

УДК 621.396.969.3

ПОСТРОЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ОТРАЖЁННЫХ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

© 2014 г. *Д.Н. Кириллов, В.А. Односецев, Д.Н. Ивлев, И.Я. Орлов*

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

dtm-06@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.09.2013

Сигналы спутниковых радионавигационных систем постоянно присутствуют в окружающем пространстве и покрывают всю поверхность Земли. В силу этого представляется возможным прием переотраженных сигналов этих систем от наземных объектов в целях скрытого радиолокационного обнаружения. Приводится описание алгоритма приема переотраженного сигнала и моделируется процесс получения радиолокационного изображения наземных объектов.

Ключевые слова: радиолокационное изображение, характеристики обнаружения, GPS, ГЛОНАСС, СРНС, согласованная фильтрация.

Введение

Глобальное покрытие Земли сигналами спутниковых радионавигационных систем (СРНС) и их открытая структура позволяют исследователям и разработчикам искать применение указанных систем не только в решении непосредственных навигационных задач [1, 2] (таких как геодезия, навигация, спутниковый мониторинг транспорта), но и в сферах применения не по прямому назначению, таких как мониторинг ионосферы [3]. В связи с вводом в эксплуатацию новых группировок спутников (принадлежащих как одной, так и нескольким СРНС) мощность сигнала, непрерывно облучающего земную поверхность, существенно возрастает и повышается уровень отражённых от наземных объектов сигналов. Этот аспект даёт возможность использования отраженных сигналов при составлении радиолокационных изображений (РЛИ) подстилающей поверхности. В этом случае могут быть использованы алгоритмы пассивной радиолокации (в том числе и тепलोкации) в условиях высокой скрытности работы радиолокационной станции (РЛС), что является наиболее актуальным требованием к современным РЛС. Размещая приёмник отражённых сигналов на беспилотном летательном аппарате (БПЛА), можно решить задачу обнаружения цели, не имеющей собственного источника электромагнитного излучения [4]. Отличием предлагаемого метода от метода радиотеплокации является возможность когерентного накопления принимаемого излучения, что

позволяет существенно улучшить характеристики обнаружения цели.

В [5] было оценено отношение сигнал/шум на входе приемника в условиях белого гауссовского шума со спектральной плотностью мощности N_0 :

$$SNR = 10 \cdot \log \frac{P}{N_0 \cdot \Delta f_{filt}} \approx -60 \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где $P \approx 5 \cdot 10^{-21} \sigma$ [Вт] – мощность переотраженного целью спутникового сигнала в точке расположения антенны, σ – эффективная площадь рассеяния цели (ЭПР), $\Delta f_{filt} = 4$ МГц – полоса пропускания радиочастотного тракта аналоговой части антенны.

В условиях малого отношения сигнал/шум необходимо использовать оптимальную фильтрацию в процессе обработки входного сигнала и его накопление. Ниже приводится описание алгоритма приёма сигнала, излучённого спутниками GPS.

Приём отраженных сигналов

Пусть антенна представляет собой фазированную антенную решетку. Антенна формирует диаграмму направленности (ДН), представляющую собой перпендикулярный продольной оси БПЛА узкий луч. Обзор подстилающей поверхности вдоль траектории полета осуществляется за счет движения носителя антенны. Обзор в перпендикулярном направлении осуществляется с помощью электрического (фазо-

вого) сканирования, формируются (в данной модели) пять пространственных каналов.

Для решения задачи обнаружения отраженных от земной поверхности сигналов предлагается использовать приемник, структурная схема которого показана на рис. 1. Входная смесь полезного сигнала с шумом, принимаемая антенной, переносится на нулевую частоту, и выделяются квадратурная и синфазная составляющие сигнала. Отклик каждого канала фильтруется НЧ-фильтром с полосой пропускания, соответствующей полосе GPS-сигнала, и оцифровывается с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Далее сигнал каждого канала поступает на согласованный с одним периодом дальномерного C/A-кода фильтр (СФ). Малая величина отношения сигнал/шум не позволяет произвести обнаружение сигнала на данном этапе, поэтому в схеме приемника используется алгоритм временного накопления сигнала. Отсчеты выхода согласованного фильтра, взятые в моменты времени, кратные периоду дальномерного кода, суммируются в течение времени τ_1 . Таким образом, в каждом канале реализуется предварительный когерентный накопитель. После предварительного накопления производится выделение огибающей сигнала, отсчеты которого формируются в моменты времени, кратные τ_1 . С целью достижения необходимого отношения сигнал/шум выходные отсчеты огибающей суммируются в течение времени τ_2 ($\tau_2 > \tau_1$), формируя окончательный накопитель сигнала.

