

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.391

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-3-41-52>

## Пассивная радиолокационная система мониторинга движения судов в прибрежных районах с использованием спутниковых сигналов подсвета

Нгуен Ван Куан<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup>Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉quanvnhath@gmail.com

### Аннотация

**Введение.** Возрастающие требования к совершенствованию информационных систем обеспечения безопасности судоходства в прибрежных районах морских акваторий обуславливают поиск новых инженерных и научно-технических решений. Особый интерес представляет создание систем пассивной когерентной локации (ПКЛ), основанных на использовании в качестве радиолокационного подсвета контролируемого пространства существующих источников электромагнитного излучения, в частности сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). При разработке и реализации таких систем существует ряд нерешенных задач, связанных с поиском высокоэффективных алгоритмов обработки, с оптимизацией их структуры и режимов функционирования в составе комплексной многопозиционной системы мониторинга морских акваторий в прибрежных районах.

**Цель работы.** Обоснование структуры построения системы бистатической ПКЛ с сигналом подсвета ГНСС, анализ методов повышения уровня отраженных от целей сигналов, разработка общего алгоритма обработки сигналов в приемном устройстве данной системы, формирование предложений по созданию многопозиционной радиолокационной системы (МП РЛС) для мониторинга судоходства в прибрежных районах акваторий.

**Материалы и методы.** Используются методы математического моделирования, теория сигналов, цифровой обработки сигналов.

**Результаты.** Разработана структура бистатической ПКЛ с сигналом подсвета ГНСС для мониторинга акваторий в прибрежных районах в целях обеспечения безопасности плавания судов. Предложены методы повышения уровня мощности спутниковых сигналов на входе приемного устройства и разработан общий алгоритм обработки сигналов, процесс реализации вычисления взаимной функции неопределенности (ВФН) в системе бистатической ПКЛ с использованием спутникового сигнала GPS C/A-кода для задач мониторинга акваторий в прибрежной зоне.

**Заключение.** Рассмотренная система бистатической ПКЛ с использованием в качестве подсвета сигналов ГНСС может быть задействована в составе МП РЛС мониторинга морских акваторий в районах интенсивного судоходства для обеспечения безопасности движения судов, оперативного контроля морских работ в открытом море, быстрого анализа обстановки на море при аварийной ситуации.

**Ключевые слова:** пассивная когерентная локации, многопозиционная радиолокационная система, спутниковый сигнал, мониторинг прибрежных районов, C/A-код

**Для цитирования:** Нгуен Ван Куан. Пассивная радиолокационная система мониторинга движения судов в прибрежных районах с использованием спутниковых сигналов подсвета // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 3. С. 41–52. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-41-52

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 27.02.2020; принята к публикации после рецензирования 16.05.2020; опубликована онлайн 29.06.2020



## A Passive Radar System for Monitoring of Coastal Areas Ship Traffic Using Satellite Illumination Signals

Nguyen Van Quan<sup>1, 2</sup>✉

<sup>1</sup>Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ quanvnhath@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Increasing requirements for improving of information systems for ensuring navigation safety in coastal areas of marine waters determine the search of new engineering and scientific solutions. The creation of a passive coherent location systems (PCL), based on existing sources of electromagnetic radiation (in particular, global navigation satellite system (GNSS) signals) as radar illumination of the monitored space is of particular interest. During development and implementation of the systems, there are a number of problems related to the search of highly efficient processing algorithms, to the optimization of structure and functioning modes when the system is a part of a complex multi-position monitoring system in coastal areas.

**Aim.** Rationale of the structure of bistatic PCL system with GNSS illumination signal, analysis of methods for increasing of the level of reflected signals, development of a general signal processing algorithm of the system receiver unit, formation of proposals for the creation of multi-position radar system (MP radar) for coastal areas navigation monitoring.

**Materials and methods.** Mathematical modeling, theory of signals, methods of digital signal processing.

**Results.** The structure of the bistatic PCL with GNSS illumination signal for monitoring in coastal areas of marine waters to ensure navigation safety has been developed. Methods for increasing the power level of satellite signals at the input of the receiving device have been proposed. General signal processing algorithm and the algorithm of CAF calculation in the bistatic PCL system using GPS C/A code satellite signal for sea surface coastal areas monitoring have been developed.

**Conclusion.** The considered bistatic PCL system with GNSS illumination may be applied as a part of MP radar for monitoring in areas of heavy vessel traffic to ensure the safety, for operational control of marine operations in the high seas, for quick analysis of the situation at sea in an emergency.

**Keywords:** passive coherent location, multi-position radar, satellite signal, sea surface monitoring, C/A code

**For citation:** Nguyen Van Quan. A Passive Radar System for Monitoring of Coastal Areas Ship Traffic Using Satellite Illumination Signals. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 41–52. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-41-52

---

**Conflict of interest.** Author declares no conflict of interest.

Submitted 27.02.2020; accepted 14.05.2019; published online 29.06.2020

---

**Введение.** Вместе с постоянным развитием судоходства возрастают требования к совершенствованию информационных систем, задачей которых является обеспечение безопасности судоходства. Наиболее актуальна потребность в таких системах в прибрежных районах морских акваторий, для которых характерна наибольшая интенсивность движения судов. Наряду с задачами информационного обеспечения безопасности судоходства такие системы способны осуществлять мониторинг прибрежных акваторий в

целях контроля и прогнозирования развития чрезвычайных ситуаций природного и техногенного происхождения, осуществлять антитеррористический контроль при охране стратегически важных объектов в береговой зоне (например, портов, нефтеналивных терминалов и др.).

В настоящее время для решения задач дистанционного мониторинга прибрежных акваторий широко применяются радиолокационные системы (РЛС), особенно актуально их применение в районах интенсивного движения судоходства. Особый интерес представляет создание бистатических или

мультистатических систем пассивной когерентной локации (ПКЛ), основанных на использовании в качестве радиолокационного подсвета контролируемого пространства существующих источников электромагнитного излучения.

Использование ПКЛ, ввиду отсутствия собственного передатчика, позволяет обеспечить меньшую стоимость производства, размещения и эксплуатации, отсутствие вредного воздействия на окружающую среду, отсутствие помех другим радиотехническим устройствам, высокую скрытность, создает возможность формирования произвольной зоны наблюдения.

В качестве источников сигналов подсвета в бистатической ПКЛ могут использоваться системы цифрового телевидения, цифрового звукового радиовещания, мобильной связи и др. [1–6]. В представленном материале в качестве источника сигнала подсвета в системе бистатической ПКЛ мониторинга морских акваторий рассматривается вариант использования спутниковых систем, а именно глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС).

Ранее автором была проведена оценка дальности обнаружения надводных целей в системе бистатической ПКЛ с использованием различных спутниковых сигналов подсвета; результаты исследования эффективности применения сигналов спутниковых систем различных типов приведены в [7].

