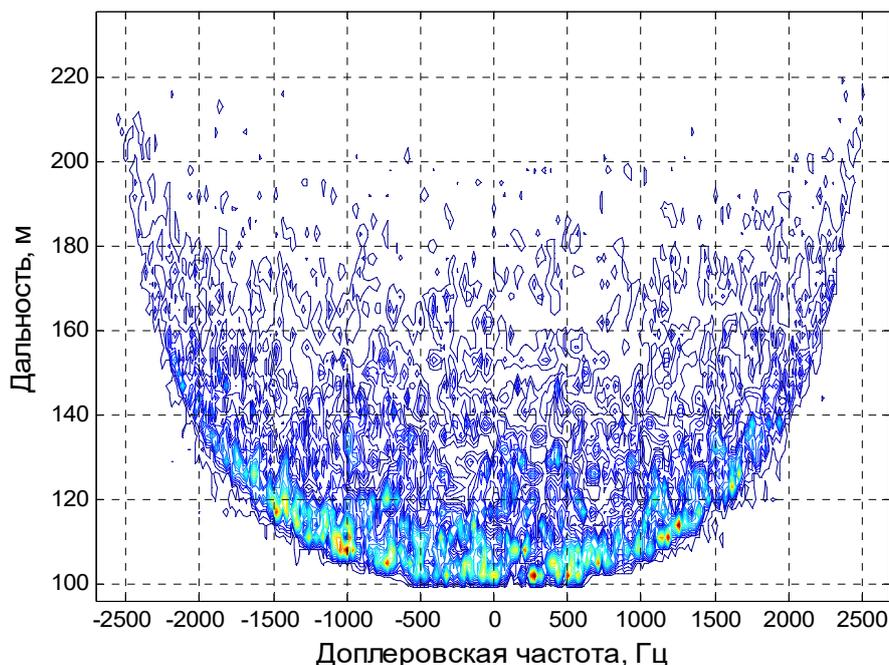


Рис. 3. РЛИ поверхности в координатах дальность-доплер

РЛИ на рис. 3 несет в себе информацию о расположении элементарных отражателей на поверхности (ярких точек) в пределах пятна облучения (используется антенна с широкой диаграммой направленности) и их геометрических отношениях, степень теплоты цвета пропорциональна отраженной энергии сигнала. Такое РЛИ не является картой местности в строгом понимании этого слова. Геометрия расположения facets сильно искажена. В частности, при использовании только одной антенны, направленной вертикально вниз, невозможно отличить отражения от facets, находящихся справа и слева ЛА. Также в РЛИ происходят растяжения и сжатия координатной плоскости подстилающей поверхности на различных участках. Тем не менее подобное РЛИ может быть использовано при решении задач как радиолокации, так и радионавигации. На рис. 4 представлен массив РЛИ той же поверхности в виде 3-мерного графика. Высота пиков на поверхности пропорциональна энергии отраженного сигнала, здесь она убывает с ростом наклонной дальности от РЛС.

