

УДК 004.738

Технология обнаружения объектов с помощью пассивного мультистатического радара

Гаранин Никита Андреевич

garaninna@student.bmstu.ru

Гагарин Юрий Евгеньевич

gagarin_je@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Предложен метод обнаружения и локализации объектов для пассивного мультистатического радара на базе GNSS. Этот подход основан на большом пространственном разнообразии, обеспечиваемом навигационными спутниковыми группировками, для обеспечения осведомленности с использованием коротких временных интервалов интеграции, что позволяет обойти недостатки подходов, основанных на длительном пребывании, которые обычно рассматриваются в пассивных радиолокационных системах спутникового базирования. Предлагаемый подход использует декартову плоскость и способен обеспечить одномоментное обнаружение и локализацию объектов в исследуемом районе.

Ключевые слова: мультистатический радар, пассивный радар, радиолокационное обнаружение, бистатический канал

Введение. Пассивные радиолокационные системы, основанные на спутниковых передачах, становятся многообещающим вариантом для наблюдения. В отличие от обычных активных радиолокационных систем, датчики работают без передающего сегмента, что не требует выделенных ресурсов спектра и снижает габариты, вес и энергопотребление. Эти факторы, наряду со снижением уровня электромагнитного загрязнения, способствуют их размещению в критически важных местах. Основываясь на передачах сигналов из космоса, системы могут работать даже в отдаленных районах. Подходящими источниками информации о возможностях являются спутники связи, такие как Iridium и Inmarsat, спутники цифрового телевидения, такие как Astra и Eutelsat, и навигационные спутники, такие как GPS и Galileo. Среди возможных вариантов перспективным решением являются глобальные навигационные спутниковые сигналы (GNSS) [1]. Во-первых, конструкция этих группировок гарантирует глобальное, надежное и постоянное покрытие, в частности, благодаря заранее известной структуре сигнала, которая одинакова во всем мире, что позволяет повсеместно использовать одну и ту же систему приема без необходимости адаптации к местным стандартам. Примечательно, что GNSS обеспечивают избыточность передатчиков с большим пространственным разнесением, относительно широкую полосу пропускания (до 10,23 МГц) и передачу по нескольким каналам в L-диапазоне. С другой стороны, пассивные радиолокационные системы на основе GNSS страдают из-за ограниченного бюджета мощности, что снижает наблюдаемость объекта, что, в свою очередь, ограничивает дальность действия.

Стоит отметить, что в пассивном радаре на базе GNSS один приемник может собирать сигналы, поступающие с нескольких спутников, образуя, таким образом, мультистатическую пассивную радиолокационную систему. Это дает прекрасную возможность локализовать объект, не прибегая к дорогостоящим конфигурациям антенных приемников: как правило, обнаружение происходит по отдельным бистатическим каналам (т. е. спутникам), а на последующем этапе данные обнаружения объединяются в бистатические пары (обычно путем определения пересечений бистатических эллипсоидов), чтобы локализовать ее в пространстве. Данный метод позволяет достичь более высокой производительности как при обнаружении, так и при локализации, чем в обычных двухэтапных процедурах, поскольку приемник совместно обрабатывает непороговые сигналы, полностью используя доступную информацию.

Мультистатический радар на базе GNSS для наблюдения за отдаленными территориями. Рассмотрим одно приемное устройство, предназначенное только для дистанционного наблюдения за интересующим районом. Приемник оснащен двумя радиочастотными каналами, один из которых используется для объектов, а другой — для наблюдения. Первый использует антенну с низким коэффициентом усиления, направленную в небо, для регистрации прямых сигналов, в то время как второй собирает отраженные сигналы от исследуемой территории с помощью антенны с более высоким коэффициентом усиления. Поскольку навигационные спутники спроектированы таким образом, чтобы гарантировать одновременную видимость нескольких спутников из любой точки земной поверхности (4–8 для одной группировки), что позволяет установить несколько бистатических каналов связи [2].

Поскольку GNSS работает со схемами множественного доступа с кодовым/частотным разделением, сигналы с разных спутников могут быть легко разделены и индивидуально обработаны [3]. Пусть N — количество спутников, зарегистрированных приемником, определяем $(0, X, Y, Z)$ спутниковую систему отсчета с центром в точке расположения приемника.

