

Моделирование алгоритмов обработки в полуактивной радиолокационной системе с использованием сигнала 5G

Нгуен Ван Туан^{1✉}, В. М. Кутузов², Е. Н. Воробьев³

¹Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

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

³НИИ "Прогноз", Санкт-Петербург, Россия

✉ hinhthien08@gmail.com

Аннотация

Введение. Исследования возможности использования новых телекоммуникационных сигналов в качестве подсвета в полуактивных радиолокационных системах (ПАРЛС) – актуальная задача. Развитие систем связи, в частности появление нового стандарта 5G, открывает новые горизонты для развития ПАРЛС, использующих сигналы передатчиков 5G в качестве подсвета. Теоретический анализ характеристик сигнала 5G в контексте его применения в качестве подсвета в ПАРЛС показывает возможность обеспечения высокого разрешения по дальности и скорости. В данной статье приведены результаты моделирования процесса обработки сигналов в ПАРЛС с помощью сигнала 5G для двух сценариев: с нахождением одиночного объекта и двух объектов в области наблюдения. Поскольку ввиду пока еще ограниченного использования сети 5G на территории России экспериментальные исследования затруднены, моделирование процесса обработки сигнала в ПАРЛС с помощью 5G – актуальная задача.

Цель работы. Анализ нисходящего сигнала 5G и моделирование обработки сигналов в ПАРЛС от источника подсвета 5G в разных сценариях.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели использовались основы теории обработки сигналов в ПАРЛС, стандарт и структура 5G, модель канала распространения сигнала 5G, сравнительный анализ. Расчет взаимной функции неопределенности ПАРЛС с использованием сигнала 5G проведен с помощью компьютерного моделирования.

Результаты. Проведено моделирование процесса обработки сигналов в разных сценариях. Результаты показывают, что ПАРЛС с использованием сигнала 5G способна обнаруживать цели с хорошим разрешением как по дальности, так и по скорости.

Заключение. Результаты моделирования дополнительно подтверждают возможность эффективного использования сигнала подсвета 5G в ПАРЛС с целью мониторинга на относительно небольших территориях.

Ключевые слова: взаимная функция неопределенности, полуактивная радиолокация, пассивный когерентный радиолокатор, сеть 5G, сигнал подсвета

Для цитирования: Нгуен Ван Туан, Кутузов В. М., Воробьев Е. Н. Моделирование алгоритмов обработки в полуактивной радиолокационной системе с использованием сигнала 5G // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 44–54. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-44-54

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; принята к публикации после рецензирования 22.11.2024; опубликована онлайн 27.12.2024

Signal Processing in Passive Radar Systems Using 5G: A Simulation Study

Nguyen Van Tuan¹✉, Vladimir M. Kutuzov², Evgenii N. Vorobev³

¹Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Viet Nam

²Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

³Research Institute "Prognoz", St Petersburg, Russia

✉ hinhthien08@gmail.com

Abstract

Introduction. Research into the potential use of new telecommunication signals for illumination in passive radar systems is an important task. The development of communication technologies, particularly the emergence of 5G, offers opportunities for the advancement of passive radar systems that utilize 5G transmitters as illuminators. A theoretical analysis of the 5G signal characteristics in the context of its use for illumination in passive radar systems reveals the potential for high resolution in terms of range and velocity. This article presents the results of simulations of the signal processing process in passive radar systems using a 5G signal for two scenarios: with the presence of a single object and two objects in the observation field. The limited availability of 5G networks in Russia impedes experimental studies. Therefore, simulation of the signal processing process in passive radar systems using 5G signals for object illumination is a relevant task.

Aim. Analysis of 5G downlink signal and simulation of signal processing in passive radar with 5G illumination source in different scenarios.

Materials and methods. The theory of signal processing in semi-active radar, 5G standard and structure, a model of the 5G signal propagation channel, and comparative analysis were used. The calculation of the cross-ambiguity function of the passive radar using the 5G signal was carried out by computer simulation.

Results. The conducted simulation of the signal processing process in different scenarios found that passive radar using a 5G signal is capable of detecting targets with good resolution in terms of both range and velocity.

Conclusion. The simulation results further support the potential for effective use of the 5G illumination signal in passive radar for monitoring purposes in relatively small areas.

Keywords: cross-ambiguity function, passive radar, passive coherent radar, 5G network, illumination signal

For citation: Nguyen Van Tuan, Kutuzov V. M., Vorobev E. N. Signal Processing in Passive Radar Systems Using 5G: A Simulation Study. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp.44–54. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-44-54

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 21.10.2024; accepted 22.11.2024; published online 27.12.2024

Введение. Полуактивная радиолокация, использующая сторонние источники подсвета, – одно из наиболее активно развивающихся направлений исследований и разработок в сфере создания систем воздушного и морского наблюдения. В последние годы значительные усилия были направлены на улучшение основных алгоритмов обработки с точки зрения как минимизации вычислительной сложности, так и достижимой эффективности [1–3]. Кроме то-

го, при разработке новых полуактивных радиолокационных систем (ПАРЛС) продолжают исследования в направлении использования новых появляющихся источников сигналов [4–7].

Развитие сетей 5G приводит к появлению новых источников освещения для полуактивных радаров. Согласно предыдущим оценкам и исследованиям [8], ПАРЛС с использованием сигнала 5G имеет относительно ограниченное покрытие и рабочую зону, но обладает высоким

разрешением по дальности и скорости. ПАРЛС с использованием сигнала 5G можно применять для мониторинга транспортных средств, в частности, для обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте или на перекрестках.

