

## Результаты эксперимента бистатической радиолокации на базе OFDM-сигнала синхронизации 5G

Нгуен Ван Туан ✉

Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куи Дона, Ханой, Вьетнам

✉ [hinhthien08@gmail.com](mailto:hinhthien08@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** Ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM) стало популярной схемой широкополосной цифровой связи. Результаты исследований применения новых телекоммуникационных сигналов, в том числе сигналов, синтезированных на основе стандарта 5G, для использования в бистатической радиолокации показывают возможность обеспечения высокого разрешения по дальности и скорости. В отличие, например, от сигнала цифрового видеовещания на земле (DVB-T), передача 5G зависит от спроса пользователей. При отсутствии активных пользователей сигнал нисходящей линии 5G включает в себя только блок сигнала синхронизации (SSB), который присутствует постоянно. Исследование возможности применения блока синхронизации 5G в бистатической радиолокации, позволяющего осуществлять радиолокационный мониторинг на территориях, где использование 5G среди населения еще не получило достаточного развития, является на сегодняшний день актуальной задачей.

**Цель работы.** Анализ сигнала синхронизации 5G, моделирование процесса обработки сигналов в бистатической РЛС и оценка результатов экспериментальных исследований.

**Материалы и методы.** В процессе исследования использовались основы теории обработки сигналов в бистатической РЛС, стандарт и структура блок-сигнала синхронизации 5G, сравнительный анализ. Расчет взаимной функции неопределенности бистатической РЛС проведен с помощью компьютерного моделирования в среде MATLAB и экспериментальных исследований в реальной обстановке. В качестве объекта наблюдения был использован легковой автомобиль (Hyundai ix35). Прием и запись сигналов осуществлялись с помощью платформы Ettus USRP B210 SDR.

**Результаты.** Проведены моделирование и экспериментальные исследования в зоне покрытия сигналом 5G, результаты которых показывают, что бистатическая РЛС с использованием блока сигнала синхронизации 5G способна обнаруживать движущиеся цели.

**Заключение.** Блок сигнала синхронизации 5G позволяет получить удовлетворительные результаты при определении дальности, но возникают трудности с однозначным измерением скорости. В дальнейшем для устранения неоднозначности при измерении скорости предполагается использовать двухэтапный сигнал, синтезированный на основе OFDM, с различным периодом повторения синхросигналов с последующей мультипликативной обработкой. Бистатическая РЛС на основе SSB 5G может стать одной из подсистем мониторинга транспортных средств.

**Ключевые слова:** взаимная функция неопределенности, бистатическая радиолокация, пассивный когерентный радиолокатор, SSB 5G, сеть 5G

**Для цитирования:** Нгуен Ван Туан. Результаты эксперимента бистатической радиолокации на базе OFDM-сигнала синхронизации 5G // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 1. С. 116–125. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-1-116-125

---

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

Статья поступила в редакцию 18.12.2024; принята к публикации после рецензирования 18.01.2025; опубликована онлайн 28.02.2025

---

## Experimental Results on Bistatic Radar Based on 5G OFDM Synchronization Signal

Nguyen Van Tuan<sup>✉</sup>

Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

<sup>✉</sup> hinhthien08@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) has become a popular wideband digital communication scheme. Research studies into the use of new telecommunication signals, including those synthesized based on the 5G standard, in bistatic radar indicate the possibility of providing high resolution in terms of range and speed. In comparison with, e.g., a digital video broadcasting signal on the ground (DVB-T), 5G transmission depends on the user demand. In the absence of active users, the 5G downlink signal includes only the synchronization signal block (SSB), which is constantly present. Research into the possibility of using the 5G synchronization block in bistatic radar represents a relevant task, enabling radar monitoring in areas where the use of 5G has not yet been sufficiently developed among the population.

**Aim.** Analysis of 5G synchronization signal, simulation of signal processing in bistatic radar, and conducting analysis of experimental results.

**Materials and methods.** The research was conducted using the theory of signal processing in bistatic radar, the standard and structure of the 5G synchronization block signal, and comparative analysis. The cross-ambiguity function of bistatic radar was calculated by computer simulation in MATLAB and by experimental studies. A passenger car (Hyundai ix35) was used as the object of observation. Signals were received and recorded using the Ettus USRP B210 SDR platform.

**Results.** Simulation and experimental studies were conducted in the 5G signal coverage area. The results obtained show that a bistatic radar system based on the 5G synchronization signal block is capable of detecting moving targets.