Без потери общности, ось X обозначает точку наблюдения. направление наведения антенны канала. Плоскость $Z = 0$ представляет собой зону для наблюдения, на ней находится объект, расположенное в позиции $p = [x, y, 0]^T$, который должен быть обнаружен и локализован. Поскольку сигналы GNSS передаются непрерывно, предварительное импульсное переформатирование радиолокатора осуществляется путем определения эквивалентного интервала повторения импульсов (PRI), который обычно устанавливается равным длине последовательности псевдослучайных помех (PRN) в передачах (1 мс).

Для достижения таких целей с помощью рассматриваемой системы обычно выполняются три основных шага. Шаги 1 и 2 реализуются отдельно для каждого бистатического канала (бистатическая обработка), в то время как Шаг 3 касается мультистатического объединения данных.

Подробнее рассмотрим каждый шаг.

1. Синхронизация сигналов — в пассивных радиолокационных системах реализована взаимная корреляция между данными прямой и отраженной тра-

ектории для имитации согласованной фильтрации и сжатия радиолокационных данных. Однако из-за ограничений по энергопотреблению в случае, основанном на GNSS, необходимо получить точную копию прямого сигнала без помех. Это достигается путем отслеживания параметров прямого сигнала (например, временной задержки, доплеровского сигнала, фазы и, если таковой существует, навигационного сообщения) и использования знания кодов псевдослучайных шумов (PRN).

2. Процессор дальности и доплеровской обработки (RD) — после сжатия дальности осуществляется доплеровская фильтрация по интервалу когерентной обработки (CPI) длительностью T_a для получения карты дальности. T_a обычно ограничивается 2–3 секундами, так что комплексную отражательную способность судна можно считать постоянной. Более того, эффектами дальности и доплеровской миграции ячеек в течение таких временных интервалов можно пренебречь, учитывая относительно низкое разрешение по дальности и ограниченную скорость объекта. Таким образом, карта RD, относящаяся к i -му бистатистическому каналу, может быть получена с помощью дискретного преобразования Фурье (БПФ). Затем, после определения квадратичного модуля, применяются пороговые методы принятия решения для обнаружения объекта.

3. Пересечение бистатистических диапазонов — положение объекта в локальной плоскости может быть получено с помощью мультилатерационных подходов, состоящих в пересечении бистатистических изодиапазонов, относящихся к бистатистическим каналам, в которых произошло обнаружение.

Ограниченный ресурс, обеспечиваемый GNSS, может сделать описанный выше метод неэффективным из-за высокой вероятности пропущенных обнаружений, что, в свою очередь, ухудшает возможности локализации, которые полностью исключаются, если изодиапазонов меньше минимального значения (т. е. 2 для локализации на плоскости земли) [4]. Чтобы увеличить требуемую мощность на каждом бистатистическом канале, процессор удаленного доступа часто модифицируется для работы с более длительным временем ожидания.

Как правило, в многокадровых системах реализованы процедуры интегрирования, выполняющие квадратичное интегрирование карт, относящихся к последовательным кадрам [5]. Однако эти методы требуют компенсации целевого движения между различными кадрами путем обращения к соответствующим границам на основе предполагаемой модели движения и соответствия каждой границы определенному набору параметров модели. Таким образом, если фактическое движение объекта заметно отклонится от предполагаемой модели, могут возникнуть значительные потери. Более того, жесткое решение, принимаемое на каждом бистатистическом канале, предотвращает использование тех каналов, где в любом случае произошло пропущенное обнаружение, например из-за малого бистатистического стандарта обмена сообщениями RCS. Чтобы преодолеть эти недостатки, предлагаемая процедура изменяет традиционный подход следующим образом, в частности, бистатистиче-

ские процессоры удаленного управления по-прежнему работают с короткими сигналами, но вместо периферийных решений используется комбинация мультистатических данных без изменения порога. Таким образом, дополнительный выигрыш, обычно получаемый за счет многокадровых процедур, может быть выполнен с небольшими задержками, используя имеющееся пространственное разнообразие и в то же время используя всю доступную информацию для решения задачи локализации.

Стоит отметить, что положение и скорость спутника являются известными величинами. Эта информация получена путем демодуляции навигационных сообщений, передаваемых спутником в режиме реального времени. Следовательно, для заданной целевой скорости v можно получить декартову карту M_i , выбрав i -ю ячейку, соответствующую каждой позиции исследуемой области. А именно, получается набор декартовых отображений $M_i(x, y; v)$ для подходящего набора предполагаемых скоростей объектов. Поскольку бистатические данные проецируются в общей области независимо от i -й бистатической геометрии, может быть реализована прямая интеграция данных на пиксельной основе [6].