Сегодня сети связи 5G вводятся в эксплуатацию во многих странах мира, в том числе в России и Вьетнаме. Стандарт 5G имеет гибкую структуру частотного спектра, и страны сами определяют оптимальные частотные диапазоны для его использования. Каждый диапазон имеет свои уникальные технические особенности. Это, в свою очередь, обуславливает различия в исследованиях, проводимых для радиолокационных станций, включая используемые несущую частоту и полосу пропускания.

В настоящее время в России проведение исследований по использованию сигналов 5G в ПАРЛС сталкивается с определенными трудностями. Экспериментальная сеть пятого поколения пока доступна лишь в нескольких определенных местах некоторых регионов, а количество пользовательских устройств, поддерживающий этот стандарт связи, ограничено. В связи с этим моделирование становится одним из основных методов для оценки возможностей ПАРЛС с использованием сигналов 5G.

В данной статье рассмотрены структура и основные характеристики сигнала 5G нисходящей линии, который тестируется в России. Выполнено моделирование двух возможных радиолокационных сценариев: с одной и двумя подвижными целями в многолучевой обстановке, проведен анализ результатов моделирования.

Сигнал 5G. Частотный ресурс мобильных сетей 5G разделен на 2 частотных диапазона [9]. Первый диапазон частот (FR1) включает в себя частоты ниже 6 ГГц, второй (FR2) – от 24.25 до 71.0 ГГц. Максимальная полоса пропускания в FR1 составляет 100 МГц, в FR2 – 400 МГц.

В конце января 2024 г. правительство РФ утвердило решение о выделении диапазона частот от 4.4 до 4.99 ГГц для работы 5G-сетей на территории России. В соответствии с технической спецификацией стандарта пятого поколения в проекте 3GPP диапазон 4.4...4.99 ГГц относится к полосе n79 (4.4...5 ГГц). В табл. 1 представлены параметры сигнала для полосы n79.

Передача в сетях 5G основана на циклическом мультиплексировании с префиксно-орто-

Табл. 1. Нумерология для сигнала 5G в n79

Tab. 1. Numerology for 5G signal in n79

μ	Δf_c , кГц	Полоса пропускания, МГц	$N_{сл}$	$N_{сим}$	Циклический префикс
0	15	10, 20, 30, 40, 50	1	14	Нормальный
1	30	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	2	14	Нормальный
2	60	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	4	14 или 12	Нормальный или расширенный

гональным частотным разделением (CP-OFDM). В отличие от сигнала LTE, который поддерживает только один тип разнесения поднесущих, $\Delta f_c = 15$ кГц, в 5G используются поднесущие с различной шириной спектра [10]. Поднесущие сигнала 5G зависят от нумерологии, которая описывается параметром $\mu \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$, и определяются по формуле $\Delta f_c = 2^\mu \cdot 15$.

Ресурсы сигналов 5G распределяются во временной и частотной областях. Во временной области сигнал 5G измеряется в кадрах. Один кадр имеет длину 10 мс и состоит из 10 подкадров длиной 1 мс. Каждый подкадр делится на слоты, количество которых $N_{сл} = 2^\mu$. В одном слоте, в зависимости от вида циклического префикса, содержится 14 или 12 символов. Один символ – это наименьший временной интервал во временной области, а в частотной области наименьший квант частоты – поднесущая. Элемент ресурса – это наименьший частотно-временной ресурс, состоящий из одного символа и одной поднесущей. Блок ресурсов определен только в частотной области и состоит из 12 поднесущих. Все доступные блоки ресурсов составляют так называемую сетку ресурсов. Ресурсы выделяются для нескольких каналов и сигналов. В данной статье основное внимание уделяется следующим физическим сигналам и каналам нисходящей линии связи:

- Primary Synchronization signal (PSS) – сигнал первичной синхронизации, позволяющий пользовательским устройствам выполнить синхронизацию по частоте и времени;
- Secondary Synchronization signal (SSS) – сигнал вторичной синхронизации, используемый для определения физической идентификации соты;

– Physical Broadcast Channel (PBCH) – физический широковещательный канал для передачи системной информации на пользовательские устройства во время поиска соты;

– Physical Downlink Control Channel (PDCCH) – физический нисходящий канал управления для передачи управляющей информации от базовой станции к пользовательскому устройству;

– Physical Downlink Shared Channel (PDSCH) – физический нисходящий общий канал для передачи пользовательских данных от базовой станции к пользовательскому устройству;

– Demodulation reference signal (DM-RS) – опорный сигнал демодуляции, позволяющий пользовательским устройствам выполнить оценку канала и демодуляцию связанных физических каналов;

– Phase-tracking reference signal (PT-RS) – опорный сигнал отслеживания, позволяющий оценить и минимизировать влияние общей фазовой ошибки на производительность системы;

– Channel-state information reference signal (CSI-RS) – опорный сигнал, содержащий информацию о состоянии канала, позволяет оценить канал и сообщить информацию о его качестве.

Каждый из этих каналов/сигналов имеет разное назначение, располагается в разных местах частотно-временной сетки и по-разному кодируется.

Сценарий полуактивной радиолокации.

Типичный радиолокационный сценарий для ПАРЛС на базе 5G показан на рис. 1. Базовая станция 5G работает как источник подсвета для всей радиолокационной сцены. Приемная позиция ПАРЛС состоит из двух каналов сбора данных: опорного и канала наблюдения. Опорный канал служит для приема исходного передаваемого сигнала. Это достигается посредством направления антенны на передатчик. Другая антенна смотрит в сторону предполагаемой зоны наблюдения за целью и является приемным каналом эхосигнала.

