

В. С. БАХОЛДИН, Д. А. ГАВРИЛОВ, А. В. ШАЛДАЕВ

АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИГНАЛОВ ГЛОНАСС

Рассматриваются алгоритмы формирования радиолокационных изображений в многопозиционных системах с синтезированной апертурой антенны при совместной взаимокорреляционной обработке сигнала, отраженного от земной поверхности, и сигнала прямого распространения созвездия навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС.

Ключевые слова: радиолокационные изображения, многопозиционная радиолокация, РЛС с синтезированной апертурой антенны.

Одним из наиболее перспективных направлений развития радиолокационных средств дистанционного зондирования Земли является создание многопозиционных систем, включающих в свою структуру несколько передатчиков и приемников. В качестве носителей многопозиционных РЛС с синтезированной апертурой антенны (далее — МП РСА) могут рассматриваться носители как космического, так и авиационного базирования. Структурная схема МП РСА, построенная по принципу „ N передатчиков — один приемник“ (рис. 1), может быть реализована на базе существующей орбитальной группировки.

Данный способ построения позволяет сформировать многокурсное радиолокационное изображение (РЛИ) наблюдаемого объекта, что позволяет повысить информативность данного изображения.

При использовании внесистемных источников радиолокационной подсветки система функционирует следующим образом:

- на борту приемника синтезируются одновременно N одноракурсных РЛИ наблюдаемого участка земной поверхности;
- производится совместный анализ набора из N разноракурсных РЛИ.

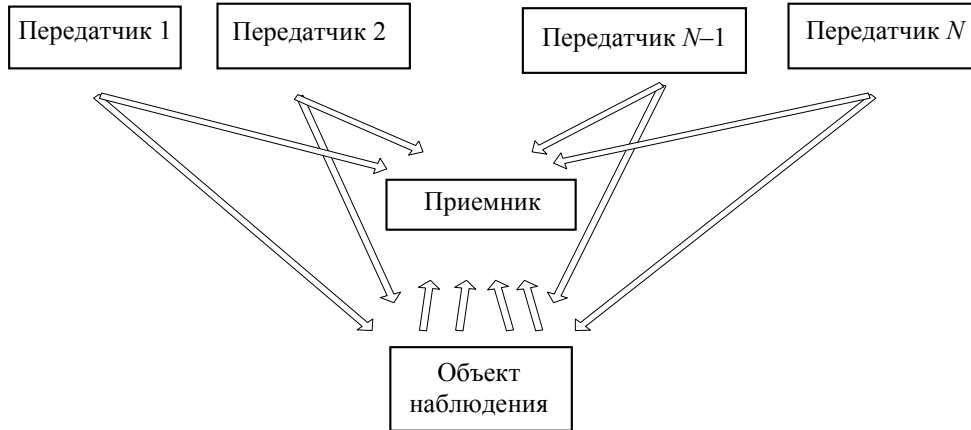


Рис. 1

Представленный способ построения МП РСА обеспечивает следующие дополнительные преимущества:

- 1) появляется возможность использования непрерывного зондирующего сигнала, что повышает энергетический потенциал системы и позволяет при больших скоростях перемещения отказаться от крупногабаритных и дорогостоящих антенных решеток с узкими диаграммами направленности в азимутальной плоскости;
- 2) повышается вероятность правильного обнаружения объектов, поскольку некогерентное объединение разноракурсных РЛИ ведет к снижению интенсивности спекл-шума и увеличению отношения сигнал/шум от сосредоточенных целей.

Сигналы спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС удовлетворяют требованиям, предъявляемым к сигналам радиолокационной подсветки земной поверхности. Использование сигнала ГЛОНАСС позволяет отказаться от взаимокорреляционной обработки отраженного и прямого сигналов, так как структура кода известна. При этом потенциальная разрешающая способность кода пропорциональна длительности элементарного символа кода высокой точности и составляет 60 м. Разрешающая способность вдоль направления движения приемника определяется размером синтезированной апертуры [1, 2].

Несмотря на очевидные достоинства таких систем, до настоящего времени с их помощью не получено радиолокационных изображений, позволяющих с требуемой достоверностью решать задачи обнаружения объектов.

В этой связи актуальной является разработка алгоритмов формирования радиолокационных изображений при использовании сигналов ГЛОНАСС для подсветки земной поверхности в целях улучшения характеристик РЛИ.