В данной статье рассматривается структура построения системы бистатической ПКЛ, основные методы повышения уровня отраженных от целей сигналов в системе бистатической ПКЛ с сигналом подсвета ГНСС, предлагается алгоритм обработки сигналов в приемном устройстве данной системы, определены подходы к созданию многопозиционной радиолокационной системы (МП РЛС) для мониторинга судоходства в прибрежных районах акваторий.

Система глобальной навигации имеет большое количество спутников, сигналы которых непрерывно облучают поверхность Земли. Эти сигналы представляют собой широкополосные и когерентные псевдослучайные фазокодоманипулированные композиции и привязаны к единой системной шкале времени. Одной из основных проблем при использовании спутниковой системы в качестве источников сигнала подсвета является очень низкий уровень мощности сигнала на земной поверхности. На рис. 1 представлены энергетический спектр сигнала глобальной навигационной спутниковой системы GPS на основной центральной частоте  $L1 = 1575.42$  МГц и мощность теплового

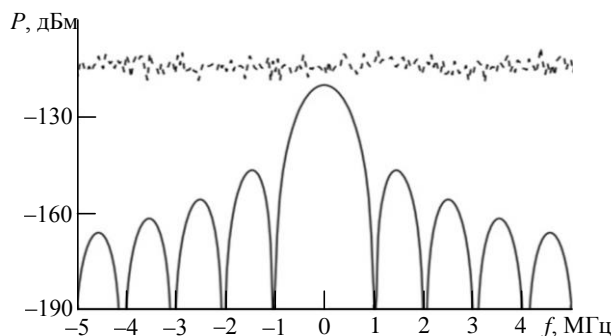


Рис. 1. Спектр сигнала GPS (сплошная линия) и мощность теплового шума (штриховая линия)

Fig. 1. Spectrum signal GPS (solid line) and thermal noise power of the antenna (dashed line)

шума антенны. Сигнал GPS скрыт под шумами – это особенность сигнала с малой мощностью с расширенным спектром множественного доступа с кодовым разделением каналов. Для приема и обработки спутниковых сигналов требуется применение специальных алгоритмов, поэтому наряду с разработкой структуры системы бистатической ПКЛ на основе спутниковых сигналов подсвета необходимы исследования методов повышения уровня мощности отраженного сигнала от объектов наблюдения на входе приемного устройства.

Варианты повышения уровня мощности спутниковых сигналов на входе приемного устройства системы бистатической ПКЛ следующие [8–10]:

- использование методов с длительным временем интегрирования, позволяющих собирать энергию сигнала в течение длительных интервалов времени;
- применение фазированной антенной решетки с большой базой;
- комплексирование отраженных сигналов от нескольких спутников.

Сущность метода с длительным временем интегрирования заключается в том, чтобы собирать энергию отраженного сигнала в течение длительных интервалов времени (десятки секунд), что позволит обеспечить соответствующий уровень отношения сигнал/шум+помеха для обнаружения целей. Эффективность методов обработки с использованием длительного времени интегрирования сигналов, отраженных от движущейся цели, с подсветкой несколькими передатчиками спутниковых систем, рассмотрена в [11]. Авторами представлены результаты, показывающие повышение эффективности обнаружения при использовании нескольких передатчиков спутниковых систем в сравнении с одним базовым передатчиком. Там же показано, что использование антенной решетки на

приемной позиции из  $K$  элементов обеспечивает повышенную способность обнаружения целей, а также высокую точность определения угловых координат.

На практике целесообразно одновременное применение всех перечисленных методов, что позволит в наибольшей степени увеличить уровень мощности отраженного от объектов наблюдения сигнала в системе бистатической ПКЛ. В [12] предложена схема обработки для совместного использования как длительного времени интеграции, так и множества принимающих элементов для решения задачи обнаружения медленно движущихся целей в системе ПКЛ на основе спутниковых сигналов подсвета. Предлагаем основные варианты повышения уровня мощности спутниковых сигналов в системе бистатической ПКЛ, которые помогают в процессе обработки структуры и создания опытного образца ПКЛ мониторинга акваторий в прибрежных районах. В данной работе планируется применение всех трех методов повышения уровня мощности для получения достаточно необходимого отношения сигнал/шум в приемном устройстве системы ПКЛ.

**Методы.** На рис. 2 представлена структурная схема построения системы бистатической ПКЛ

мониторинга акваторий на основе спутниковых сигналов подсвета [13].

В качестве антенны опорного канала предлагается использовать зеркальную антенну. В канале наблюдения применяем антенную решетку (АР), которая с помощью аналоговой схемы формирования диаграммы направленности антенны (ДНА) обеспечивает необходимый сектор наблюдения. Блок согласования состоит из полосового фильтра (или набора полосовых фильтров) и усилителей в опорном канале и канале наблюдения приемной позиции. Блок приемников осуществляет аналого-цифровое преобразование и решает задачи переноса сигналов на частоту фильтрации.

На этапе цифровой обработки используются стандартный и специализированный вычислители, выполняющие следующие функции:

- аппаратно-программное обеспечение для траекторного сопровождения, объединения данных от нескольких приемных позиций (ПП), отображения данных, управления процессом обработки;
- аппаратно-программное обеспечение обработки сигналов опорного канала и канала наблюдения (корректировка прямого сигнала, адаптивная фильтрация отраженного сигнала, вычисление ВФН, обнаружение-измерение).



Рис. 2. Структурная схема ПКЛ мониторинга движения судов с сигналом подсвета ГНСС

Fig. 2. The structural diagram of the PCL monitoring the movement of ships with signal GNSS illumination

Адаптивная фильтрация предназначена для подавления в канале наблюдения прямого сигнала и его мощных копий, возникающих из-за отражения от местных предметов и многолучевости. После обработки данных от целей по каналу передачи данных радиолокационная информация передается в устройство совместной обработки и центр обработки информации (УСО и ЦОИ). В УСО и ЦОИ решаются задачи комплексирования и совместной обработки данных, полученных от нескольких радиолокационных ПП, функционирующих в системе бистатической ПКЛ на основе спутниковых сигналов подсвета.

**Результаты.** В данной статье в системах бистатической ПКЛ мониторинга районов с интенсивным судоходством рассматривается использование в качестве подсвета сигналов L1 типа C/A-кода ГНСС GPS. Общий алгоритм обработки сигналов в системе бистатической ПКЛ при использовании спутникового сигнала GPS L1 C/A-кода представлен на рис. 3. Номер навигационного (NAV – Navigation) космического аппарата (НКА) совпадает с номером псевдослучайной последовательности (ПСП; Pseudorandom Noise – PRN) (НКА 01 = ПСП 01), C/A-код представляет собой двухфазный модулированный сигнал с частотой дискретизации 1.023 МГц для гражданского использования [14].