Сигнал опорного канала

$$s_{\text{прям}}(t) = A_0 x(t - \tau_0) + \omega_{\text{прям}}(t),$$

где A_0 – комплексная амплитуда прямого сигнала при времени задержки τ_0 в опорном канале; $x(t)$ – сигнал, передаваемый от источника подсвета; $\omega_{\text{прям}}(t)$ – шум в опорном канале.

Сигнал канала наблюдения состоит из четырех частей. Первая – это сигнал прямой трассы ($s_{\text{прям}}(t)$); вторая состоит из эхосигналов, отраженных от целей ($s_{\text{эхо}}(t)$); третья – сигналы, определяемые многолучевым распространением, отраженные от неподвиж-

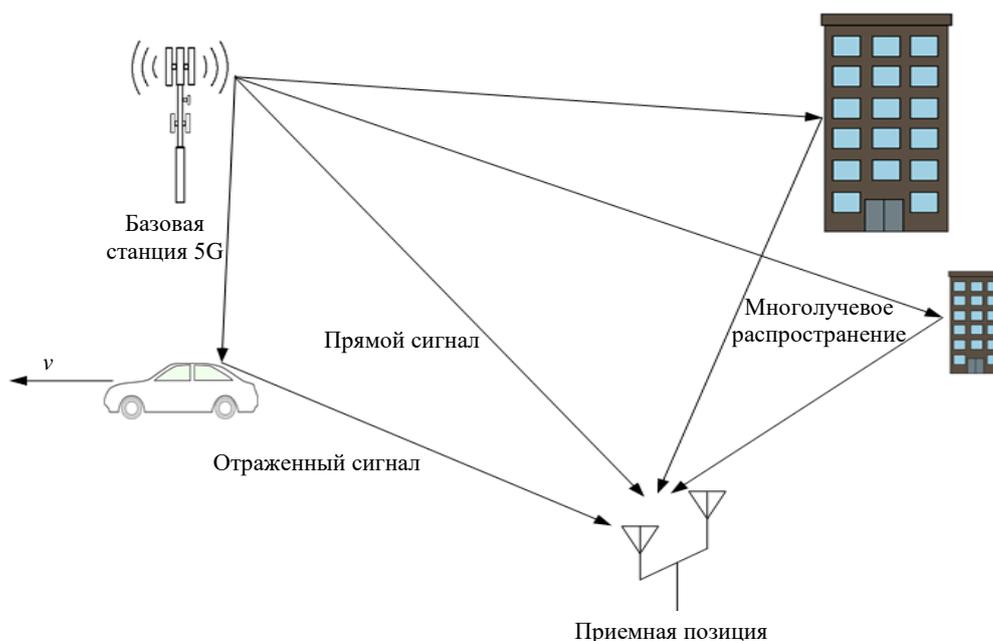


Рис. 1. Сценарий полуактивной радиолокации

Fig. 1. Passive radar scenario

ных объектов на заднем плане ($s_{\text{мног}}(t)$); и последняя – шумовой сигнал в канале наблюдения ($\omega_{\text{наб}}(t)$). Тогда общее выражение для принятого сигнала

$$s_{\text{наб}}(t) = s_{\text{прям}}(t) + s_{\text{эхо}}(t) + s_{\text{мног}}(t) + \omega_{\text{наб}}(t),$$

или

$$s_{\text{наб}}(t) = Ax(t - \tau_0) + \sum_{m=1}^M A_m x(t - \tau_m) + \sum_{k=1}^K A_k x(t - \tau_k) e^{j2\pi f_{\text{Дк}} t} + \omega_{\text{наб}}(t),$$

где A – комплексная амплитуда прямого сигнала в канале наблюдения; M – количество стационарных источников помех; A_m – комплексная амплитуда стационарных помех; K – количество целевых источников; A_k – комплексная амплитуда принятого сигнала от k -й цели с задержкой τ_k ; $f_{\text{Дк}}$ – доплеровский сдвиг k -й цели; $\omega_{\text{наб}}(t)$ – шум в канале наблюдения.

На приемной позиции для определения би-статической дальности и скорости цели вычисляется взаимная функция неопределенности (ВФН) сигналов в каналах наблюдения и прямого пути

$$\chi(\tau, f_{\text{Д}}) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{\text{наб}}(t) s_{\text{прям}}^*(t - \tau) e^{-j2\pi f_{\text{Д}} t} dt.$$

Зачастую мощность прямого сигнала, сигналов, обусловленных многолучевым распространением, и помех намного больше, чем у сигнала от цели, что приводит к маскированию эхосигналов от движущейся цели, следовательно, процедура их подавления имеет решающее значение для работы ПАРЛС. Сумма $s_{\text{прям}}(t) + s_{\text{мног}}(t)$ представляет собой нежелательную составляющую, уровень которой следует минимизировать методами фильтрации помех. Для подавления влияния мешающих сигналов из-за прямого и многолучевого распространения в канале наблюдения применяется адаптивная фильтрация. Наиболее распространенными из адаптивных фильтров являются: метод наименьших квадратов (Least Mean Square – LMS); нормализованный метод

наименьших квадратов (NLMS); рекурсивный метод наименьших квадратов (Recursive Least Square – RLS); алгоритм подавления мощных отражений (Extensive Cancellation Algorithm – ECA) и среднеквадратический решетчатый фильтр (Least Square Lattice – LSL). Каждый из алгоритмов имеет свои особенности. В описываемой работе для подавления помех используется алгоритм, основанный на LMS. От других методов [11, 12] алгоритм LMS отличают следующие преимущества: простота расчета, простота применения и высокая надежность.