В известных работах [3—5] рассматривались одноракурсные РЛИ. Основными проблемами при синтезе таких изображений являются: траекторные нестабильности, вызванные движением приемника и передатчика, синхронизация генератора приемника сигналов ГЛОНАСС, слабый уровень отраженных сигналов.

Для исследования алгоритмов формирования многоракурсных РЛИ была разработана модель МП РСА (рис. 2), в состав которой входят:

- модель движения передатчика $(x, y, z; V_x, V_y, V_z)$, реализованная на основе интегрирования дифференциальных уравнений методом Рунге — Кутты 4-го порядка;

— модель движения приемника $(x, y, z; V_x, V_y, V_z)$, реализующая прямолинейное движение, с возможностью введения ускорения и его производных;

— модель фоноцелевой обстановки (x, y, z) , позволяющая формировать отражение сигнала от элементов поверхности с заданными значениями их удельных эффективных площадей рассеяния $\sigma_{уд}$ (ЭПР).

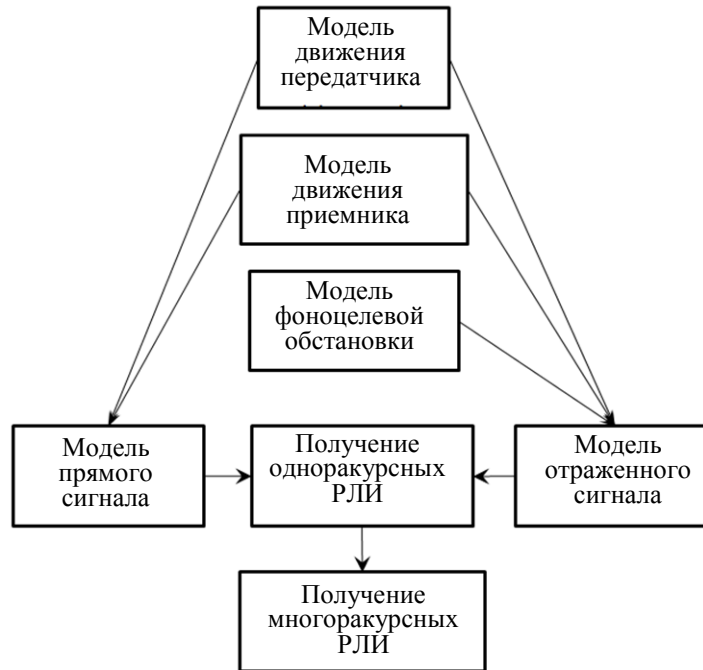


Рис. 2

В процессе моделирования уточнялась взаимная геометрия движения наземного космического аппарата (НКА) и приемника, с векторами состояния $S_{НКА}$ и $S_{пр}$ соответственно, относительно выбранного участка земной поверхности (опорной плоскости) и определялось расположение линий равной дальности на опорной плоскости в целях синтеза опорных функций.

При формировании радиолокационных изображений используются следующие аналитические зависимости:

— для определения дальности в радиолинии „НКА—приемник“:

$$R_{1ij} = \sqrt{(x_{ijпр} - x_{ijНКА})^2 + (y_{ijпр} - y_{ijНКА})^2 + (z_{ijпр} - z_{ijНКА})^2}; \quad (1)$$

— для вычисления фазы сигнала прямого распространения:

$$\hat{\phi}_{1ij} = -2\pi F_{lit} dt - 2\pi R_{1ij} / \lambda; \quad (2)$$

— для определения дальности в радиолинии „НКА—опорная плоскость—приемник“:

$$R_{2ij} = \sqrt{(x_{ijо.п} - x_{ijНКА})^2 + (y_{ijо.п} - y_{ijНКА})^2 + (z_{ijо.п} - z_{ijНКА})^2} + \sqrt{(x_{ijо.п} - x_{ijпр})^2 + (y_{ijо.п} - y_{ijпр})^2 + (z_{ijо.п} - z_{ijпр})^2}; \quad (3)$$

— для вычисления фазы сигнала, отраженного от земной поверхности:

$$\hat{\phi}_{2ij} = -2\pi F_{lit} dt - 2\pi R_{2ij} / \lambda. \quad (4)$$

В формулах (1)—(4) F_{lit} — частота передатчика; i, j — номера координат опорной плоскости; индексами „пр“ и „о.п“ обозначены приемник и опорная плоскость.

Схема формирования радиолокационных изображений по взаимокорреляционному образцу представлена на рис. 3.