**Conclusion.** The 5G synchronization signal block produces satisfactory results when determining the range. At the same time, the speed cannot be measured precisely. In order to eliminate the ambiguity when measuring the speed, we propose to use a two-stage signal synthesized based on OFDM, with different repetition periods of synchronization signals and subsequent multiplicative processing. A bistatic radar system based on SSB 5G can become one of the subsystems for monitoring vehicles.

**Keywords:** cross-ambiguity function, bistatic radar, passive coherent radar, SSB 5G, 5G network

**For citation:** Nguyen Van Tuan. Experimental Results on Bistatic Radar Based on 5G OFDM Synchronization Signal. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 1, pp. 116–125. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-1-116-125

**Conflict of interest.** The author declares no conflicts of interest.

Submitted 18.12.2024; accepted 18.01.2024; published online 28.02.2025

**Введение.** В настоящее время многие цифровые сигналы связи, используемые в цифровом аудиовещании (DAB), цифровом видеовещании на земле (DVB-T), цифровом радио, Wi-Fi, глобальной системе мобильной связи (GSM) и 4G, синтезируются с помощью модуляции с ортогональным частотным разделением (OFDM) с циклическим префиксом (CP-OFDM). Сигналы формата OFDM также можно использовать в бистатической ра-

диолокационной системе (РЛС) благодаря их способности гибко занимать доступные спектральные ресурсы и легко преодолевать эффекты частотно-избирательного распространения [1–5]. Также представляет исследовательский интерес разработка и применение интеграции технологии мобильной связи пятого поколения (5G) с использованием OFDM-сигналов 5G в бистатической РЛС для обнаружения целей.

В бистатической РЛС на основе CP-OFDM информация о цели обычно оценивается с помощью вычисления взаимной функции неопределенности (ВФН) сигналов канала наблюдения и опорного канала. Однако из-за особенностей среды распространения нежелательный прямой сигнал и многолучевое распространение в бистатической РЛС могут привести к маскировке целей [6, 7]. Таким образом, подавление помех становится основным этапом при обнаружении целей и оценке их параметров при обработке сигналов. Для этого используется адаптивная фильтрация, при которой восстановление опорного сигнала в прямом канале является обязательным этапом.

В состав нисходящей линии 5G входит много сигналов и каналов, но блок синхронизации является единственным постоянно включенным сигналом в сети 5G [8]. Блок синхронизации отправляется в 5G базовой станцией независимо от того, присутствует ли сброс пользователя или нет. Он содержит широкополосный канал, который должен быть обнаружен во всей зоне покрытия соты. Когда база станции 5G осуществляет формирование луча, отправляется несколько блоков синхронизации. Каждый из них является сигналом, специфичным для конкретного луча. Таким образом, можно реализовать бистатическую РЛС, используя импульсы сигнала синхронизации 5G, что делает радиолокационную систему на основе 5G надежной и способной работать без пауз.

В данной статье рассмотрена структура сигнала синхронизации 5G; выполнено моделирование; проведены экспериментальные исследования и анализ их результатов.

**Блок сигнала синхронизации.** На стороне приемника перед извлечением информативных сигналов полученный сигнал 5G должен быть преобразован в структуру кадра. Для этого должно быть известно время начала кадра. Для предоставления времени начала кадра базовая станция 5G транслирует сигналы синхронизации (Synchronization Signal – SS) с заранее заданным сопоставлением символов в кадре 5G. SS включает в себя два опорных сигнала: первичный сигнал синхронизации (Primary Synchronization Signal – PSS) и вторичный сигнал синхронизации (Secondary Synchronization Signal – SSS), которые обеспечивают синхрониза-

цию символов и кадров соответственно. Как только известно время начала кадра, циклические префиксы могут быть удалены и выполняется быстрое преобразование Фурье (FFT) для построения символов OFDM в кадре. SS, физический канал вещания (Physical Broadcast Channel – PBCH) и связанный с ним опорный сигнал демодуляции (Demodulation Reference signal – DM-RS) передаются в одном и том же блоке из 4 символов, называемом блоком сигнала синхронизации (SSB). SSB состоит из 240 интервалов поднесущих (20 ресурсных блоков) и четырех последовательных символов OFDM. В SSB поднесущие символы пронумерованы в порядке возрастания от 0 до 239. PSS и SSS расположены на 56–182 поднесущих первого и третьего символов. PBCH расположен на 2-м и 4-м символах OFDM SSB и занимает 96 поднесущих на третьем символе вместе с SSS. PBCH смешаны с PBCH-DM-RS, положение PBCH-DM-RS меняется в зависимости от физической идентификации соты  $N_{ID}^{cell}$  и идентификатора SSB/луча  $i_{SSB}$ .