Метод наименьших квадратов (LMS) является наиболее широко используемым алгоритмом адаптивной фильтрации на практике. Он предназначен для имитации желаемого фильтра посредством нахождения его коэффициентов, которые относятся к получению наименьшего среднего квадрата сигнала ошибки.

Алгоритм фильтрации на основе наименьших квадратов разделен на 2 основных процесса – фильтрации и адаптации [13, 14]. В процессе фильтрации выполняются две основные операции: вычисление выходного сигнала фильтра с использованием входного дискретного сигнала и сигнала ошибки, который представляет собой разницу между желаемым ответом и выходным сигналом фильтра.

Выходной дискретный сигнал фильтра LMS можно описать следующим образом:

$$y(k) = \sum_{n=0}^N w_n x(k - n),$$

где w – адаптивный коэффициент фильтра; $x(k)$ – входной дискретный сигнал.

Сигнал ошибки

$$e(k) = d(k) - \sum_{n=0}^N w_n x(k - n) = d(k) - \mathbf{x}^T(k) \mathbf{w},$$

где $d(k)$ – образцовый сигнал; $\mathbf{x}(k)$ и \mathbf{w} – векторы-столбцы.

В процессе адаптации веса фильтра корректируются с использованием ошибки, которая оценивается в процессе фильтрации.

Веса фильтра определяются выражением

$$\mathbf{w}(k + 1) = \mathbf{w}(k) + \mu \mathbf{x}(k) e(k),$$

где μ – положительный коэффициент (размер шага).

Обычно значения временной задержки и доплеровского сдвига цели в ПАРЛС оцениваются посредством обнаружения пиков ВФН между опорным сигналом и остаточным сигналом s_e (т. е. сигналом ошибки адаптивного фильтра), содержащим желаемый эхосигнал от цели после подавления помех. Дискретное временное выражение ВФН определяется как

$$\chi(l, p) = \sum_{i=0}^{M-1} s_e(i) s_{\text{опор}}^*(i-l) e^{-j2\pi p i / M},$$

где $l = 0, \dots, R-1$ – номер элемента дальности (задержки); R – число элементов дальности; $p = -P, -P+1, \dots, P-1, P$ – номер доплеровского канала; $2P+1$ – число доплеровских каналов.

Параметры моделирования. Текущие потребности пользователей являются основой для распределения частотно-временных ресурсов сетевым планировщиком.

В зависимости от уровня спроса на ресурсы планировщик может задействовать их все полностью, когда нагрузка очень высока, и почти не использовать (за исключением сигнала синхронизации), если нагрузка минимальна.

При моделировании рассмотрена ситуация, в которой к базовой станции, обслуживающей сектор связи, подключено одно пользовательское устройство 5G, постоянно обменивающееся данными с базовой станцией. При этом полагается, что сигнал 5G работает в режиме временного разделения (Time Division Duplex – TDD). Технические параметры сигнала 5G, использованные при моделировании, приведены в табл. 2.

На рис. 2 показан сигнал 5G нисходящей линии для одного пользователя во временной области.

На практике в процессе обработки сигналов в ПАРЛС должна выполняться процедура восстановления опорного сигнала. Взаимосвязь между сигналами и каналами нисходящего сигнала 5G, а также процесс восстановления опорного сигнала предполагается более подробно рассмотреть в последующих исследованиях.

При моделировании нежелательных составляющих в канале наблюдения использована методика, приведенная в [15]. Этот документ описывает методологию моделирования проектирования.

Моделирование алгоритмов обработки

в полуактивной радиолокационной системе с использованием сигнала 5G
Signal Processing in Passive Radar Systems Using 5G: A Simulation Study

Табл. 2. Параметры для моделирования нисходящего сигнала 5G

Tab. 2. Parameters for modeling 5G downlink signal

Параметр	Значение
Каналы и сигналы	PSS, SSS, PBCH, PDCCH, PDSCH, DM-RS
Центральная частота, МГц	4850
Ширина полосы пропускания (Δf_0), МГц	40
Интервал поднесущих, кГц	PSS, SSS и PBCH: 30, остальные каналы и сигналы: 15
Время накопления (T_c), мс	100
Частота дискретизации, МГц	61.44
Период повторения (T_b), мс	10
Отношение сигнал/шум в канале наблюдения, дБ	20
Отношение сигнал/шум в опорном канале, дБ	100

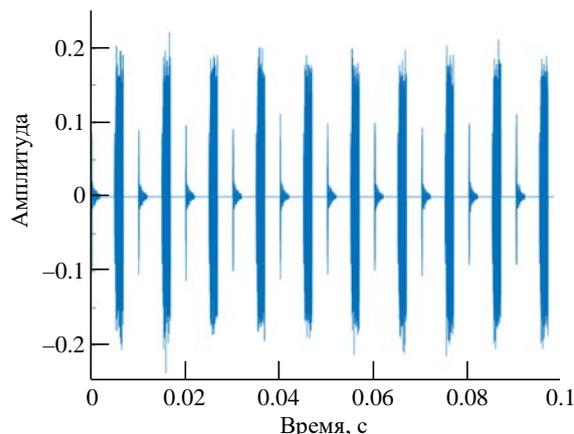


Рис. 2. Сигнал 5G для одного пользователя во временной области

Fig. 2. 5G signal for one user in time domain

оптимизации и оценки систем 5G, сформулированную 3GPP. Модель канала применима для моделирования на уровне канала и системы в различных условиях. Например, для моделирования на системном уровне поддерживаются такие сценарии, как городская макросота, внутренний офис, сельская макросота и крытая фабрика. При этом для моделирования распространения сигнала 5G в каждом из сценариев системного уровня возможны случаи как присутствия прямой видимости (Line of Sight – LOS), так и отсутствия прямой видимости (Non Line of Sight – NLOS) и т. д.