Одной из наиболее важных характеристик C/A-кодов являются их корреляционные свойства, при этом отношение уровней автокорреляционного пика к взаимным корреляционным пикам показывает, насколько широкий динамический диапазон можно

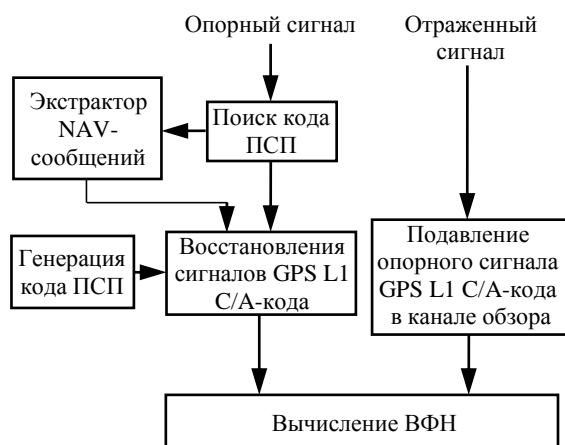


Рис. 3. Общий алгоритм обработки сигналов в системе бистатической ПКЛ с сигналом подсвета ГНСС

Fig. 3. The general signal processing algorithm in a bistatic PCL system with signals GNSS illumination

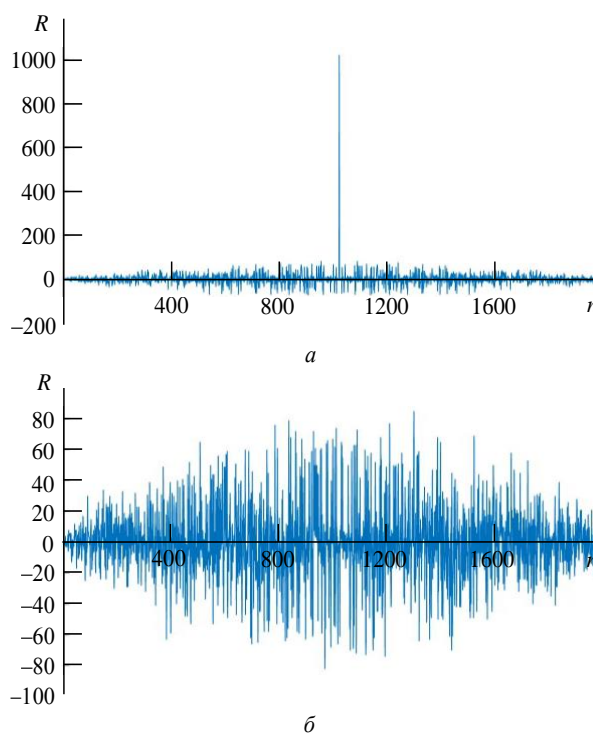


Рис. 4. Автокорреляционная функция (а) и взаимная корреляционная функция (б) C/A-кодов сигнала GPS

Fig. 4. Autocorrelation function (a) and cross-correlation function (b) signal GPS C/A codes

обеспечить при приеме и обработке сигналов. Если коды являются ортогональными, их взаимная корреляция будет равна нулю. Однако C/A-коды (код Голда) не являются строго ортогональными, а лишь близки к ним. Поэтому взаимная корреляция имеет небольшие значения, отличные от нуля. При исследовании корреляционной характеристики C/A-кодов оценивается их автокорреляционная функция (АКФ), взаимная корреляционная функция (ВКФ) кодов соседних спутников, а также влияние шума на взаимную корреляцию сигнала с шумом и копиями сигналов спутниковой системы GPS C/A-кода. На рис. 4 показаны АКФ (номер ПСП 32) и ВКФ (ПСП 8 и ПСП 32) C/A-кода сигнала спутниковой системы GPS):  $R$  – нормированная мощность;  $n$  – количество символов в ПСП.

По сравнению с уровнем боковых лепестков пик АКФ ПСП C/A-кода сигнала спутниковых систем GPS значительно выше (рис. 4, а). С помощью ВКФ можно оценить взаимное влияние шумоподобных кодов соседних спутников. Видно, что максимальный уровень шумового сигнала при взаимном влиянии сигналов соседних спутников сравним с уровнем боковых лепестков АКФ (рис. 4, б).