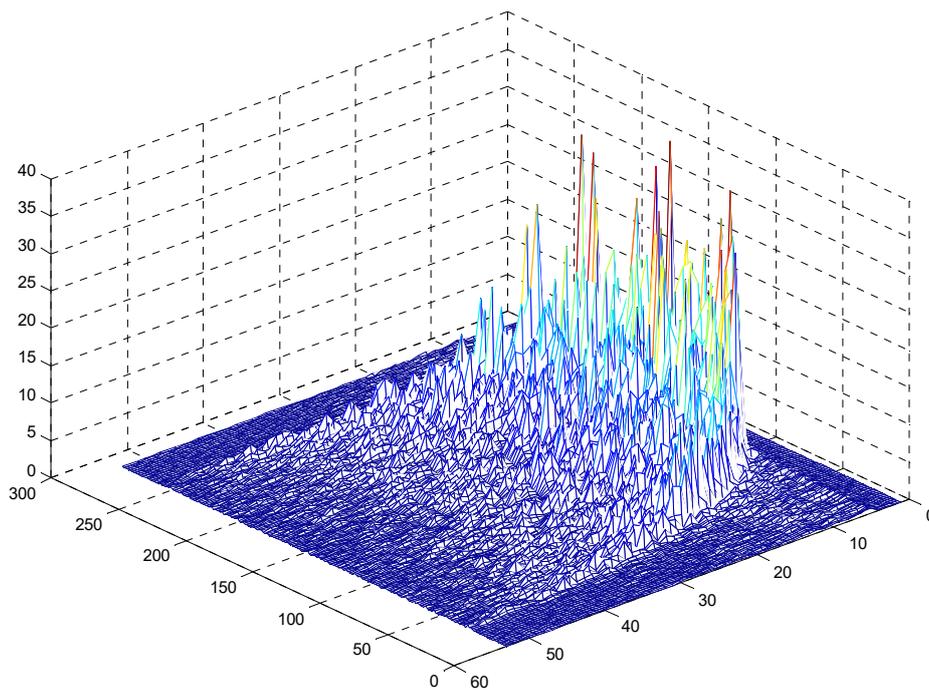


Рис. 4. РЛИ поверхности в виде 3-мерного графика

В следующем эксперименте смоделирован случай горизонтального полета ЛА, при работе двух каналов БРЛС. Геометрия антенной системы БРЛС представлена на рис. 5. В данном эксперименте две пары приемопередающих антенн направлены под углом  $30^\circ$  вперед и отклонены от вертикали также на  $30^\circ$ . Ширина диаграммы направленности всех антенн –  $35^\circ$ .

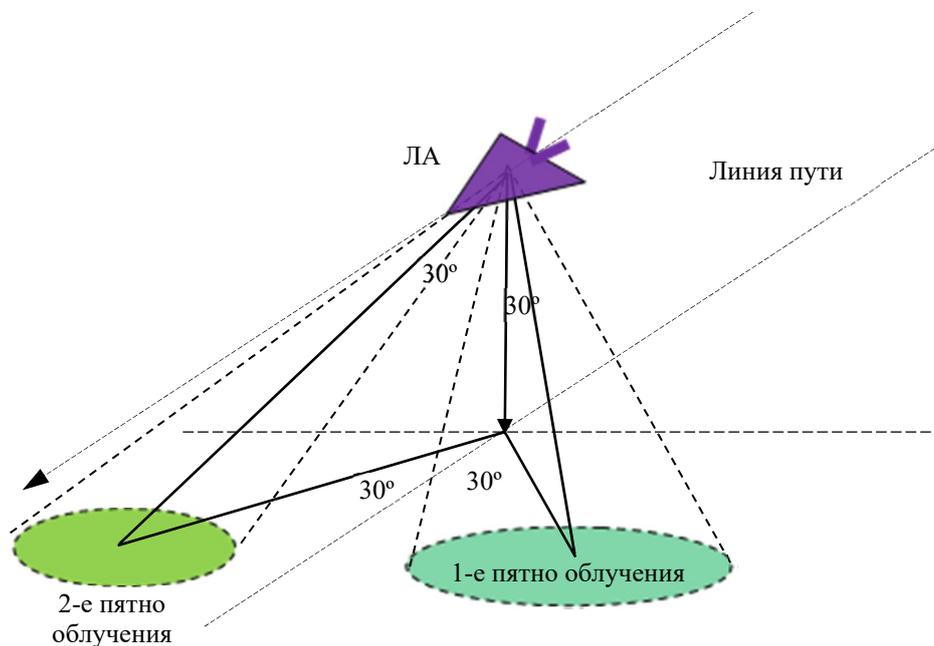


Рис. 5. Геометрия антенной системы БРЛС при двойном передне-боковом обзоре

Проведем моделирование при следующих тестовых условиях:

- высота – 100 м;
- скорость ЛА – 100 м/с;
- число facets поверхности – 1000;
- дистанция синтезирования – 5 м.