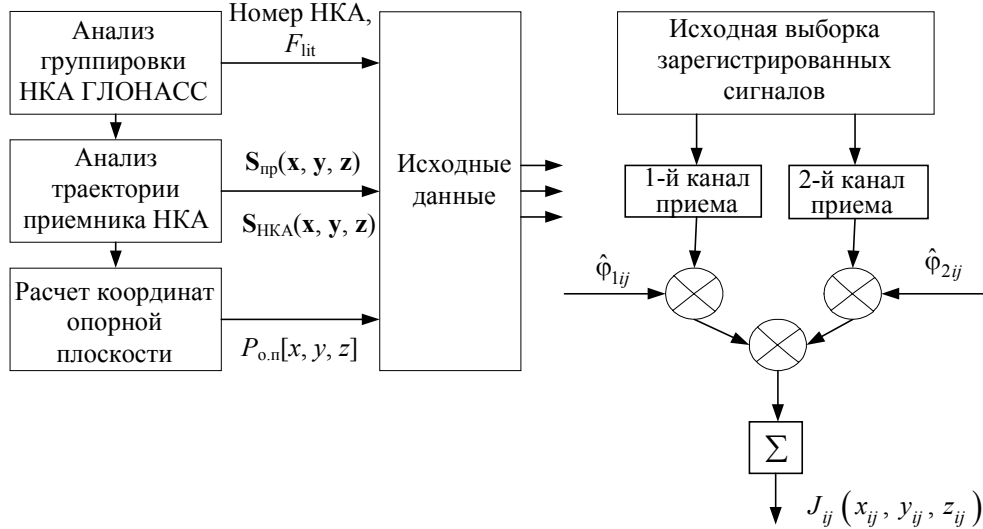


Рис. 3

Особенность рассматриваемого алгоритма заключается в том, что линии равной дальности расположены не параллельно траектории носителя РСА как при классическом боковом обзоре. В связи с этим был применен поточечный синтез, требующий для реализации значительного времени.

В качестве исходных координат опорной плоскости были выбраны реальные координаты земной поверхности в районе Кронштадта. Опорная плоскость представляет собой квадрат размером 40×40 точек, внутри которого были помещены 4 точечные изотропно отражающие цели на расстоянии 140 м друг от друга.

Для моделирования использовались высокоточные эфемериды ГЛОНАСС на дату 17.11.2010 г. и время 17.50. В зоне радиовидимости находилось 8 НКА.

Полученные при синтезе сигналов разных НКА радиолокационные изображения были подвергнуты дальнейшей совместной обработке, при которой использовались некогерентные алгоритмы сложения и умножения для разноракурсных РЛИ.

В качестве критериев оценки РЛИ использовались следующие характеристики:

- отношение сигнал/шум;
- динамический диапазон;
- контраст.

На рис. 4 представлены результаты синтеза РЛИ при использовании отраженного сигнала одного НКА, при отношении сигнал/фон, равном 3, и времени когерентного накопления 10 с. Заданные начальные условия соответствуют отношению удельных ЭПР цель/подстилающая поверхность, равному 9. В ходе моделирования установлено, что все одноракурсные радиолокационные изображения имеют одинаковый вид и не позволяют решить задачу обнаружения целей. Усредненные характеристики одноракурсных РЛИ следующие: отношение сигнал/шум — 15 дБ, динамический диапазон — 40 дБ, контраст — 16 дБ.

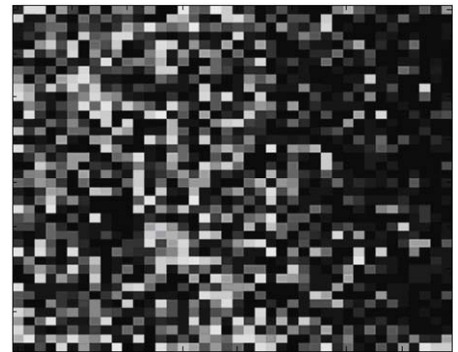


Рис. 4

Результаты формирования многоракурсного РЛИ при совместной обработке отраженных сигналов всех видимых НКА ГЛОНАСС представлены на

рис. 5, а. При этом использовался аддитивный алгоритм, в котором производилось некогерентное суммирование одноканальных РЛИ с последующим усреднением. Получены следующие характеристики многоканального РЛИ: отношение сигнал/шум — 25 дБ, динамический диапазон — 10,2 дБ, контраст — 21 дБ. Дешифровка полученного изображения позволяет определить местонахождение всех 4 целей на фоне подстилающей поверхности. На рис. 5, б отображены результаты формирования изображения при тех же начальных условиях с использованием мультипликативного алгоритма обработки данных путем некогерентного умножения с последующим усреднением. В этом случае отношение сигнал/шум составляет 32 дБ, динамический диапазон — 101 дБ, контраст — 28 дБ.