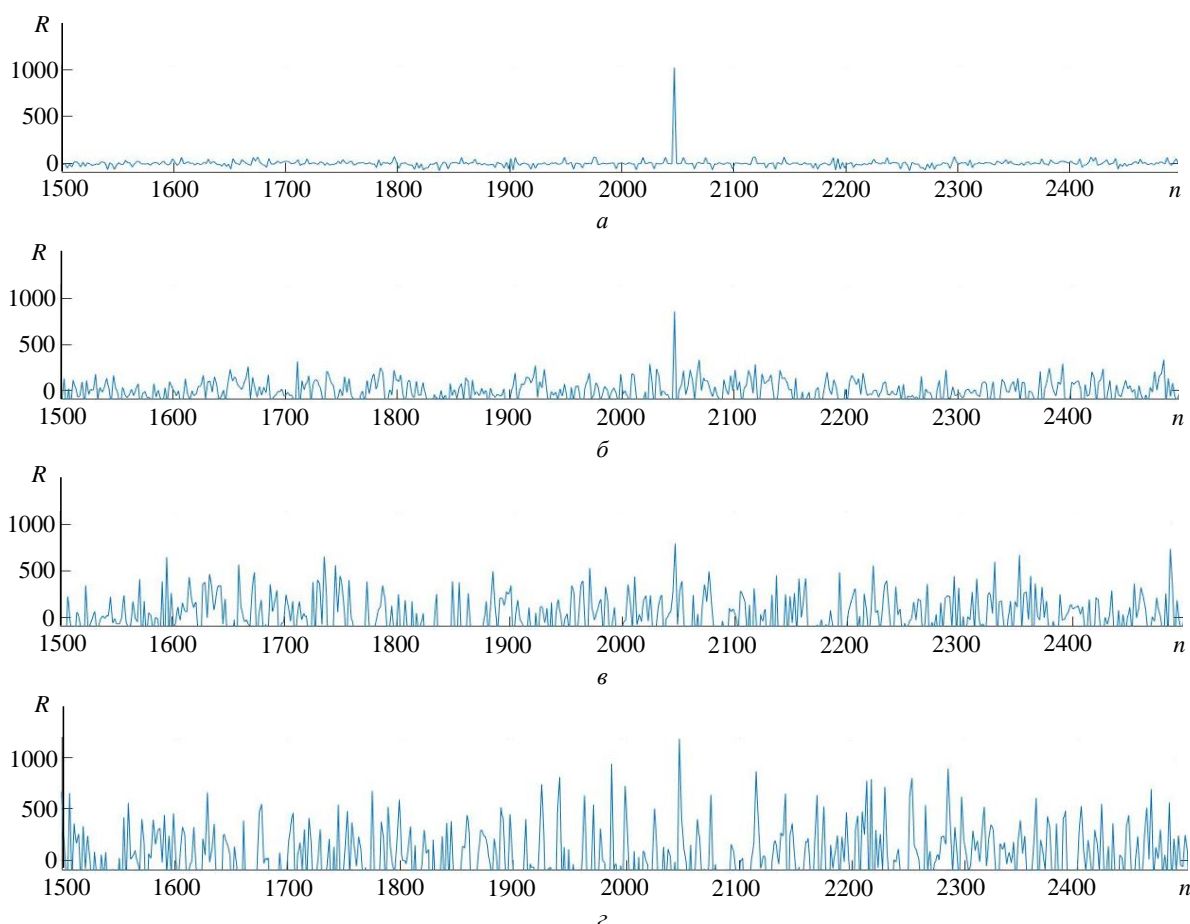


Рис. 5. Взаимная корреляционная функция сигнала с шумом GPS и копиями сигнала спутников GPS 32-го номера псевдослучайной последовательности: а – шум отсутствует; б – шум в 4 раза больше сигнала; в – шум в 8 раз больше сигнала; г – шум в 12 раз больше сигнала

Fig. 5. Cross-correlation function of the GPS signal with noise and copies of the GPS satellite signal of the 32<sup>nd</sup> number of the pseudo-random sequence: а – no noise; б – noise is 4 times the signal; в – noise is 8 times the signal; г – noise is 12 times the signal

Из оценки взаимной корреляции зашумленного сигнала GPS и копий C/A-кода сигнала спутниковых систем GPS (рис. 5) видно, что диапазон значений взаимной корреляции мало изменяется, а из-за шума уровень боковых лепестков повышается вплоть до уровня автокорреляционного пика.

Для реализации процедуры вычисления взаимной корреляционной функции между ПСП C/A-кода сигнала GPS и его копией разработан алгоритм, рассматриваемый далее.

При непрерывном излучении сигнала подсвета передатчиками спутниковых систем и без учета потерь при распространении сигнала от  $i$ -го спутника входной сигнал в приемной позиции на промежуточной частоте можно представить в общем виде:

$$r_i(t) = m_i(t - \tau_i) g_i(t - \tau_i) e^{j[2\pi f_i t + \phi_i + \psi_i]}, \quad (1)$$

где  $m_i(t)$  – код навигационного сообщения;  $g_i(t)$  – ПСП C/A-кода;  $\tau_i$ ,  $f_i$  и  $\phi_i$  – временной,

частотный и фазовый сдвиги сигнала соответственно, вызванные расстоянием и относительной скоростью между спутником и приемником;  $\psi_i$  – фазовый сдвиг (фазовая ошибка), обусловленный распространением сигнала в свободном пространстве.

Навигационное сообщение содержит информацию об орбите спутника, состоянии его работоспособности, параметрах коррекции и другие данные. Эта информация используется для определения пространственного местоположения спутника и времени передачи сигнала. Поскольку код ПСП известен приемнику и используется для обнаружения прямого сигнала от конкретного спутника, можно определить его длительность, связанную с интервалом повторения импульсов передатчика:  $T = N_c T_c$ , где  $N_c$  и  $T_c$  – соответственно, количество и продолжительность каждого кодового сегмента. Время  $t$  между началом и концом каждого

интервала повторения импульсов обычно называют быстрым временем, т. е.  $t \in [0, T]$ , тогда временные интервалы  $u$  с длительностью  $T$  называются медленным временем, т. е.  $u = 0, T, 2T, \dots$ . В течение длительного времени спутниковый сигнал непостоянен, поэтому при моделировании предположим, что время задержки, сдвиг частоты и фазовая ошибка изменяются в медленное время, т. е.  $\tau_i(u)$ ,  $f_i(u)$  и  $\psi_i(u)$ . Примем также, что навигационное сообщение было сформировано в медленное время из-за  $T_m \gg T_c$ , где  $T_m$  – длительность  $m_i(t)$ . Таким образом, выражение для спутникового сигнала (1) может быть преобразовано в следующий вид:

$$r_i(t, u) = m_i(t, u) g_i(t, u) e^{j[2\pi f_i(u)(t+u) + \phi_i(u) + \psi_i(u)]}. \quad (2)$$

Отдельные компоненты соответствуют:

$$m_i(t, u) = m_i[t - \tau_i(u)];$$

$$g_i(t, u) = g_i[t - \tau_i(u)];$$

$$\phi_i(u) = 2\pi[f_0 + f_i(u)]\tau_i(u),$$

где  $f_0$  – несущая частота спутникового сигнала.

В соответствии с (2) сигнал, отраженный от объекта наблюдения, можно представить следующим образом:

$$\hat{r}_i(t, u) = \hat{m}_i(t, u) \hat{g}_i(t, u) e^{j[2\pi \hat{f}_i(u)(t+u) + \hat{\phi}_i(u) + \hat{\psi}_i(u)]}, \quad (3)$$

где  $\hat{m}_i(t, u)$ ,  $\hat{g}_i(t, u)$  и  $\hat{\phi}_i(u)$  можно рассчитать аналогично выражениям для прямого сигнала от спутниковых систем, с соответственной заменой  $\tau_i(u)$  на  $\hat{\tau}_i(u)$  и  $f_i(u)$  на  $\hat{f}_i(u)$ ;  $\hat{\tau}_i(u)$ ,  $\hat{f}_i(u)$  и  $\hat{\psi}_i(u)$  – время задержки, частотный сдвиг и фазовая ошибка соответствующих спутниковых сигналов, отраженных от объекта наблюдения.

Используя (2) и (3), запишем сигналы в опорном канале и канале наблюдения в следующем виде:

$$r_{\text{оп}}(t, u) = \sum_{i=1}^{N_i} \sqrt{a_{i,\text{оп}}(u)} \cdot r_i(t, u) + \sum_{i=1}^{N_i} \sqrt{\hat{a}_{i,\text{оп}}(u)} \cdot \hat{r}_i(t, u) + n_{\text{оп}}(t, u);$$

$$r_{\text{отр}}(t, u) = \sum_{i=1}^{N_i} \sqrt{a_{i,\text{отр}}(u)} \cdot r_i(t, u) + \sum_{i=1}^{N_i} \sqrt{\hat{a}_{i,\text{отр}}(u)} \cdot \hat{r}_i(t, u) + n_{\text{отр}}(t, u), \quad (4)$$

где  $a_{i,\text{оп}}(u)$ ,  $\hat{a}_{i,\text{оп}}(u)$  представляют собой потерю мощности в опорном канале, соответственно, на пути "спутник–приемник" и "спутник–объект наблюдения–приемник";  $a_{i,\text{отр}}(u)$  и  $\hat{a}_{i,\text{отр}}(u)$  – соответствующие потери в канале наблюдения.