Затем к каждой карте в стеке применяется пороговое значение. В отличие от обычной схемы, в которой используются только N каналов, в этом типе мультистатического объединения данных все доступные каналы участвуют в принятии окончательных решений. Максимальный выигрыш от интеграции достигается на карте в стеке, соответствующей скорости, наиболее близкой к фактическому значению. На такой карте действительно достигается наилучшее распределение энергии цели среди карт M_i в соответствии с фактическим местоположением объекта, что обеспечивает одномоментное обнаружение и его локализацию.

Конечно, вычислительная сложность предлагаемого подхода выше, чем при обычной процедуре бистатического обнаружения, поскольку проекция бистатических Θ -карт на декартовы карты $M_i(x, y; v)$ требует вычисления N_p -точек, определяющих исследуемую область. Дискретизация декартовой сетки может быть задана путем задания интервала между ячейками, равного наилучшему разрешению по дальности и азимуту, обеспечиваемому системой. Таким образом, вычислительная сложность метода линейно возрастает с увеличением количества спутников. Однако стоит подчеркнуть, что в рассматриваемой конфигурации системы одна и та же принимающая станция выступает в качестве сборщика мультистатических данных. Таким образом, независимо от количества задействованных спутников, все данные могут обрабатываться локально без необходимости настраивать широкополосный канал связи между узлами конфигурации мультистатического радара, что часто является основным узким местом для реализации комбинаций данных без ограничений в распределенных системах.

Заключение. В данной работе представлен новый подход к обнаружению и локализации объектов с помощью мультистатических радиолокационных систем, основанных на GNSS-индикаторах. В частности, предлагаемый

подход использует пространственное разнообразие, обеспечиваемое навигационными спутниками, для преодоления ограничений, связанных с ограниченным энергопотреблением системы. Поскольку процедуры полностью выполняются в декартовой плоскости, они могут обеспечить четкое представление об исследуемой области, обеспечивая за один шаг обнаружение цели и ее местоположение в пределах исследуемой области.

Литература

- [1] Nasso I., Santi F. A centralized ship localization strategy for passive multistatic radar based on navigation satellites. *IEEE Geosci. Rem. Sens. Lett.*, 2022, vol. 10, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2022.3204169>
- [2] Gomez-Del-Hoyo P., Gronowski K., Samczynski P. The STARLINK: based passive radar: preliminary study and first illuminator signal measurements. 23rd International Radar Symposium (IRS). Gdansk, Poland, 2022, pp. 350–355. <https://doi.org/10.23919/IRS54158.2022.9905046>
- [3] He Z., Yang Y., Chen W. A hybrid integration method for moving target detection with GNSS-based passive radar. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Rem. Sens.*, 2021, vol. 14, pp. 1184–1193. <https://doi.org/10.1109/jstars.2020.3037200>
- [4] Ma H. Maritime moving target indication using passive GNSS-based bistatic radar. *IEEE Trans. Aero. Electron. Syst.* 2018, vol. 54 (1), pp. 115–130. <https://doi.org/10.1109/taes.2017.2739900>
- [5] Huang C. BeiDo — based passive radar vessel target detection: method and experiment via long-time optimized integration. *Rem. Sens.*, 2021, vol. 13 (19), pp. 3933–3941. <https://doi.org/10.3390/rs13193933>
- [6] Li Z. Multi-frame fractional Fourier transform technique for moving target detection with space-based passive radar. *IET Radar, Sonar Navig.*, 2017, vol. 11 (5), pp. 822–828. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0432>

Assive multistatic radar object detection technology

Garanin Nikita Andreevich

garaninna@student.bmstu.ru

Gagarin Yuri Evgenievich

gagarin_ye@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

In this paper, we propose a method for detecting and localizing objects for a passive multistatic radar based on GNSS. This approach is based on the large spatial diversity provided by navigation satellite groupings to ensure awareness using short integration time intervals, which circumvents the disadvantages of long-stay approaches that are usually considered in passive satellite-based radar systems. The proposed approach uses the Cartesian plane and is capable of providing simultaneous detection and localization of objects in the studied area.

Keywords: multistatic radar, passive radar, radar detection, bistatic channel