Использовался импульсный зондирующий сигнал:

- длительность импульса – 20 нс;
- скважность импульсов – 5409;
- количество импульсов – 287.

В результате эксперимента получена группа из двух РЛИ.

На рис. 6 представлена группа РЛИ при двойном передне-боковом обзоре. Заметно, что РЛИ для различных каналов коррелированы между собой, так как отражают одну и ту же поверхность. Но так как эта поверхность облучается в каждом канале по своему, то между изображениями существуют отличия, особенно заметные для больших дальностей.

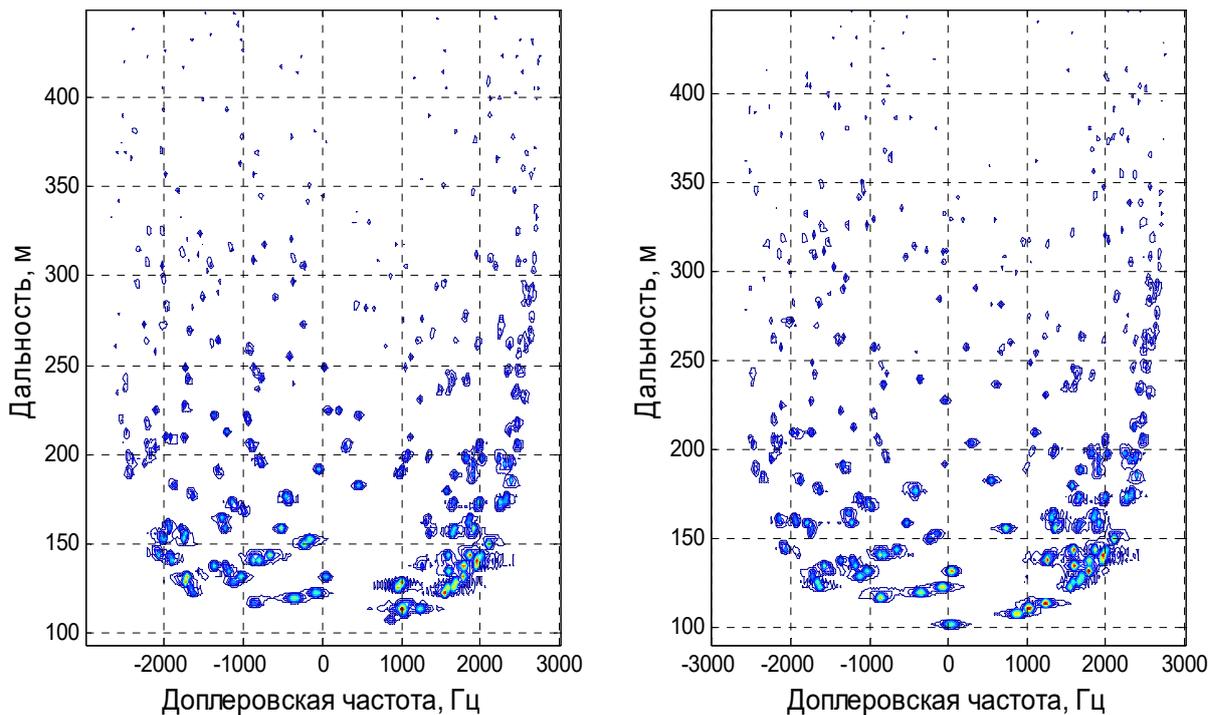


Рис. 6. Группа РЛИ БРЛС при двойном передне-боковом обзоре

В третьем эксперименте промоделирован случай горизонтального полета ЛА при работе двух каналов БРЛС, но применяется передне-боковой и боковой обзор. Геометрия антенной системы БРЛС представлена на рис. 7. В данном эксперименте одна пара приемопередающих антенн направлена под углом  $30^\circ$  вперед и отклонена от вертикали также на  $30^\circ$ . А вторая пара антенн отклонения в продольной плоскости не имеет, а в поперечной отклонена также на  $30^\circ$ .