В рассматриваемой системе бистатической ПКЛ обнаружение целей реализуется в двумерной области "задержка–доплеровский сдвиг частоты" путем вычисления ВФН сигнала канала наблюдения, в котором присутствуют отражения от целей, и опорного сигнала, полученного с направления на источник подсвета. Процесс вычисления ВФН в системе бистатической ПКЛ при использовании спутниковых сигналов GPS L1 C/A-кода для мониторинга судоходства в прибрежных районах представлен на рис. 6.

В рассматриваемой системе отдельные спутники имеют разное пространственное положение и вектор скорости и, поскольку несколько источников будут одновременно освещать одну зону наблюдения, необходимо разделить их прямые сигналы перед корреляционной обработкой в обоих каналах каждой приемной позиции. В процессе поиска кода ПСП (C/A-кода) для решения этой задачи используется детектор стандартного кода ПСП. Принцип работы детектора кода ПСП заключается в том, что последовательно осуществляется сравнение фрагмента сигнала прямого канала с различными последовательностями C/A-кодов ПСП. Это необходимо для того, чтобы определить время задержки и сдвиг частоты каждого спутникового сигнала в приемнике. Опорная последовательность кода ПСП задается посредством генерации C/A-кода. Для того чтобы детектор и блок отслеживания кода работали правильно, прямой спутниковый сигнал должен быть доминирующим в опорном канале:

$$a_{i,\text{оп}}(u) \gg \hat{a}_{i,\text{оп}}(u). \quad (5)$$



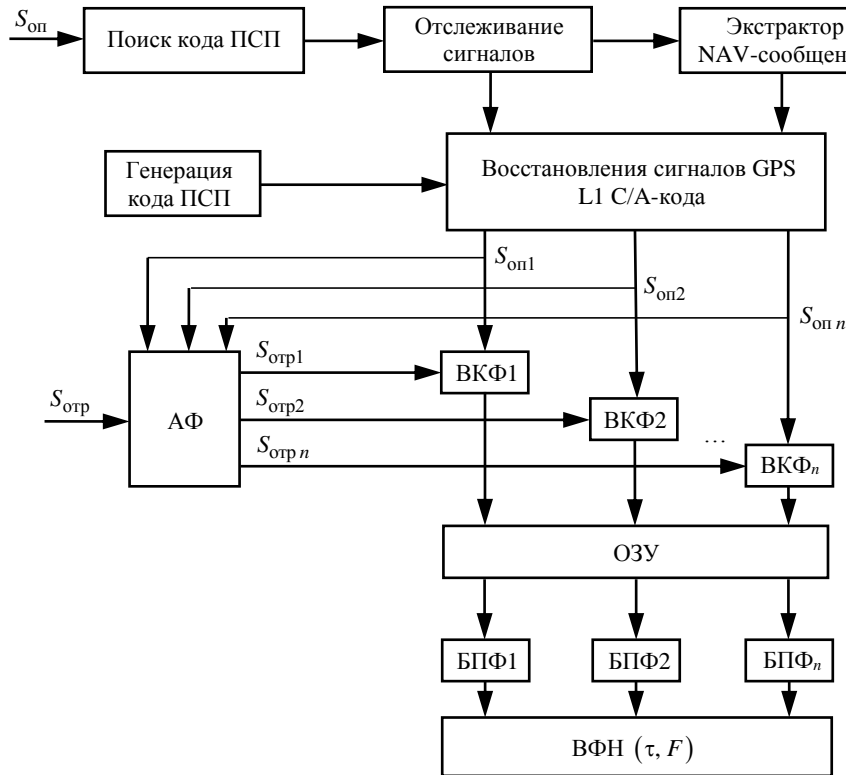


Рис. 6. Процесс вычисления ВФН в системе ПКЛ с сигналом подсвета ГНСС

Fig. 6. The process of calculating the cross-correlation function in the PCL system with signal GNSS illumination

Если условие (5) выполнено, блок отслеживания кода ПСП может предоставить оценку задержки  $\tilde{\tau}_i(u) \approx \tau_i(u)$ , частотного сдвига  $\tilde{f}_i(u) \approx f_i(u)$  и сдвига фазы  $\tilde{\theta}_i(u) \approx \theta_i(u)$  сигнала, который распространяется на пути "спутник–приемник". Далее эта информация передается в блок отслеживания кода ПСП, в котором можно обеспечить более точную оценку времени задержки и сдвига частоты, а также фильтровать прямой сигнал с помощью стандартного кода ПСП:

$$\tilde{m}_i(u) = m_i[u - \tilde{\tau}_i(u)] e^{j2\pi\tilde{\psi}_i(u)},$$

где  $\tilde{\psi}_i(u)$  – фазовая ошибка из-за неидеальной фильтрации кода и явлений при распространении в свободном пространстве.

Используя данные от генерации C/A-кода, блока отслеживания сигналов и блока экстрактора NAV-сообщений, прямые сигналы от  $i$ -го спутника можно восстановить как

$$\tilde{r}_{i, \text{вос}}(t, u) = \tilde{m}_i(u) \tilde{g}_i(t, u) e^{j[2\pi\tilde{f}_i(u)(t+u) + \tilde{\theta}_i(u)]}, \quad (6)$$

где  $\tilde{g}_i(t, u) = g_i[t - \tilde{\tau}_i(u)]$  – сдвинутый по времени код ПСП.

После восстановления прямые спутниковые сигналы, принятые от разных спутников, передаются в блок корреляции. Сигналы, отраженные от объектов наблюдения, посредством адаптивной фильтрации с помощью моделей восстановленного сигнала разделяются по коду ПСП и также передаются в блок корреляции. ВКФ между восстановленным прямым сигналом (6) и сигналом, отраженным от объекта наблюдения (4), может быть выражена как

$$S_i(k, u) = \int_0^T \tilde{r}_{i, \text{вос}}^*(t-k, u) r_{\text{отр}}(t, u) dt = s_i(k, u) + \hat{s}_i(k, u) + n_i(k, u),$$

где  $k$  – время задержки; "\*" – символ операции комплексного сопряжения;

$$s_i(k, u) = \sqrt{a_{i, \text{отр}}(u)} \int_0^T \tilde{r}_{i, \text{вос}}^*(t-k, u) r_i(t, u) dt; \quad (7)$$

$$\hat{s}_i(k, u) = \sqrt{\hat{a}_{i, \text{отр}}(u)} \int_0^T \tilde{r}_{i, \text{вос}}^*(t-k, u) \hat{r}_i(t, u) dt; \quad (8)$$

$$n_i(k, u) = \int_0^T \tilde{r}_{i, \text{вос}}^*(t-k, u) n_{\text{отр}}(t, u) dt$$

– выходные компоненты корреляции, связанные с прямым сигналом, сигналом, отраженным от объекта наблюдения, и шумом соответственно.