Обработка сигнала на этапе предварительного накопления требует когерентности входного сигнала на интервале времени накопления τ_1 . Нетрудно показать, что при движении БПЛА со скоростью $V = 50$ м/с на высоте $H = 500$ м время когерентности в рамках рассматриваемой модели $\tau \approx 0.1$ с. Эта величина дает максимальное значение времени предварительного накопления τ_1 .

Необходимо отметить, что GPS сигнал модулирован кодом данных с помощью двоичной

фазовой манипуляции. Для возможности накопления отраженного сигнала предложенным алгоритмом требуется снять модуляцию несущего сигнала данным кодом. Для этого предлагается использовать приёмник GPS сигнала с отдельной направленной на спутник антенной, который будет детектировать модулирующие колебания в режиме реального времени.

Получение радиолокационного изображения

Используя описанный алгоритм обработки отраженного от подстилающей поверхности сигнала СРНС, можно провести модельный эксперимент с целью построения РЛИ. Получение РЛИ в эксперименте осуществим с помощью РЛС бокового обзора, размещенной на БПЛА. Пусть антенна представляет собой фазированную антенную решетку, состоящую из шести строк, отклик которых образуется посредством суммирования восьми элементов (вibratorов) с определенным набором весовых коэффициентов. Обзор подстилающей поверхности вдоль траектории полета осуществляется за счет движения носителя антенны. Обзор в перпендикулярном направлении осуществляется с помощью электрического (фазового) сканирования, формируются (в данной модели) пять пространственных каналов. Пусть в модельной ситуации БПЛА перемещается по прямолинейной траектории со скоростью 50 м/с параллельно земле на высоте 500 м.

В качестве подстилающей поверхности использовалась поверхность с коэффициентом отражения, равным нулю, на которой расположено три реперных объекта. Предполагается, что объекты отражают всю падающую на них мощность равномерно по всем направлениям. Схематическое изображение подстилающей поверхности представлено на рис. 2, расположение реперных объектов отмечено белыми точками. Горизонтальные линии соответствуют проекции главных максимумов диаграмм направленности приемной антенны (для различных угловых каналов) при движении БПЛА вдоль траектории движения.