Проведем моделирование при следующих тестовых условиях:

- высота – 100 м;
- скорость ЛА – 100 м/с;
- число facets поверхности – 1000;
- дистанция синтезирования – 5 м.

Использовался импульсный зондирующий сигнал:

- длительность импульса – 20 нс;
- скважность импульсов – 5409;
- количество импульсов – 287;

В результате эксперимента получена группа из двух РЛИ.

На рис. 8 представлена группа РЛИ при боковом и передне-боковом обзоре. Заметно, что РЛИ для различных каналов также коррелированы между собой, но в существенно меньшей степени. Это объясняется тем, что поверхность облучается практически на разных участках. Тем не менее на некоторых участках сходство РЛИ разных каналов значительно, например, в подрадарной зоне, т.е. при наименьших дальностях и вблизи нулевого доплеровского сдвига частот.

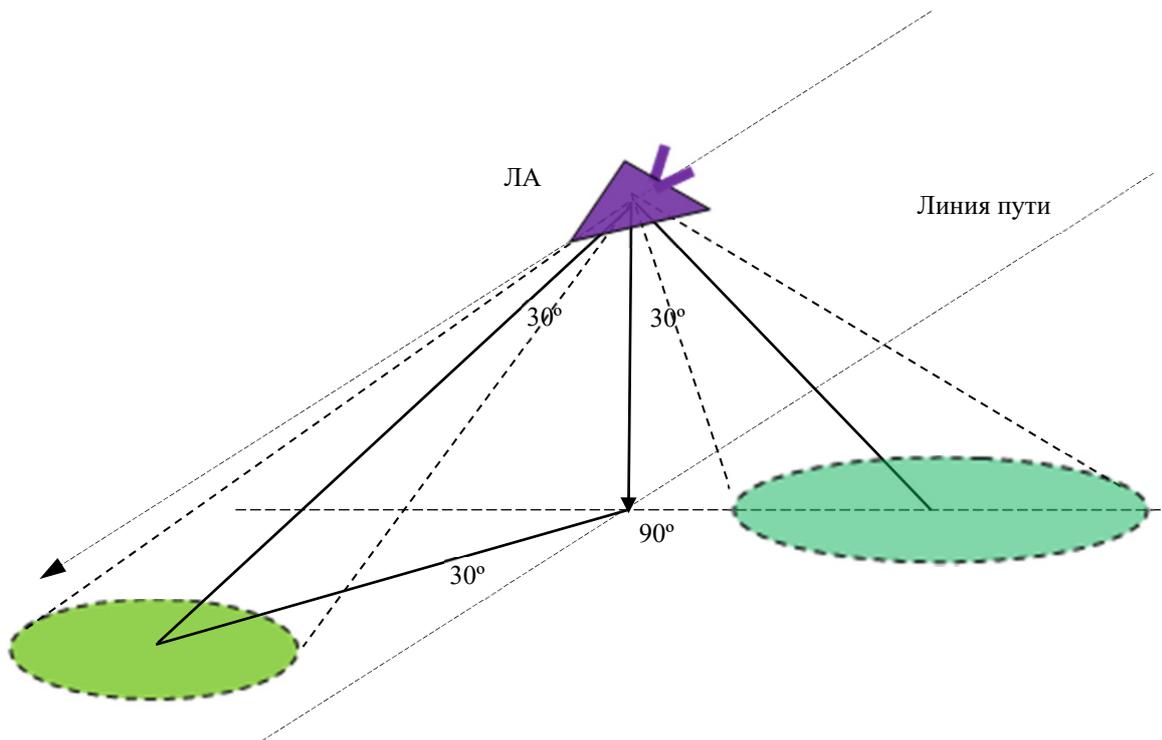


Рис. 7. Геометрия антенной системы БРЛС при боковом и передне-боковом обзоре