Поскольку  $\tilde{\psi}_i(u) \approx \psi_i(u)$ , (7) и (8) можно переписать в виде

$$s_i(k, u) = \sqrt{a_{i, \text{отр}}(u)} \cdot A(k, 0); \quad (9)$$

$$\hat{s}_i(k, u) = \sqrt{\hat{a}_{i, \text{отр}}(u)} \cdot A[\Delta\tau_i(u) + k, \Delta f_i(u)], \quad (10)$$

где  $A(k, 0)$  – сечение ВФН кода ПСП между опорным и восстановленным спутниковыми сигналами при нулевой скорости объекта наблюдения;  $A(\tau, f)$  – функция неопределенности кода ПСП с временем задержки  $\tau$  и частотным сдвигом  $f$ ;  $\Delta\tau_i(u) = \tau_i(u) - \tilde{\tau}_i(u)$  – бистатическая задержка;  $\Delta f_i(u) = f_i(u) - \tilde{f}_i(u)$  – доплеровский сдвиг.

Из (9) и (10) видно, что  $S_i(k, u)$  будет иметь две основные компоненты: одну с нулевой задержкой и нулевым доплеровским сдвигом, и одну с координатами  $\Delta\tau_i(u)$  и  $\Delta f_i(u)$ . Если  $\Delta\tau_i(u) \neq 0$  или  $\Delta f_i(u) \neq 0$ , то можно говорить о наличии цели и оценить ее дальность и радиальную скорость. Все результаты вычисления ВКФ между восстановленным прямым сигналом и сигналом, отра-

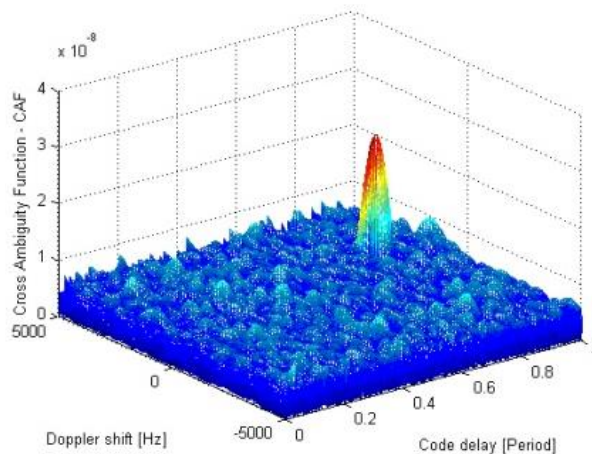


Рис. 7. Взаимная функция неопределенности C/A-кода сигнала GPS

Fig. 7. Mutual uncertainty function GPS signal C/A code

женным от объекта наблюдения, сохраняются в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ). Вычисление ВФН сигнала канала наблюдения и опорного сигнала включает расчет ВФН ПСП (C/A-кода) опорного сигнала спутниковой системы GPS и сигнала, отраженного от объекта наблюдения, и осуществляется посредством быст-

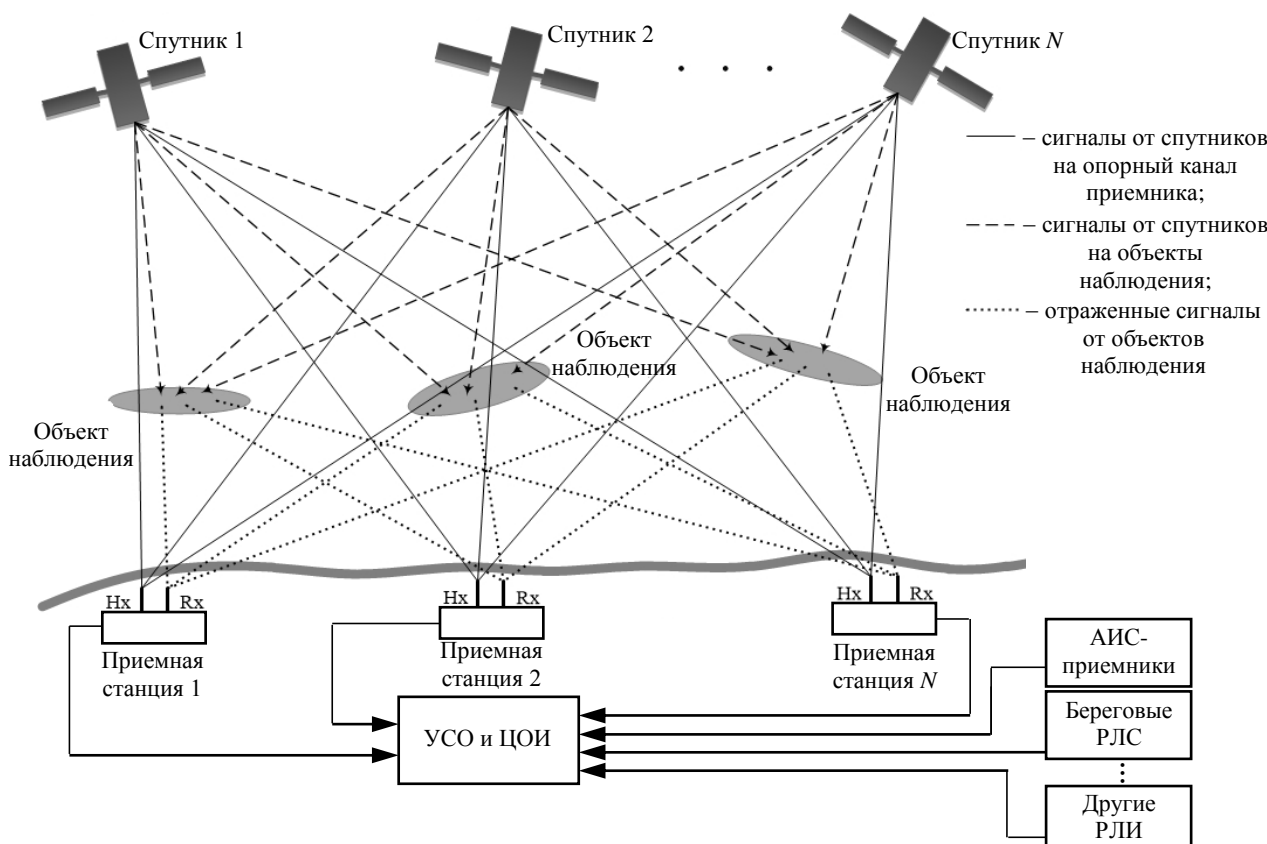


Рис. 8. Структура МП РЛС

Fig. 8. The structure of a multi-position radar system

рого преобразования Фурье (БПФ), применяемого к отдельным ВКФ. Анализ ВФН С/А-кода сигнала спутниковых систем GPS, приведенный в [15] (рис. 7), показывает, что система бистатической ПКЛ мониторинга прибрежных районов морской поверхности с использованием спутникового сигнала GPS в качестве сигнала подсвета имеет хорошую разрешающую способность по дальности и скорости.