На рис. 1 показана временная и частотная структура SSB и соответствующие символы

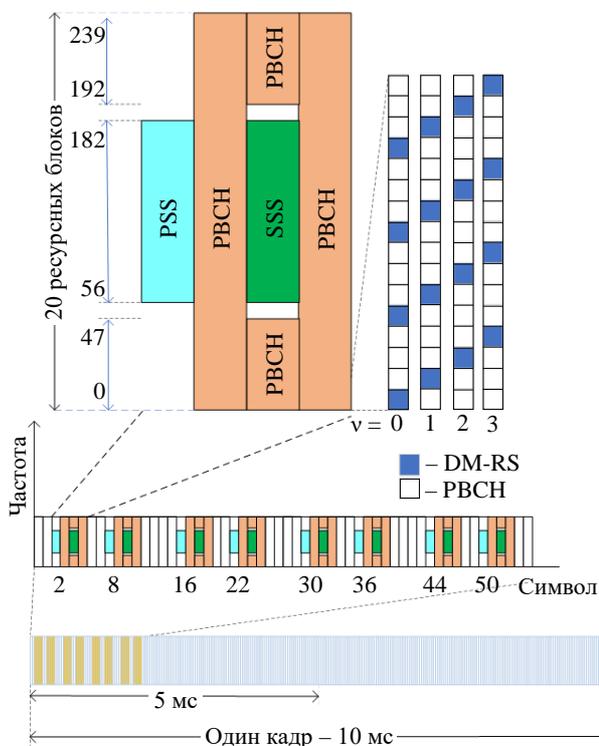


Рис. 1. Временная и частотная структура SSB

Fig. 1. Time and frequency structure of SSB

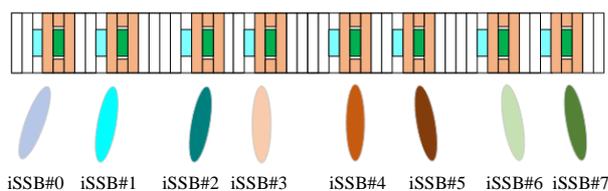


Рис. 2. Развертка луча 5G в случае C

Fig. 2. 5G beam sweeping in Case C

OFDM. SSB передается через каждые два кадра, каждый набор этих переданных блоков называется пакетом SSB. Пакет SSB должен быть ограничен окном полукадра (5 мс), и максимальное количество SSB в наборе составляет: 4 – для диапазона частот до 3 ГГц; 8 – для диапазона 3...6 ГГц; 64 – для диапазона 6...52.6 ГГц.

Каждый блок в пакете SSB передается в различных направлениях (рис. 2). Временное местоположение SSB и размер пакета SSB в кадре зависят от частоты передачи и нумерологии. В технической спецификации 3GPP определяют пять различных случаев (A, B, C, D, E) для восьми возможных конфигураций [9].

Первичные и вторичные сигналы синхронизации позволяют определить  $N_{ID}^{cell}$ . Для 5G сигнал может принимать 1008 различных значений и задается комбинацией индекса группы идентификации соты  $N_{ID}^1 \in \{0, 1, \dots, 335\}$  и идентификатором физического уровня внутри группы идентификации соты  $N_{ID}^2 \in \{0, 1, 2\}$ :

$$N_{ID}^{cell} = 3N_{ID}^1 + N_{ID}^2.$$

Первичный сигнал синхронизации 5G состоит из одной из трех групп  $M$ -последовательностей длиной 127 символов, которая распределяется по 127 поднесущим первого символа в каждом SSB.