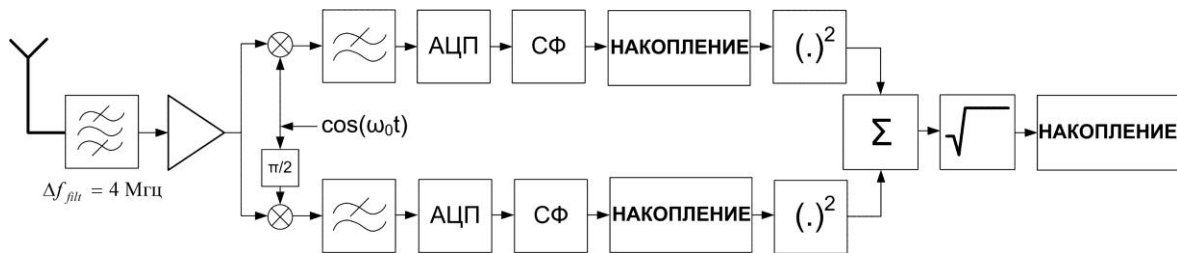


Рис. 1. Схема приемника с промежуточным накоплением

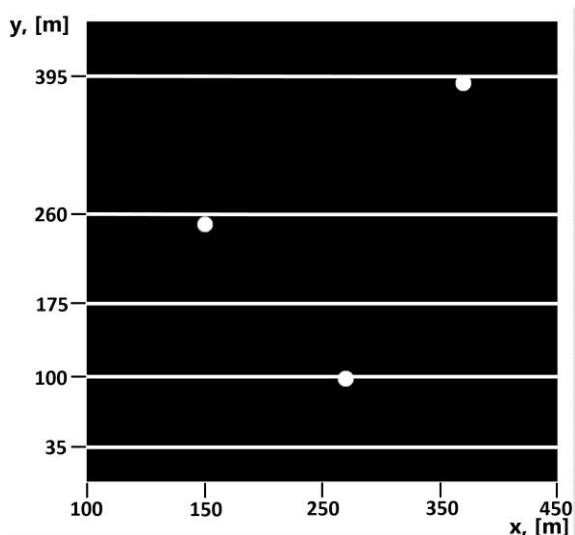


Рис. 2. Модель подстилающей поверхности

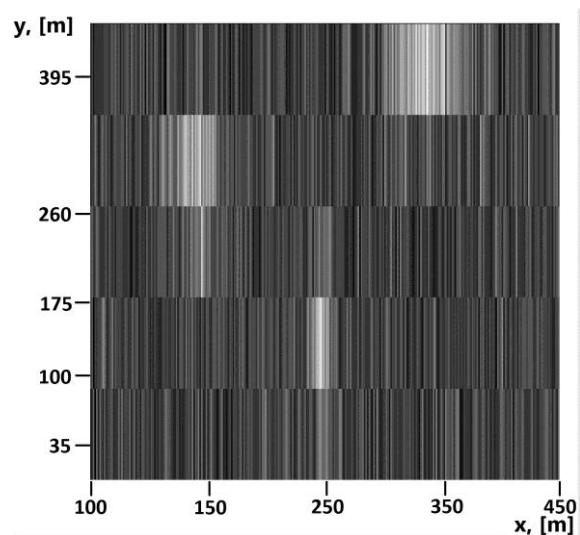


Рис. 3. Модельное РЛИ

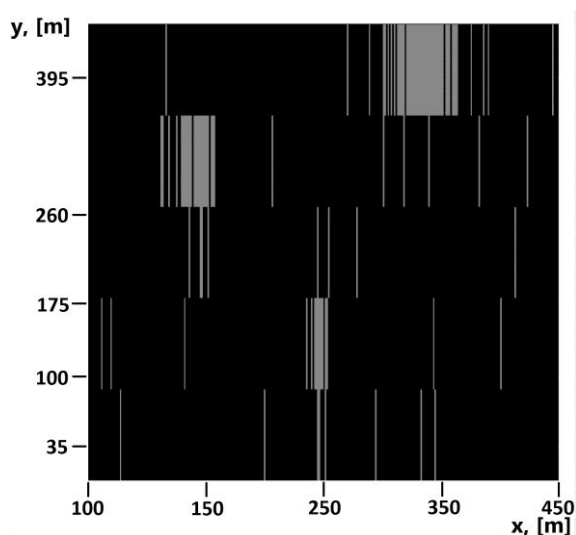


Рис. 4. Модельное РЛИ после пороговой обработки

РЛИ строилось следующим образом. Вдоль всей траектории движения антенны для каждого отсчета модельного времени и для каждого элементарного вибратора вычислялся отклик на суперпозицию сигналов, отраженных от реперных объектов. Складывая взвешенную сумму откликов вибраторов, получаем отклики антенны для пяти угловых каналов вдоль траектории её движения. Для моделирования принимаемого сигнала к полученным откликам добавляется нормальный белый гауссовский шум со спектральной плотностью N_0 , определенной в (1). Полученные сигналы обрабатывались с помощью описанного выше алгоритма (рис. 1) с временами накопления $\tau_1 = 0.1$ с и $\tau_2 = 1$ с, и значения, пропорциональные откликам приемников, откладывались на диаграмме в зависи-

мости от продольной и поперечной (пропорциональной номеру углового канала) координаты, этим формировалось РЛИ.

РЛИ, полученные с помощью обработки отраженного от подстилающей поверхности сигнала GPS описанным алгоритмом с учетом воздействия белого гауссовского шума, изображены на рис. 3, 4. На рисунках приведены РЛИ поверхности с расположенными на ней целями с ЭПР, равной 50 м^2 , до и после пороговой обработки соответственно. Выбор порога осуществлялся согласно критерию Неймана–Пирсона (уровень ложных тревог фиксирован на значении 0.01). Для данного времени накопления вероятность правильного обнаружения составляет 0.8 при уровне ложных тревог $\alpha = 0.01$ [5]. Характерной особенностью построенных

РЛИ является уширение изображения точечного объекта, что объясняется конечной шириной диаграммы направленности антенны.