Общая структурная схема МП РЛС мониторинга морских акваторий в прибрежных районах представлена на рис. 8. МП РЛС включает в себя систему бистатической ПКЛ ( $N$  станций) на основе спутниковых сигналов подсвета ГНСС, модули автоматической идентификационной системы судов (АИС), систему береговых активных РЛС и другие системы радиолокационной информации (РЛИ). Информация от отдельных датчиков всех систем после предварительной обработки передается по каналам связи в устройство совместной обработки и центр обработки информации (УСО и ЦОИ), где комплексировается, отображается на индикаторах оператора, передается потребителям и архивируется. Не все суда оснащены системами АИС, а активные РЛС мониторинга морской поверхности имеют ограниченную зону наблюдения. Это приводит к ограничениям при наблюдении за действиями всех объектов в прибрежных районах.

**Обсуждение.** Рассмотренная система бистатической ПКЛ с использованием в качестве подсвета спутниковых сигналов может быть задействована в составе МП РЛС мониторинга морских акваторий в районах интенсивного судоходства для обеспечения безопасности движения судов, оперативного контроля морских работ в открытом море, быстрого анализа обстановки на море при аварий-

ной ситуации. МП РЛС, включающая в себя подсистему бистатической ПКЛ с использованием спутниковых сигналов подсвета, дает ряд дополнительных преимуществ:

- увеличение зоны наблюдения;
- повышение точности и надежности оценивания параметров объекта наблюдения;
- улучшение характеристик траекторного сопровождения;
- возможность комбинирования разнотипных датчиков, предоставляющих существенно различную информацию об объекте наблюдения;
- повышение устойчивости работы комплекса при сбоях в функционировании отдельных РЛС, что выражается в увеличении его живучести и помехоустойчивости.

Внедрением в МП РЛС системы бистатической ПКЛ с использованием спутниковых сигналов можно повысить эффективность решения задачи непрерывного информационного обеспечения безопасности движения судоходства и морской деятельности в прибрежных районах.

Таким образом, рассмотрены существующие методы повышения уровня мощности спутниковых сигналов на входе приемного устройства; предложен общий алгоритм обработки сигналов, учитывающий многопозиционность системы; рассмотрен процесс вычисления ВФН в системе бистатической ПКЛ с использованием спутникового сигнала GPS С/А-кода для задач мониторинга прибрежных районов морской поверхности. Рассмотрен вопрос интеграции ПКЛ в составе многопозиционной радиолокационной системы мониторинга морских акваторий в районах интенсивного судоходства. В дальнейшем предполагается изготовление опытного образца бистатической ПКЛ на основе спутниковых сигналов и ее практическая апробация в процессе проведения экспериментальных исследований в реальных условиях.

#### Список литературы

1. Howland P. E., Maksimiuk D., Reitsma G. FM radio based bistatic radar // IEE proceedings-radar, sonar and navigation. 2005. Vol. 152, № 3. P. 107–115. doi: 10.1049/ip-rsn:20045077
2. Over the horizon maritime surveillance capability of DVB-T based passive radar / D. Langellotti, F. Colone, P. Lombardo, E. Tilli, M. Sedehi, A. Farina // 11<sup>th</sup> European Radar Conf. Roma, Italy, 8–10 Oct. 2014. IEEE, 2014. P. 1812–1815. doi: 10.1109/EuRAD.2014.6991319
3. Conti M., Moscardini C., Capri A. Dual-polarization DVB-T passive radar: Experimental results // 2016 IEEE Radar Conf. Philadelphia, USA, 2–6 May 2016. IEEE, 2014. P. 1–5. doi: 10.1109/RADAR.2016.7485126
4. Tan D. K. P., Hongbo Sun, Yilong Lu. Sea and air moving target measurements using a GSM based passive radar // 2005 IEEE Intern. radar conf. Arlington, USA, 9–12 May 2005. IEEE, 2005. 4 p. doi: 10.1109/RADAR.2005.1435932
5. Pisciotto I., Pastina D., Cristallini D. DVB-S based passive radar imaging of ship targets // 20<sup>th</sup> Intern. Radar Symp. (IRS). Ulm, Germany, 26–28 June 2019. IEEE, 2019. P. 1–7. doi: 10.23919/IRS.2019.8768097

6. Pisciotano I., Cristallini D., Pastina D. Maritime target imaging via simultaneous DVB-T and DVB-S passive ISAR // IET radar, sonar and navigation. 2019. Vol. 3. P. 1479–487. doi: 10.1049/iet-rsn.2018.5622

7. Нгуен Ван Куан, Маркелова М. А., Веремьев В. И. Анализ возможности использования спутниковых сигналов подсвета для пассивной радиолокационной системы // Вестн. Новгород. гос. ун-та. Сер. Технические науки. 2019. № 4 (116). С. 86–91. doi: 10.34680/2076-8052.2019.4(116).86-91

8. Maritime moving target long time integration for GNSS-based passive bistatic radar / D. Pastina, F. Santi, F. Pieralice, M. Bucciarelli, H. Ma, D. Tzagkas, M. Antoniou, M. Cherniakov // IEEE transactions on aerospace and electronic systems. 2018. Vol. 54, iss. 6. P. 3060–3083. doi: 10.1109/TAES.2018.2840298

9. GNSS-based passive radar for maritime surveillance: Long integration time MTI technique / F. Pieralice, F. Santi, D. Pastina, M. Bucciarelli, M. Hui, A. Michail, M. Cherniakov // 2017 IEEE Radar conf. Seattle, USA, 8–12 June 2017. IEEE, 2017. P. 508–513. doi: 10.1109/RADAR.2017.7944256

10. Hui M., Michail A., Andrew G. S. Maritime moving target localization using passive GNSS-based multistatic radar // IEEE Transactions on Geoscience and Remote

Sensing. 2018. Vol. 56, iss. 8. P. 4808–4819. doi: 10.1109/TGRS.2018.2838682

11. Multi-transmitter ship target detection technique with GNSS-based passive radar / F. Pieralice, D. Pastina, F. Santi, M. Bucciarelli // Intern. conf. on radar systems (Radar 2017). Belfast, UK, Oct. 2017. 6 p. doi: 10.1049/cp.2017.0418

12. Passive radar array with low-power satellite illuminators based on fractional Fourier transform / Z. Li, F. Santi, D. Pastina, P. Lombardo // IEEE sensors j. 2017. Vol. 17, iss. 24. P. 8378–8394. doi: 10.1109/JSEN.2017.2765079

13. Пассивная когерентная радиолокация / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев и др. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. 164 с.