Последовательность PSS генерируется  $M$ -последовательностью длиной 127, которая определяется следующим образом:

$$s_{PSS}(n) = 1 - 2x(m);$$

$$m = (n + 43N_{ID}^2) \bmod 127, \quad 0 \leq n < 127;$$

$$x(i + 7) = [x(i + 4) + x(i)] \bmod 2,$$

где  $x(m)$  –  $M$ -последовательность, 7 первых значений которой инициализируются как

$$[x(6) \ x(5) \ x(4) \ x(3) \ x(2) \ x(1) \ x(0)] = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0].$$

Определение вторичного сигнала синхронизации основано на идентификаторе группы соты  $N_{ID}^1$ . Последовательность SSS генерируется  $M$ -последовательностью длиной 127, полученной путем объединения двух  $M$ -последовательностей следующим образом:

$$s_{SSS}(n) = [1 - 2x_0(n + m_0) \bmod 127] \times [1 - 2x_1((n + m_1) \bmod 127)];$$

$$m_0 = 15 \left\lfloor \frac{N_{ID}^1}{112} \right\rfloor + 5N_{ID}^2; \quad m_1 = N_{ID}^1 \bmod 112;$$

$$0 \leq n < 127;$$

$$x_0(i + 7) = [x_0(i + 4) + x_0(i)] \bmod 2;$$

$$x_1(i + 7) = [x_1(i + 4) + x_1(i)] \bmod 2,$$

где 7 первых значений последовательности  $x_0(m)$  и  $x_1(m)$  инициализируются как

$$[x_0(6) \ x_0(5) \ x_0(4) \ x_0(3) \ x_0(2) \ x_0(1) \ x_0(0)] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$[x_1(6) \ x_1(5) \ x_1(4) \ x_1(3) \ x_1(2) \ x_1(1) \ x_1(0)] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

РВСН – это физический канал, который используется для передачи системной информации, необходимой для установления соединения между базой станции 5G и пользовательским устройством [10]. Сигнал DM-RS, связанный с РВСН, используется для целей декодирования и оценки частотной характеристики канала. Генерация и декодирование РВСН подробно описаны в [11].

**Этапы восстановления SSB.** Для осуществления адаптивной фильтрации необходимо реализовать процедуру восстановления сигналов SSB. Первым шагом в синхронизации нисходящей линии связи является поиск соты. Пользовательское устройство ищет PSS и SSS в SSB в соответствии с определенной полосой частот, соответствующей номеру глобального канала синхронизации (Global Synchronization Raster Channel – GSCN) [12]. В России 5G-сигнал работает в диапазоне n79 (4400...5000 МГц) и положение частоты блока сигнала синхронизации в данном диапазоне определяется следующим образом:

Табл. 1. Характеристики для SSB в России  
 Tab. 1. Characteristics for SSB in Russia

Диапазон	Интервал поднесущих, кГц	Вид SSB	Диапазон GSCN (первый <шаг> последний)
n79	30	Case C	8480 <16> 8880



Рис. 3. Процедура восстановления SSB 5G

Fig. 3. SSB 5G Recovery Procedure

$$f_{SSB} = 3000 + N \times 1.44 \text{ МГц};$$

$$GSCN = 7499 + N.$$

В табл. 1 представлены основные характеристики для SSB в России.

На рис. 3 приведены основные этапы процедуры поиска соты в системе 5G NR. Приблизительное местоположение PSS определяется на основе полученного сигнала с понижением частоты. Эта процедура называется процедурой

грубой синхронизации, а грубое местоположение обнаруженного PSS называется точкой грубой синхронизации. После грубой синхронизации можно выполнить оценку и коррекцию грубого смещения частоты, используя существующую информацию в грубой синхронизации, чтобы повысить точность процесса синхронизации на следующем этапе.

На основе точки грубой синхронизации процедура определения точного положения PSS после коррекции грубого смещения частоты называется процедурой точной синхронизации, а обнаруженное положение называется точкой точной синхронизации.

После декодирования PSS можно определить  $N_{ID}^2$ . Затем можно декодировать SSS и получить  $N_{ID}^1$ . После обнаружения  $N_{ID}^{cell}$  можно определить положение DM-RS в частотной области PBCH и номер луча. После обнаружения DM-RS на основе предполагаемой частотной характеристики канала с DM-RS можно декодировать PBCH. После успешного декодирования PBCH процедура поиска соты завершается.

**Моделирование бистатической РЛС на базе SSB 5G.** В данной статье рассмотрен сценарий работы сети 5G при отсутствии передачи данных пользователю по нисходящему каналу для анализа возможностей обнаружения целей бистатической РЛС на базе SSB 5G. Процесс обработки сигнала в приемной позиции показан на рис. 4.