В [15] определены две стохастические модели каналов для оценки параметров связи между базовой станцией 5G и пользовательскими устройствами в различных сценариях: линия задержки по кластерам (Clustered delay line – CDL) и ответвленная линия задержки (Tapped delay line – TDL). Каждый кластер в модели каналов CDL содержит многолучевые компоненты с одинаковой задержкой, но с незначительными различиями в углах излучения и приема. TDL – это упрощенная модель канала связи, которая используется в случае моделирования физического уровня мобильных систем связи без моделирования метода пространственного кодирования сигнала (multiple-input and multiple-output – MIMO). Вместо использования общих моделей, доступных в стандартах, в данной статье предлагается новая модель канала для городской макросоты – сценария с присутствием прямой видимости по правилам, определенным в [15].

Многолучевое распространение приводит к различным задержкам, которые могут быть получены случайным образом из распределения задержек в модели канала

$$\tau'_n = -r_\tau \Delta\tau \ln X_n,$$

где r_τ – коэффициент пропорциональности распределения задержек; $\Delta\tau$ – рассеяние задержки (Delay Spread), возникающее из-за многолучевого распространения [15]; X_n – случайная величина, имеющая равномерное распределение по $(0, 1)$.

В процессе моделирования осуществляется нормирование задержки, вычитание минимальной задержки и сортировка их в порядке возрастания:

$$\tau_n = \text{sort}(\tau'_n - \min(\tau'_n)).$$

Для условия LOS задержка равна:

$$\tau_n^{\text{LOS}} = \frac{\tau_n}{0.7705 - 0.0433K + 0.0002K^2 + 0.000017K^3}.$$

Мощность кластера рассчитывается как

$$P'_n = \exp\left(-\tau_n \frac{r_\tau - 1}{r_\tau \Delta\tau}\right) 10^{\frac{-Z_n}{10}},$$

где $Z_n \sim N(0, \xi^2)$ – коэффициент затенения для каждого кластера, дБ.

Мощность кластера нормирована следующим образом:

$$P_n = \frac{P'_n}{\sum_{n=1}^N P'_n}.$$

Для условия LOS к первому кластеру добавляется дополнительный зеркальный компонент, а мощность кластера определяется как

$$P_n = \frac{1}{K_R + 1} \frac{P'_n}{\sum_{n=1}^N P'_n} + \delta(n-1) \frac{K_R}{K_R + 1},$$

где K_R – K -фактор Райса, преобразованный в линейную шкалу; $\delta(\cdot)$ – дельта-функция.

В табл. 3 представлены вычисленные параметры разработанной модели канала, которые используются далее при моделировании многолучевого сценария в ПАРЛС.

Табл. 3. Параметры модели канала
 Tab. 3. Channel model parameters

Номер	Задержка, нс	Мощность, дБ
1	0	-0.2
2	210	-19.1
3	215	-15.9
4	805	-24.2
5	1050	-21.1
6	2075	-24.9

Для фильтрации помех при моделировании используется адаптивный фильтр LMS с размером шага 0.01 и длиной фильтра $M = 64$.

Результаты моделирования. Рассмотрены 2 сценария для городской макросоты, в которых гипотетическая цель располагается в зоне покрытия до 650 м и имеет скорость меньше 60 км/ч.

Для заданных параметров сигнала 5G (табл. 2) наилучшее разрешение по дальности составляет 3.75 м ($\Delta R = c/(2\Delta f_0)$), а наилучшее разрешение по радиальной скорости 0.31 м/с ($\Delta v_r = \lambda/(2T_c)$).

В первом сценарии проведено моделирование одиночной цели со значениями бистатической дальности $R_b = 120$ м и скорости $v_b = 40$ км/ч. Результаты моделирования показаны на рис. 3.

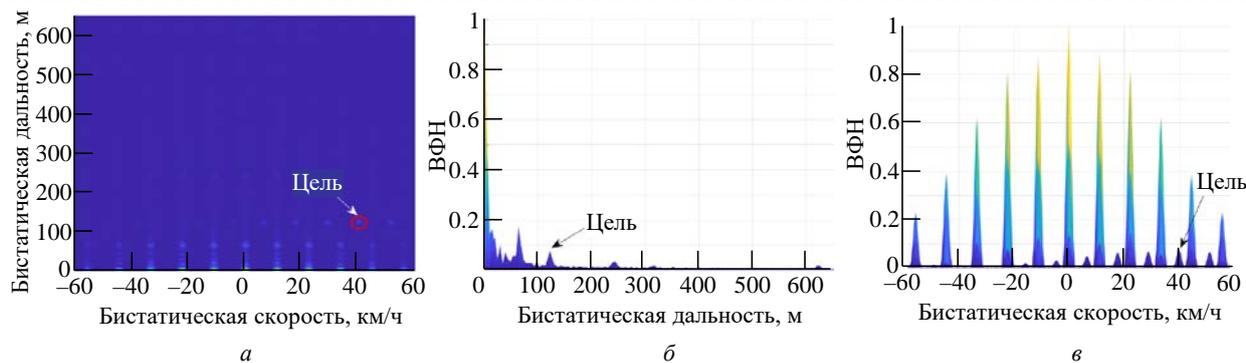


Рис. 3. ВФН до адаптивной фильтрации при первом сценарии: *a* – плоскость дальность–скорость; *б* – поперечное сечение ВФН по дальности; *в* – поперечное сечение ВФН по скорости