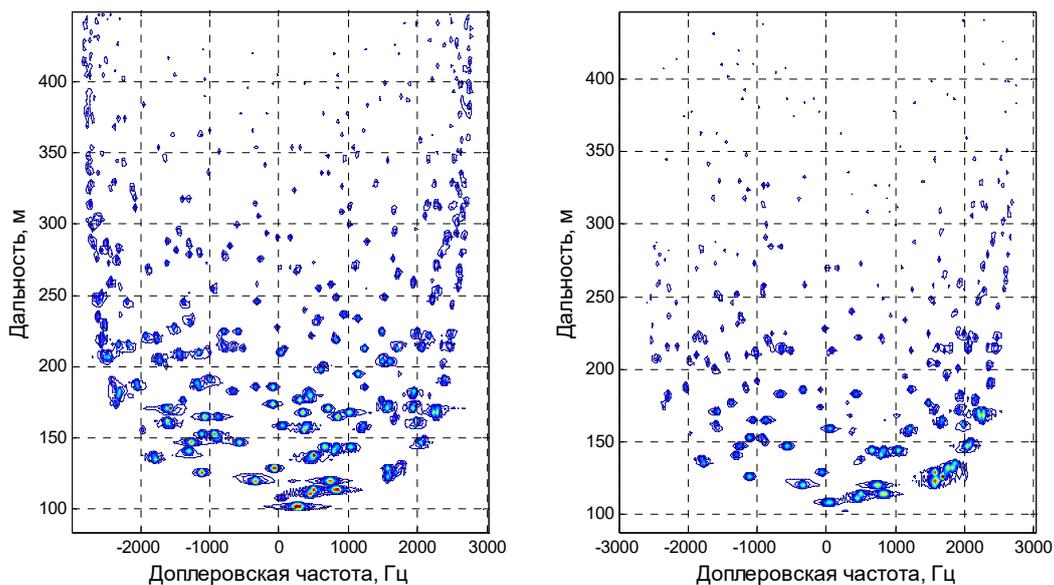


Рис. 8. Группа РЛИ БРЛС при боковом и передне-боковом обзоре

Путем комбинирования различных изображений из группы РЛИ, их взаимного учета или при помощи совместной обработки РЛИ другого вида можно получить изображение подстилающей поверхности, пригодное для навигации над этой поверхностью или для обнаружения объектов на поверхности. А также пригодное для автоматического слежения за объектами, совмещенного с управлением ЛА.

### Заключение

На основе известных выражений и алгоритмов моделирования, отраженных подстилающей поверхностью радиолокационных сигналов, построена многоканальная, многофункциональная программная модель, формирующая отраженные сигналы для различных фоно-целевых обстановок РЛС. Модель позволяет строить РЛИ поверхности в широком диапазоне условий применения РЛС. РЛИ могут быть использованы при решении широкого круга задач радиолокации и радионавигации.