На приемной позиции для определения бистатической дальности и скорости цели вычисляется ВФН сигналов в каналах наблюдения и прямого пути

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

где  $s_{наб}(t)$  – сигнал в канале наблюдения;



Рис. 4. Блок-схема процесса обнаружения цели

Fig. 4. Block diagram of the target detection process

Табл. 2. Параметры для моделирования SSB 5G

Tab. 2. Parameters for 5G SSB modeling

Параметр	Значение
Каналы и сигналы	PSS, SSS, PBCH, PBCH-DM-RS
Физическая идентификация:	
соты $N_{ID}^{cell}$	483
идентификатора SSB/луча iSSB	iSSB#0
Центральная частота, МГц	4850.4
Ширина полосы пропускания ( $\Delta f_0$ ), МГц	7.68
Интервал поднесущих, кГц	30
Время накопления ( $T_c$ ), мс	100
Частота дискретизации, МГц	15.36
Период повторения ( $T_b$ ), мс	20
Отношение сигнал/шум в канале наблюдения, дБ	50
Отношение сигнал/шум в опорном канале, дБ	50

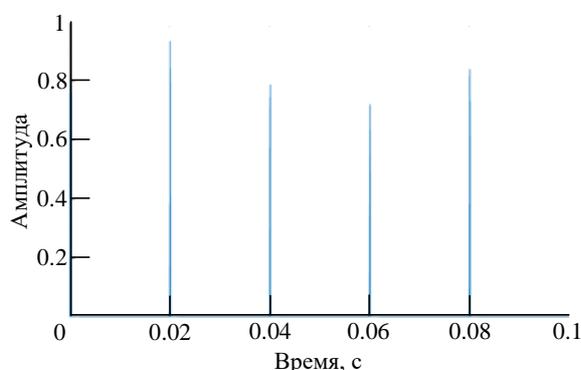


Рис. 5. Первый SSB 5G во временной области

Fig. 5. The first SSB of 5G in the time domain

$s_{\text{прям}}(t)$  – сигнал прямой трассы; \* – операция комплексного сопряжения;  $\tau$  – время задержки;  $f_d$  – доплеровский сдвиг цели.

SSB отправляется 5G базовой станцией независимо от того, присутствует ли сброс связи с пользователем или нет. SSB – единственный постоянно активный сигнал в сети 5G. Технические параметры для моделирования SSB 5G приведены в табл. 2.

На рис. 5 представлен сигнал первого пакета SSB 5G во временной области.

SSB 5G занимает 4 символа OFDM с короткой длительностью  $\tau_{\text{SSB}} = 0.1428$  мс, соответственно, главный лепесток имеет ширину  $\Delta f_{\text{ГЛ}} = \frac{2}{\tau_{\text{SSB}}} = 14$  кГц (рис. 6). Ложные пики повторяются с интервалом бистатической скорости  $f_d = \frac{1}{T_b} = 50$  Гц. Следовательно, уровни

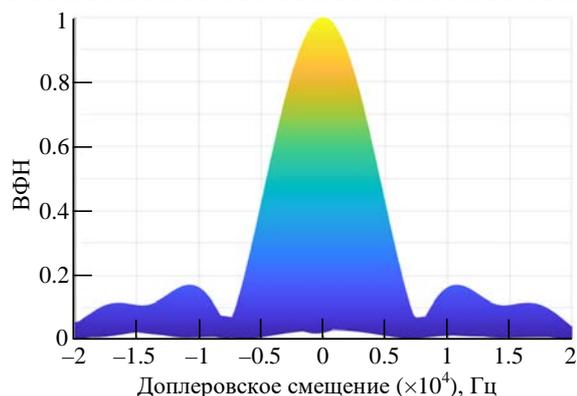


Рис. 6. Сечение ВФН SSB 5G (нулевая задержка)

Fig. 6. Ambiguity function of SSB 5G (zero delay)

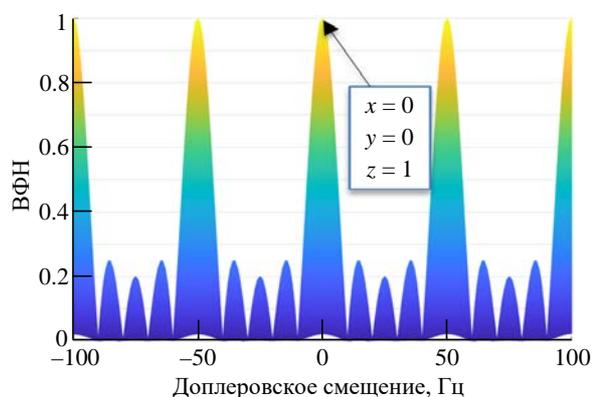


Рис. 7. Сечение ВФН SSB 5G (нулевая задержка) в интервале  $[-100, 100]$  Гц

Fig. 7. Ambiguity function of SSB 5G (zero delay) in the interval  $[-100, 100]$  Hz

ВФН, относящиеся к цели, и ложных пиков близки друг к другу, что затрудняет однозначное обнаружение цели (рис. 7).