Fig. 3. CAF before adaptive filtering for the first scenario: *a* – the range–Doppler plane; *б* – the range cross section; *в* – the velocity cross section

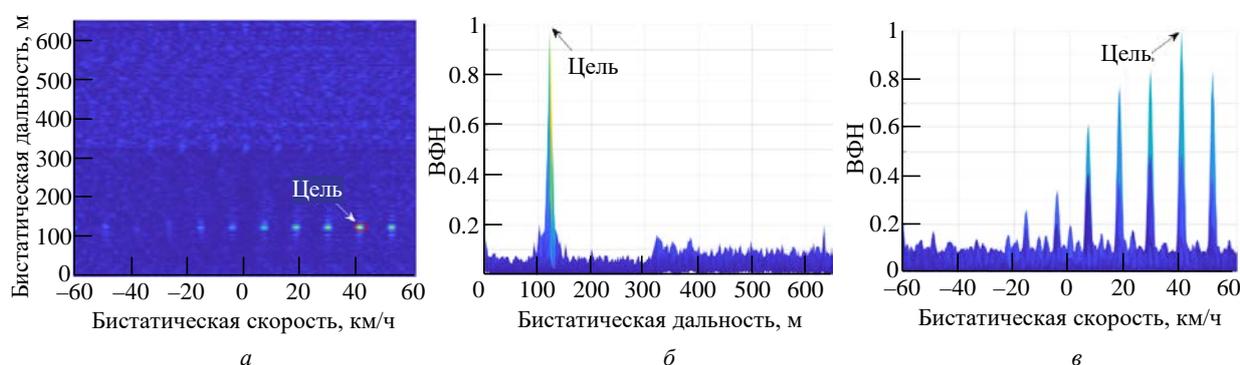


Рис. 4. ВФН после адаптивной фильтрации при первом сценарии: *a* – плоскость дальность–скорость; *б* – поперечное сечение ВФН по дальности; *в* – поперечное сечение ВФН по скорости

Fig. 4. CAF after adaptive filtering for the first scenario: *a* – the range–plane; *б* – the range cross section; *в* – the velocity cross section

Из рис. 3, *a* можно заметить, что до адаптивной фильтрации обнаружение цели затруднено из-за сильных помех и многолучевого распространения. Самому большому пику в плоскости дальность–доплеровское смещение соответствует прямой сигнал в канале наблюдения. Отметка цели отличается от других отметок доплеровским смещением. Напротив, цель хорошо обнаруживается после адаптивной фильтрации, как показано на рис. 4, *a*.

На рис. 3, *a*, *в* и 4, *a*, *в* видно появление нежелательного ряда ложных пиков. При несущей частоте 4850 МГц нисходящий сигнал 5G для одного пользователя повторяется с периодом $T_b = 10$ мс (см. рис. 2), а ложные пики повторяются с интервалом бистатической скорости $v_{л} = \frac{\lambda}{2T_b} \approx 3.093$ м/с (11.13 км/ч).

В случае высокого спроса на ресурсы 5G (т. е. при большом числе пользователей) нисходя-

щий сигнал 5G заполняется почти по всем символам, что приводит к значительному уменьшению уровня ложных пиков. Однако, соответственно, процесс обработки нисходящего сигнала 5G становится алгоритмически более сложным.

Во втором сценарии приведена гипотетическая ситуация для демонстрации разрешающей способности по дальности и скорости ПАРЛС с использованием сигнала 5G. Две цели имеют близкую бистатическую дальность и скорость, соответственно $R_{b1} = 160$ м; $v_{b1} = 38$ км/ч и $R_{b2} = 165$ м; $v_{b2} = 36$ км/ч. Результаты моделирования второго сценария после адаптивной фильтрации показаны на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что отметки двух целей расположены близко друг к другу, но могут быть четко различимы.

Закключение. В статье проведен анализ нисходящих сигналов и каналов в системе связи 5G в диапазоне n79, утвержденном к ис-

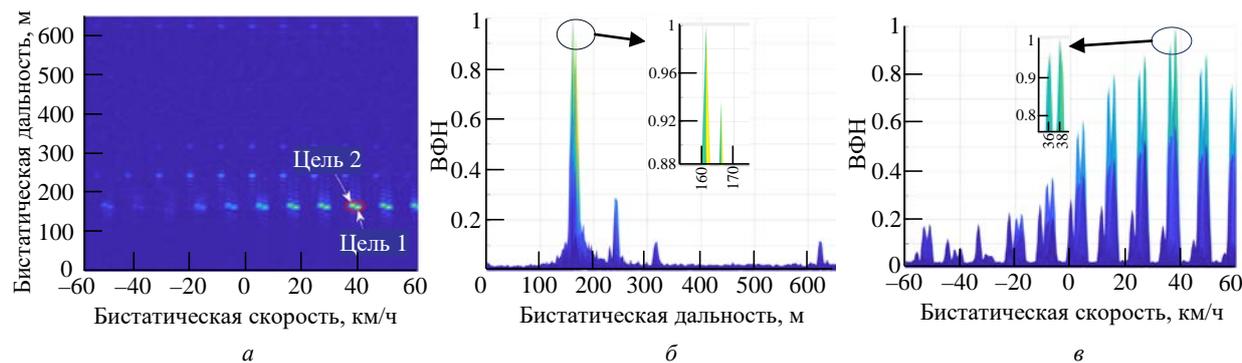


Рис. 5. ВФН во втором сценарии: *а* – плоскость дальность–доплеровская скорость; *б* – поперечное сечение ВФН по дальности; *в* – поперечное сечение ВФН по скорости