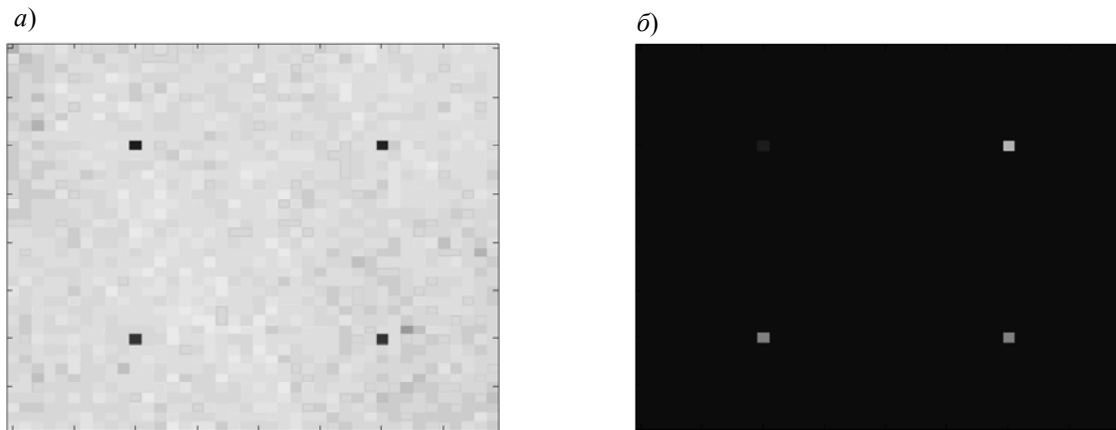


Рис. 5

Таким образом, результаты моделирования двух алгоритмов формирования многоканальных РЛИ показали возможность обнаружения целей и улучшения качества полученных изображений. По сравнению с характеристиками одноканальных РЛИ при использовании аддитивного алгоритма получено увеличение отношения сигнал/шум на 10 дБ, контраста на 5 дБ, при этом уменьшение динамического диапазона составило 29,8 дБ; в результате применения мультипликативного алгоритма получено увеличение отношения сигнал/шум на 17 дБ, контраста на 12 дБ, динамического диапазона на 61 дБ.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

- применение мультипликативного и аддитивного алгоритмов позволяет формировать многоканальное радиолокационное изображение с качеством, обеспечивающим обнаружение целей, в ситуации, когда одноканальные РЛИ не позволяют решить эту задачу;
- использование данных алгоритмов повышает отношение сигнал/шум и увеличивает контраст изображения, однако при мультипликативном алгоритме значительно увеличивается динамический диапазон, что может привести к маскированию целей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2278398 РФ. Способ получения радиолокационного изображения земной поверхности при помощи многопозиционной радиолокационной системы с синтезированной апертурой антенны / В. Ф. Фатеев, И. В. Сахно. 2004.
2. Сахно И. В., Фатеев В. Ф. Применение навигационных КА GPS/ГЛОНАСС в составе многопозиционных РЛС обзора земной поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 3. С. 27—31.
3. Cherniakov M. Bistatic Radar, Principles and Practice. Ed.: John Wiley & Sons, 2007.
4. Cherniakov M., Saini R., Antoniou M., Zuo R., Edwards J. SS-BSAR with transmitter of opportunity — Practical aspects // Proc. of the 3rd EMRS DTC Techn. Conf. Edinburgh, 2006.
5. Cherniakov M., Saini R., Zuo R., Antoniou M. Space-surface bistatic synthetic aperture radar with global navigation satellite system transmitter of opportunity — Experimental results // IET Radar, Sonar and Navigation. 2007. Vol. 1, Iss. 6. P. 447—458.

Сведения об авторах

- Владимир Станиславович Бахолдин** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: bakholdin_vs@mail.ru
- Денис Александрович Гаврилов** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: gdanas@yandex.ru
- Андрей Вадимович Шалдаев** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: shaldaev@mail.ru

Рекомендована кафедрой
космической радиолокации и радионавигации

Поступила в редакцию
31.08.11 г.