Модель канала при моделировании многолучевого сценария в бистатической РЛС описана в [13]. В сценарии моделирования использовались следующие параметры: сигнал от цели с амплитудой, равной  $-30$  дБ по отношению к прямому сигналу; бистатическая дальность  $R_b = 120$  м; бистатическая скорость  $v_b = 20$  км/ч. Этот сценарий отражает реальные условия движения транспортного средства в городе.

На рис. 8 и 9 показаны результаты моделирования обработки сигнала SSB 5G. Видно, что ВФН демонстрирует худший результат по сравнению со сценариями в [14]. На рис. 8 сложно отличить пик цели от ложных пиков. В сечении со значением  $\chi \in (0.999, 1)$  разница становится более очевидной (рис. 9). Обработ-

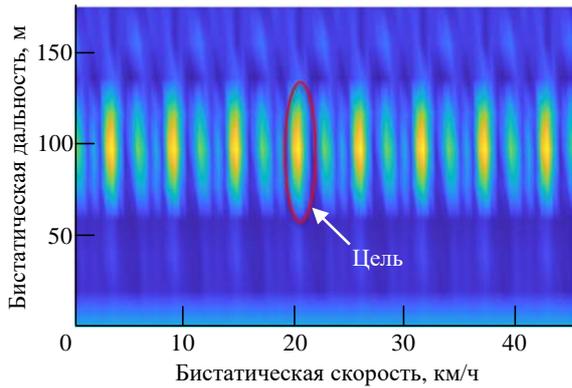


Рис. 8. ВФН SSB 5G после адаптивной фильтрации  
 Fig. 8. CAF SSB 5G after adaptive filtering

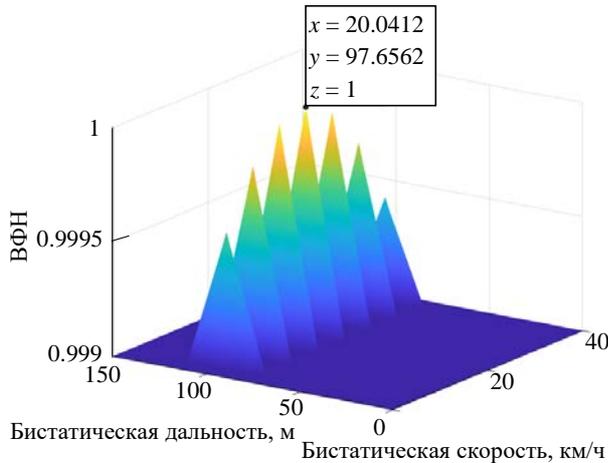


Рис. 9. 3D ВФН SSB 5G на  $\chi \in (0.999, 1)$   
 Fig. 9. 3D CAF of SSB 5G on  $\chi \in (0.999, 1)$

ка на основе SSB позволяет обнаруживать цели в отсутствие сигнала нисходящей линии связи.

**Результаты эксперимента.** Схема измерения и разработанная схема макета бистатической РЛС изображены на рис. 10. Сигнал был записан с помощью платформы Ettus USRP B210 SDR. Хранение данных осуществлялось с использованием компьютера с процессором Intel Core i5-8300H 2.30 ГГц, 16 Гб оперативной памяти и SSD-накопителем. Сценарий измерения представлен на рис. 11. Объектом наблюдения являлся автомобиль (Hyundai ix35), движущийся в зоне парковки. Расстояние от приемной позиции до автомобиля 30 м, максимальная скорость автомобиля не более 40 км/ч. Автомобиль двигался с ускорением в направлении приемной позиции.