14. Global positioning systems directorate systems engineering & integration IS-GPS-200. Navstar GPS space segment/navigation user segment interfaces. 21 Sept. 2011. 200 p.

15. GPS signal acquisition and sensitivity analysis using different algorithms on a software receiver / A. Rakipi, B. Kamo, S. Cakaj, A. Lala, I. Shinko // 7<sup>th</sup> Intern. conf. on computational intelligence, communication systems and networks (CICSyN). Riga, Latvia, 3–5 June 2015. IEEE, 2015. № 27. P. 97–102. doi: 10.1109/CICSyN.2015.27

## Информация об авторе

**Нгуен Ван Куан** – инженер по направлению "Специальные радиотехнические системы" (2018), аспирант кафедры радиотехнических систем факультета радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) и Государственного технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – радиолокационные системы мониторинга.

Адрес: Государственный технический университет им. Ле Куй Дона, 236 Хоанг Куок Вьет, Ко Нхуэ, Бак Ты Лиэм, Ханой, Вьетнам

E-mail: quanvnath@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3644-0932>

## Referenses

1. Howland P. E., Maksimiuk D., Reitsma G. FM Radio Based Bistatic Radar. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation. 2005, vol. 152, no. 3, pp. 107–115. doi: 10.1049/ip-rsn:20045077

2. Langellotti D., Colone F., Lombardo P., Tilli E., Sedehi M., Farina A. Over the Horizon Maritime Surveillance Capability of DVB-T Based Passive Radar. 11<sup>th</sup> European Radar Conf. Roma, Italy, 8–10 Oct. 2014. IEEE, 2014, pp. 1812–1815. doi: 10.1109/EuRAD.2014.6991319

3. Conti M., Moscardini C., Capri A. Dual-Polarization DVB-T Passive Radar: Experimental Results. 2016 IEEE Radar Conf. Philadelphia, USA, 2–6 May 2016. IEEE, 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/RADAR.2016.7485126

4. Tan D. K. P., Hongbo Sun, Yilong Lu. Sea and air moving target measurements using a GSM based passive radar. 2005 IEEE Intern. radar conf. Arlington, USA, 9–12 May 2005. IEEE, 2005, 4 p. doi: 10.1109/RADAR.2005.1435932

5. Pisciotano I., Pastina D., Cristallini D. DVB-S Based Passive Radar Imaging of Ship Targets. 20<sup>th</sup> Intern. Radar Symp. (IRS). Ulm, Germany, 26–28 June 2019. IEEE, 2019, pp. 1–7. doi: 10.23919/IRS.2019.8768097

6. Pisciotano I., Cristallini D., Pastina D. Maritime Target Imaging via Simultaneous DVB-T and DVB-S Passive ISAR. IET Radar, Sonar and Navigation. 2019, vol. 3, pp. 1479–487. doi: 10.1049/iet-rsn.2018.5622

7. Nguyen Van Quan, Markelova M. A., Veremyev V. I. On the Satellite Systems Signals as Sources of Illumination for the Bistatic Radar System. *Vestn. Novgorod. gos. un-ta. Ser.: Tekhnicheskie nauki*. 2019, no. 4 (116), pp. 86–91. doi: 10.34680/2076-8052.2019.4(116).86-91 (In Russ.)

8. Pastina D., Santi F., Pieralice F., Bucciarelli M., Ma H., Tzagkas D., Antoniou M., Cherniakov M. Maritime Moving Target Long Time Integration for GNSS-Based Passive Bistatic Radar. IEEE Transactions on Aerospace and Elec-

tronic Systems. 2018, vol. 54, iss. 6, pp. 3060–3083. doi: 10.1109/TAES.2018.2840298

9. Pieralice F., Santi F., Pastina D., Bucciarelli M., Hui M., Michail A., Cherniakov M. GNSS-Based Passive Radar for Maritime Surveillance: Long Integration Time MTI Technique. 2017 IEEE Radar Conf. Seattle, USA, 8–12 June 2017. IEEE, 2017, pp. 508–513. doi: 10.1109/RADAR.2017.7944256

10. Hui M., Michail A., Andrew G. S. Maritime Moving Target Localization Using Passive GNSS-Based Multistatic Radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2018, vol. 56, iss. 8, pp. 4808–4819. doi: 10.1109/TGRS.2018.2838682

11. Pieralice F., Pastina D., Santi F., Bucciarelli M. Multi-Transmitter Ship Target Detection Technique with GNSS-Based Passive Radar. Intern. Conf. on Radar Systems (Radar 2017). Belfast, UK, Oct. 2017, 6 p. doi: 10.1049/cp.2017.0418

12. Li Z., Santi F., Pastina D., Lombardo P. Passive Radar Array with Low-Power Satellite Illuminators Based on Fractional Fourier Transform. IEEE Sensors Journal. 2017, vol. 17, iss. 24, pp. 8378–8394. doi: 10.1109/JSEN.2017.2765079

13. Barkhatov A. V., Verem'ev V. I., Vorob'ev E. N., Konovalov A. A., Kovalev D. A., Kutuzov V. M., Mikhailov V. N. *Passivnaya kogerentnaya radiolokatsiya* [Passive Coherent Radar]. SPb., SPbGETU "LETI", 2016, 164 p. (In Russ.)

14. Global Positioning Systems Directorate Systems Engineering & Integration IS-GPS-200. Navstar GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces. 21, Sept. 2011. 200 p.

15. Rakipi A., Kamo B., Cakaj S., Lala A., Shinko I. GPS signal acquisition and sensitivity analysis using different algorithms on a software receiver. 7<sup>th</sup> Intern. Conf. on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (CICSyN). Riga, Latvia, 3–5 June 2015. IEEE, 2015, no. 27, pp. 97–102. doi: 10.1109/CICSyN.2015.27

### Information about the author

**Nguyen Van Quan**, engineer on special radio systems (2018), PhD student of the Department of Radio Engineering Systems in Saint Petersburg Electrotechnical University and in Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). The author of 1 scientific publication. Area of expertise: radar monitoring systems.  
Address: Le Quy Don Technical University, 236 Co Nhue, Bac Tu Liem, Ha Noi, Viet Nam  
E-mail: quanvnhath@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-3644-0932>

---