Fig. 5. CAF in the second scenario: *a* – range-Doppler plane; *b* – range cross section; *v* – velocity cross section

пользованию в России. Выполнено моделирование процесса обработки сигналов 5G, используемых в качестве подсвета в ПАРЛС, а также проведен анализ результатов расчета ВФН для двух радиолокационных сценариев. Результаты моделирования показывают, что ПАРЛС с использованием сигнала 5G способна

обнаруживать цели с хорошим разрешением как по дальности, так и по скорости. Результаты моделирования дополнительно подтверждают возможность эффективного использования сигналов связи 5G в ПАРЛС в качестве подсвета с целью мониторинга обстановки на относительно небольших территориях.

Список литературы

1. Range Resolution Improvement of GNSS-Based Passive Radar via Incremental Wiener Filter / Z. He, Y. Yang, W. Chen, D. Weng // IEEE Geoscience and Remote Sensing Let. 2022. Vol. 19. P. 1–5. Art. № 4020005. doi: 10.1109/LGRS.2021.3130062
2. DVB-T Receiver Independent of Channel Allocation, With Frequency Offset Compensation for Improving Resolution in Low Cost Passive Radar / P.-J. Gómez-del-Hoyo, M.-P. Jarabo-Amores, D. Mata-Moya, N. del-Rey-Maestre, M. Rosa-Zurera // IEEE Sensors J. 2020. Vol. 20, № 24. P. 14958–14974. doi: 10.1109/JSEN.2020.3011129
3. Exploitation of Long Coherent Integration Times to Improve Drone Detection in DVB-S based Passive Radar / T. Martelli, O. Cabrera, F. Colone, P. Lombardo // IEEE Radar Conf. (RadarConf20), Florence, Italy, 21–25 Sept. 2020. IEEE, 2020. P. 1–6. doi: 10.1109/RadarConf2043947.2020.9266624
4. Gomez-Del-Hoyo P., Gronowski K., Samczynski P. The STARLINK-based passive radar: preliminary study and first illuminator signal measurements // 23rd Intern. Radar Symp. (IRS), Gdansk, Poland, 12–14 Sept. 2022. IEEE, 2022. P. 350–355. doi: 10.23919/IRS54158.2022.9905046
5. Passive Radar Architecture based on Broadband LEO Communication Satellite Constellations / R. Blázquez-García, M. Ummenhofer, D. Cristallini, D. O'Hagan // IEEE Radar Conf., New York, USA, 21–25 March 2022. IEEE, 2022. P. 1–6. doi: 10.1109/RadarConf2248738.2022.9764342
6. LTE-based passive radars and applications: a review / P. K. Rai, A. Kumar, M. Z. A. Khan, L. R. Cenkeramaddi // Intern. J. of Remote Sensing. 2021. Vol. 42, iss. 19. P. 7489–7518. doi: 10.1080/01431161.2021.1959669
7. Passive Radar Imaging Based on Multistatic Combination of Starlink and OneWeb Illumination / R. Blázquez-García, T. Hauschild, P. Markiton, M. Ummenhofer, V. Seidel, D. Cristallini // IEEE Radar Conf. (RadarConf24), Denver, USA, 06–10 May 2024. IEEE, 2024. P. 1–6. doi: 10.1109/RadarConf2458775.2024.10548646
8. Анализ возможностей использования сигналов подсвета 5G в полуактивной радиолокационной системе / В. М. Кутузов, В. И. Веремьев, Н. Туан, Е. Н. Воробьев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 1. С. 67–78. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-67-78
9. 3GPP TS 38.104 ver. 16.6.0 Release 16. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/16.06.00_60/ts_138104v160600p.pdf (дата обращения 02.10.2024)
10. 3GPP TS 38.211 ver. 16.6.0 Release 16. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/16.06.00_60/ts_138211v160600p.pdf (дата обращения 02.10.2024)
11. Пассивная когерентная радиолокация / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев и др. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. 163 с.
12. Griffiths H. D., Baker C. J. An introduction to passive radar. London: Artech House, 2017. 215 p.
13. Farhang-Boroujeny B. Adaptive filters theory and applications. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2013. 802 p.
14. Nascimento V. H., Silva M. T. M. Chapter 12. Adaptive Filters // Academic Press Library in Signal Processing. 2014. Vol. 1. P. 619–761. doi: 10.1016/B978-0-12-396502-8.00012-7

15. 3GPP TR 38.901 ver. 16.1.0 Release 16. URL: 8901/16.01.00_60/tr_138901v160100p.pdf (дата обращения 02.10.2024)
https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/13

Информация об авторах

Нгуен Ван Туан – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2021), аспирант Вьетнамского государственного технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация; полуактивная радиолокация.