Изменение скорости за время  $T_i$  равно

$$\Delta v = aT_i,$$

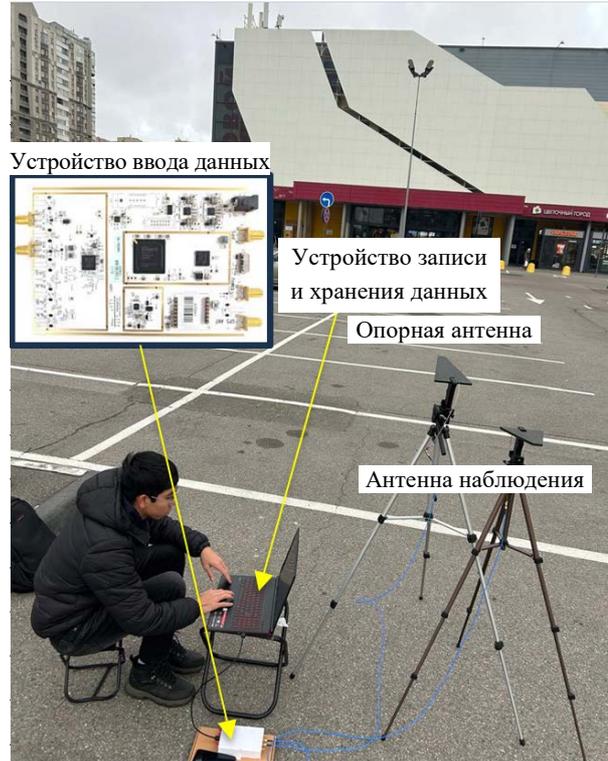


Рис. 10. Приемная позиция  
 Fig. 10. Receiving position



Рис. 11. Сценарий измерений  
 Fig. 11. Measurement scenario

где  $a$  – ускорение автомобиля.

С течением времени доплеровский сдвиг непрерывно меняется из-за ускорения, поэтому, если время накопления сигнала слишком велико, это приведет к искажениям результатов обработки сигнала. Для корректного расчета ВФН время накопления должно удовлетворять условию [15]

$$T_c < \sqrt{\frac{\lambda}{a}},$$

где  $\lambda$  – длина волны.

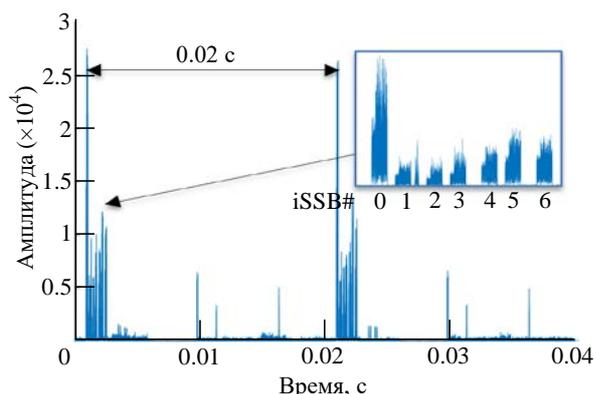


Рис. 12. SSB 5G в опорном канале на отрезке времени 0...0.04 с

Fig. 12. SSB 5G on the reference channel in the time interval 0...0.04 s

В зоне покрытия сигнал SSB 5G имеет значения физической идентификации соты  $N_{ID}^{cell} = 421$  и идентификатора SSB/луча  $iSSB = 0$ .

Прием сигнал осуществлялся в течение 1 с. На рис. 12 показан сигнал SSB 5G в опорном канале на отрезке времени 0...0.04 с. Принимаемый сигнал SSB 5G имеет центральную частоту