Параметры данных модельных целей соответствуют таким наземным объектам, как, например, катер или транспортный самолет [6]. Из приведенных рисунков видно, что цели уверенно обнаруживаются.

Выводы

Исследование предложенного алгоритма приёма отражённых сигналов СРНС показало его способность обнаруживать при помощи БПЛА цели с эффективной площадью рассеяния более 50 м². Следует отметить, что рассмотренные в тексте оценки обработки сигнала предложенным алгоритмом дают верхнюю границу качества обнаружения, поскольку не учитывают потери, возникающие в реальных устройствах обработки (АЦП, корреляторах, накопителях). Приведенные результаты, вместе с тем, свидетельствуют о возможности практического использования рассмотренного метода в целях пассивной радиолокации наземных объектов.

CONSTRUCTION OF RADAR IMAGES OF LAND OBJECTS USING REFLECTED SIGNALS OF SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS

D.N. Kirillov, V.A. Odnosevtsev, D.N. Ivlev, I.Ya. Orlov

The signals of satellite navigation systems are constantly present in the surrounding space and cover the entire Earth surface. Because of this, it is possible to receive reflected signals of these systems from land objects for the purpose of hidden radar detection. The article describes an algorithm of re-reflected signal reception and presents a model of the process of radar image construction of land objects.

Keywords: radar image, detection characteristics, GPS, GLONASS, GNSS, matched filtering.

References

1. Abbott E. and Powell D. Land-Vehicle Navigation Using GPS // Proceedings of the IEEE. January 1999. Vol. 87. № 1. P. 145–162.
2. Bulusu N., Heidemann J., Estrin D. GPS-less Low Cost Outdoor Localization For Very Small Devices // IEEE Personal Communications Magazine. October 2000. Vol. 7. P. 28–34.
3. Smirnov V.M., Smirnova E.V. Modul' ionosferного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/GLONASS // Zhurnal radioelektroniki. 2010. № 6.

Список литературы

1. Abbott E. and Powell D. Land-Vehicle Navigation Using GPS // Proceedings of the IEEE. January 1999. Vol. 87. № 1. P. 145–162.
2. Bulusu N., Heidemann J., Estrin D. GPS-less Low Cost Outdoor Localization For Very Small Devices // IEEE Personal Communications Magazine. October 2000. Vol. 7. P. 28–34.
3. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 6.
4. Zavorotny V., Voronovich A. Scattering of GPS Signals from the Ocean with Wind Remote Sensing Application // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. March 2000. Vol. 38. № 2. P. 951–964.
5. Кириллов Д.Н., Оdnosevtsev В.А., Ивлев Д.Н. и др. Использование спутниковых радионавигационных систем в задачах радиолокации с подсветкой // Датчики и системы. 2013. № 4. С. 7–14.
6. Сотников А.М., Сидоренко Р.Г., Рыбалка Г.В. Оценка отражающих свойств наземных и воздушных объектов с пассивной защитой на основе композитных радиоизотопных покрытий // Системы управління, навігації та зв'язку. 2009. Випуск 1(9).

4. Zavorotny V., Voronovich A. Scattering of GPS Signals from the Ocean with Wind Remote Sensing Application // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. March 2000. Vol. 38. № 2. P. 951–964.
5. Kirillov D.N., Odnosevtsev V.A., Ivlev D.N. i dr. Ispol'zovanie sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem v zadachakh radiolokatsii s podsvetkoy // Datchiki i sistemy. 2013. № 4. S. 7–14.
6. Sotnikov A.M., Sidorenko R.G., Rybalka G.V. Otsenka otrazhayushchikh svoystv nazemnykh i vozdushnykh ob'ektov s passivnoy zashchitoy na osnove kompozitnykh radioizotopnykh pokrytiy // Sistemi upravlinnya, navigatsii ta zv'yazku. 2009. Vipusk 1(9).