## Библиографический список

1. Коберниченко, В. Г. Радиозлектронные системы дистанционного зондирования Земли : учеб. пособие / В. Г. Коберниченко. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 220 с.
2. Нестеров, М. Ю. Оценка высоты полета в режиме синтезирования апертуры для высотомера с непрерывным зондирующим сигналом / М. Ю. Нестеров, А. А. Монаков // Известия вузов. Сер.: Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57, № 11. – С. 15–22.
3. Нестеров, М. Ю. Расчет двумерной спектральной плотности мощности сигнала биений ЧМРВ / М. Ю. Нестеров // Радиовысотометрия-2013 : сб. тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург : Форт Диалог-Исеть, 2013. – С. 391–395.
4. Жуковский, А. П. Рассеяние электромагнитных волн земной поверхностью : учеб. пособие / А. П. Жуковский. – Москва : Изд-во МАИ, 1991. – 80 с.
5. Скольник, М. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника ; пер. с англ. под общ. ред. В.С. Вербы : в 2 кн. – Москва : Техносфера, 2014. – Кн. 1. – 672 с. ; Кн. 2. – 680 с.
6. Веницкий, А. С. Автономные радиосистемы : учеб. пособие для вузов / А. С. Веницкий. – Москва : Радио и связь, 1986. – 336 с.
7. Полунатурное моделирование бортовых радиолокационных систем, работающих по земной поверхности : учеб. пособие / В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. С. Боков, А. К. Сорокин, Ю. В. Марков, Л. Л. Лесная. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 208 с.
8. Марков, Ю. В. Модель формирования принимаемого сигнала ЛЧМ радиовысотомера над морской и земной поверхностью / Ю. В. Марков, В. Г. Важенин, Л. И. Пономарев // Радиолокация, навигация, связь : тез. докл. VIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Воронеж, 23–25 апреля 2002 г.). – Воронеж, 2002. – Т. 1. – С. 705–713.
9. Возможности исследования точностных характеристик бортовых радиовысотометрических систем на базе имитатора отраженных сигналов / А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, В. В. Мухин, А. А. Иофин // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 86–93.
10. Учет переменных параметров линейной частотной модуляции в имитаторе отраженных сигналов для радиовысотомеров / А. С. Боков, В. Г. Важенин, А. В. Гусев, А. А. Иофин, Д. Ж. Нагашибаев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 86–93.
11. Боков, А. С. Программный комплекс моделирования сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, для радиовысотометрических систем / А. С. Боков, В. Г. Важенин, Ю. В. Марков, Г. В. Чирков // Радиовысотометрия-2016 : сб. тр. V Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург : Форт Диалог-Исеть, 2016. – С. 229–234.

## References

1. Kobernichenko V. G. *Radioelektronnyye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: ucheb. posobie* [Radio-electronic systems of remote sensing of the Earth: textbook]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2016, 220 p. [In Russian]
2. Nesterov M. Yu., Monakov A. A. *Izvestiya vuzov. Ser.: Radioelektronika* [Izvestiya vuzov. Ser.: Radioelectronics]. 2014, vol. 57, no. 11, pp. 15–22. [In Russian]
3. Nesterov M. Yu. *Radiovysotometriya-2013: sb. tr. IV Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Radiovysotometry-2013: proceedings of the IV all-Russian scientific-technical conf.]. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset', 2013, pp. 391–395. [In Russian]
4. Zhukovskiy A. P. *Rasseyaniye elektromagnitnykh voln zemnoy poverkhnost'yu: ucheb. posobie* [Scattering of electromagnetic waves by the earth's surface: textbook]. Moscow: Izd-vo MAI, 1991, 80 p. [In Russian]
5. Skolnik M. *Spravochnik po radiolokatsii: v 2 kn.* [Radar reference: in 2 books]. Moscow: Tekhnosfera, 2014, bk. 1, 672 p.; bk. 2, 680 p. [In Russian]
6. Vinit'skiy A. S. *Avtonomnyye radiosistemy: ucheb. posobie dlya vuzov* [Autonomous radio systems: a textbook for universities]. Moscow: Radio i svyaz', 1986, 336 p. [In Russian]
7. Vazhenin V. G., Dyad'kov N. A., Bokov A. S., Sorokin A. K., Markov Yu. V., Lesnaya L. L. *Polunaturalnoye modelirovaniye bortovykh radiolokatsionnykh sistem, rabotayushchikh po zemnoy poverkhnosti: ucheb. posobie* [Semi-natural modeling of onboard radar systems operating on the earth's surface: tutorial]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2015, 208 p. [In Russian]
8. Markov Yu. V., Vazhenin V. G., Ponomarev L. I. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': tez. dokl. VIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Voronezh, 23–25 aprelya 2002 g.)* [Radar, navigation, communication : abstracts of the VIII International scientific and technical conf. (Voronezh, April 23–25, 2002)]. Voronezh, 2002, vol. 1, pp. 705–713. [In Russian]
9. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Dyad'kov N. A., Mukhin V. V., Iofin A. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 1 (13), pp. 86–93. [In Russian]

10. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Gusev A. V., Iofin A. A., Nagashibaev D. Zh. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 1 (13), pp. 86–93. [In Russian]
11. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Markov Yu. V., Chirkov G. V. *Radiovysotometriya-2016: sb. tr. V Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Radioastrometry-2016 : proceedings of V all-Russia. scientific-technical conf.]. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset', 2016, pp. 229–234. [In Russian]

**Марков Юрий Викторович**

кандидат технических наук, доцент,  
департамент радиоэлектроники и связи,  
Институт радиоэлектроники  
и информационных технологий,  
Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина  
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)  
E-mail: asdal@mail.ru

**Боков Александр Сергеевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
департамент радиоэлектроники и связи,  
Институт радиоэлектроники  
и информационных технологий,  
Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина  
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)  
E-mail: a.s.bokov@urfu.ru

**Важенин Владимир Григорьевич**

кандидат технических наук, доцент,  
департамент радиоэлектроники и связи,  
Институт радиоэлектроники  
и информационных технологий,  
Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
директор научно-исследовательского центра  
радиоэлектронных систем летательных аппаратов  
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)  
E-mail: v.g.vazhenin@urfu.ru

**Мухин Владимир Витальевич**

кандидат технических наук,  
заместитель генерального директора-  
главного конструктора по НИОКР,  
АО «Уральское проектно-конструкторское  
бюро «Деталь»  
(Россия, Свердловская обл.,  
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)  
E-mail: upkb.nio100@mail.ru

**Нестеров Михаил Юрьевич**

доктор технических наук,  
начальник отдела,  
АО «Уральское проектно-конструкторское  
бюро «Деталь»  
(Россия, Свердловская обл.,  
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)  
E-mail: mn@list.ru

**Markov Yuriy Viktorovich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
department of radioelectronics and communications,  
Institute of Radioelectronics  
and Information Technologies,  
Ural Federal University named after  
the first President of Russia B. N. Yeltsin  
(32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

**Bokov Aleksandr Sergeevich**

candidate of technical sciences,  
senior scientist researcher,  
department of radioelectronics and communications,  
Institute of Radioelectronics  
and Information Technologies,  
Ural Federal University named after  
the first President of Russia B. N. Yeltsin  
(32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

**Vazhenin Vladimir Grigor'evich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
department of radioelectronics and communications,  
Institute of Radioelectronics  
and Information Technologies,  
Ural Federal University named after  
the first President of Russia B. N. Yeltsin,  
head of Science Research Center  
for Radioelectronic Systems of Aerial Vehicles  
(32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

**Mukhin Vladimir Vital'evich**

candidate of technical sciences,  
deputy the general director-main designer  
for research and development,  
JSC «Ural Design Bureau «Detal»  
(8 Pionerskaya street, Sverdlovsk Region,  
Kamensk-Uralsky, Russia)

**Nesterov Mikhail Yur'evich**

doctor of technical sciences,  
head of department,  
JSC «Ural Design Bureau «Detal»  
(8 Pionerskaya street, Sverdlovsk Region,  
Kamensk-Uralsky, Russia)

**Иофин Александр Аронович**

кандидат технических наук,  
заместитель главного конструктора,  
АО «Уральское проектно-конструкторское  
бюро «Деталь»  
(Россия, Свердловская обл.,  
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)  
E-mail: tehdep630@yandex.ru

**Iofin Aleksandr Aronovich**

candidate of technical sciences,  
deputy the main designer,  
JSC «Ural Design Bureau «Detal»  
(8 Pionerskaya street, Sverdlovsk Region,  
Kamensk-Uralsky, Russia)

**Образец цитирования:**

Моделирование отраженных радиолокационных сигналов для многоканальной системы дистанционного зондирования земли / Ю. В. Марков, А. С. Боков, В. Г. Важенин, В. В. Мухин, М. Ю. Нестеров, А. А. Иофин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 24–34. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-3.