Адрес: Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236, район Бак Ты Лиам, Ханой, Вьетнам

E-mail: hinhthien08@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5652-6111>

Кутузов Владимир Михайлович – доктор технических наук (1997), профессор (1998), профессор кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), президент университета. Автор более 270 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vmkutuzov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3438-1361>

Воробьев Евгений Николаевич – кандидат технических наук (2022), доцент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), старший научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – полуактивная радиолокация; радиолокационное распознавание.

Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: envorobev@etu.ru

<http://orcid.org/0000-0001-6637-2374>

References

1. He Z., Yang Y., Chen W., Weng D. Range Resolution Improvement of GNSS-Based Passive Radar via Incremental Wiener Filter. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Let.* 2022, vol. 19, art. no. 4020005, pp. 1–5. doi: 10.1109/LGRS.2021.3130062

2. Gómez-del-Hoyo P.-J., Jarabo-Amores M.-P., Mata-Moya D., del-Rey-Maestre N., Rosa-Zurera M. DVB-T Receiver Independent of Channel Allocation, With Frequency Offset Compensation for Improving Resolution in Low Cost Passive Radar. *IEEE Sensors J.* 2020, vol. 20, no. 24, pp. 14958–14974. doi: 10.1109/JSEN.2020.3011129

3. Martelli T., Cabrera O., Colone F., Lombardo P. Exploitation of Long Coherent Integration Times to Improve Drone Detection in DVB-S based Passive Radar. *IEEE Radar Conf. (RadarConf20)*, Florence, Italy, 21–25 Sept. 2020. IEEE, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/RadarConf2043947.2020.9266624

4. Gomez-Del-Hoyo P., Gronowski K., Samczynski P. The STARLINK-Based Passive Radar: Preliminary Study and First Illuminator Signal Measurements. 23rd Intern. Radar Symp. (IRS), Gdansk, Poland, 12–14 Sept. 2022. IEEE, 2022, pp. 350–355. doi: 10.23919/IRS54158.2022.9905046

5. Blázquez-García R., Ummenhofer M., Cristallini D., O'Hagan D. Passive Radar Architecture based on Broadband LEO Communication Satellite Constellations. *IEEE Radar Conf.*, New York, USA, 21–25 March 2022. IEEE, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/RadarConf2248738.2022.9764342

6. Rai P. K., Kumar A., Khan M. Z. A., Cenkeramaddi L. R. LTE-Based Passive Radars and Applications: A Review. *Intern. J. of Remote Sensing.*

2021, vol. 42, iss. 19, pp. 7489–7518. doi: 10.1080/01431161.2021.1959669

7. Blázquez-García R., Hauschild T., Markiton P., Ummenhofer M., Seidel V., Cristallini D. Passive Radar Imaging Based on Multistatic Combination of Starlink and OneWeb Illumination. *IEEE Radar Conf. (RadarConf24)*, Denver, USA, 06–10 May 2024. IEEE, 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/RadarConf2458775.2024.10548646

8. Kutuzov V. M., Veremyev V. I., Nguyen Van Tuan, Vorobev E. N. Feasibility Study of Using 5G Signals for Illumination Purposes in Passive Radar. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics.* 2024, vol. 27, no. 1, pp. 67–78. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-67-78 (In Russ.)

9. 3GPP TS 38.104 ver. 16.6.0 Release 16. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/16.06.00_60/ts_138104v160600p.pdf (accessed 02.10.2024)

10. 3GPP TS 38.211 ver. 16.6.0 Release 16. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/16.06.00_60/ts_138211v160600p.pdf (accessed 02.10.2024)

11. Barkhatov A. V., Veremyev V. I., Vorobev E. N., Kononov A. A., Kovalev D. A., Kutuzov V. M., Mikhailov V. N. *Passivnaya kogerentnaya radiolokaciya* [Passive Coherent Radar]. St Petersburg, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2016, 163 p. (In Russ.)

12. Griffiths H. D., Baker C. J. *An Introduction to Passive Radar*. London, Artech House, 2017, 215 p.

13. Farhang-Boroujeny B. *Adaptive filters theory and applications*. Chichester, West Sussex, United Kingdom, John Wiley & Sons, 2013, 802 p.

14. Nascimento V. H., Silva M. T. M. Chapter 12. Adaptive Filters. Academic Press Library in Signal Processing. 2014, vol. 1, pp. 619–761. doi: 10.1016/B978-0-12-396502-8.00012-7

15. 3GPP TR 38.901 ver. 16.1.0 Release 16. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/16.01.00_60/tr_138901v160100p.pdf (accessed 02.10.2024)

Information about the authors

Nguyen Van Tuan, Specialist in Specialty "Radioelectronic systems and complexes" (2021), postgraduate student of Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). The author of 3 scientific publications. Area of expertise: radiolocation; semi-active radar.

Address: Le Quy Don Technical University, 236, Hoang Quoc Viet St., Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam

E-mail: hinhthien08@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5652-6111>

Vladimir M. Kutuzov, Dr Sci. (Eng.) (1997), Professor (1998) of the Department of Radio Engineering Systems, President of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 270 scientific publications. Area of expertise: radiolocation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., Saint Petersburg 197022, Russia

E-mail: vmkutuzov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3438-1361>

Evgenii N. Vorobev, Cand. Sci. (Eng.) (2022), Associate Professor of the Department of Radio Engineering Systems, Senior Researcher at the Research Institute "Prognoz" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: passive radar, recognition of radar targets.

Address: Research Institute "Prognoz", 5 F, Professor Popov St., Saint Petersburg 197022, Russia

E-mail: envorobev@etu.ru

<http://orcid.org/0000-0001-6637-2374>