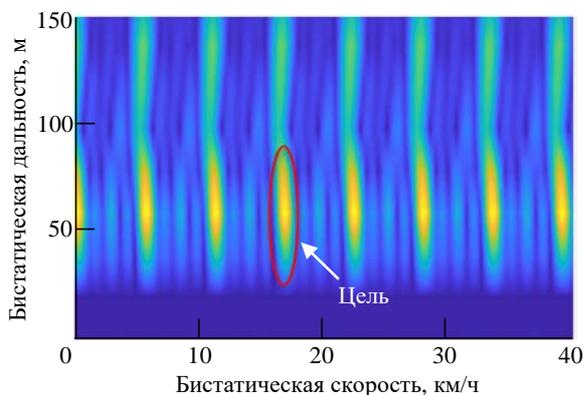


Рис. 13. ВФН на отрезке времени 0...0.1 с

Fig. 13. CAF in the time interval of 0...0.1 s

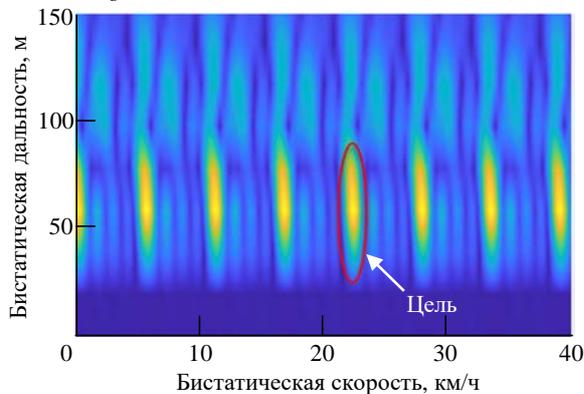


Рис. 14. ВФН на отрезке времени 0.5...0.6 с

Fig. 14. CAF in the time interval of 0.5...0.6 s

4849.83 МГц;  $T_b = 20$  мс;  $\Delta f_0 = 7.68$  МГц. Наилучшее разрешение по дальности составляет 19.531 м ( $\Delta R = c/(2\Delta f_0)$ ).

По техническим характеристикам среднее ускорение автомобиля Hyundai ix35 составляет от 2.5 до 3 м/с<sup>2</sup>. При обработке время накопления сигнала  $T_c < \sqrt{\frac{\lambda}{a}}$  ( $\approx 0.146$  с).

На рис. 13 и 14 показаны ВФН на отрезках времени 0...0.1 с и 0.5...0.6 с.

По результатам моделирования, представленным на рис. 13 и 14, сложно отличится пик, относящийся к цели, от ложных пиков. Бистатическая дальность на отрезке времени (0, 0.1) и на отрезке времени (0.5, 0.6) одинакова. Из рис. 15 и 16 видно, что бистатическая скорость увеличивается на 5.5672 км/ч в течение 0.5 с (т. е.  $a \approx 3.0929$  м/с<sup>2</sup>). Это подтверждает, что бистатическая РЛС на базе SSB 5G способна обнаруживать цели.

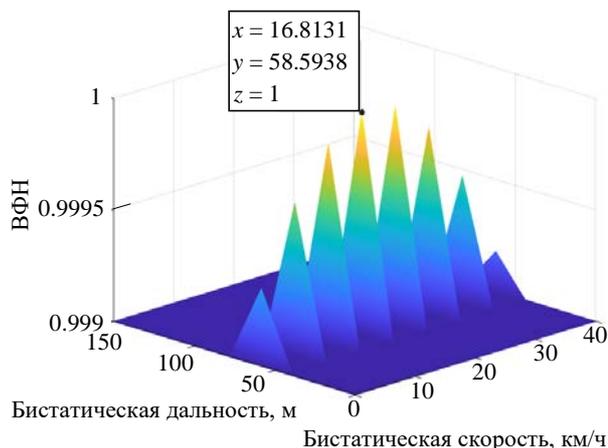


Рис. 15. 3D ВФН  $\chi \in (0.999, 1)$  на отрезке времени 0...0.1 с

Fig. 15. 3D CAF  $\chi \in (0.999, 1)$  in the time interval of 0...0.1 s

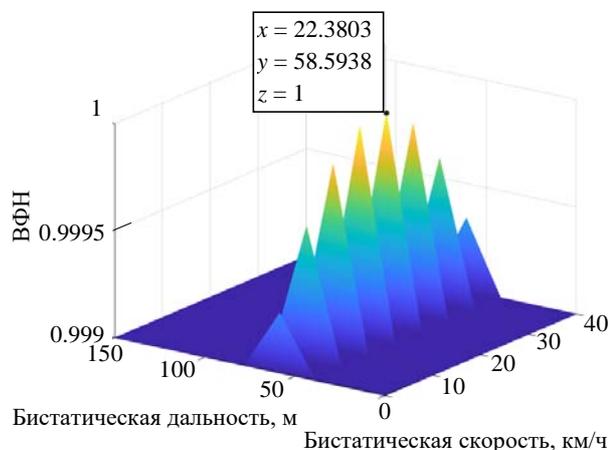


Рис. 16. 3D ВФН  $\chi \in (0.999, 1)$  на отрезке времени 0.5...0.6 с

Fig. 16. 3D CAF  $\chi \in (0.999, 1)$  in the time interval of 0.5...0.6 s

**Закключение.** В данной статье рассмотрены вопросы обнаружения целей в бистатической РЛС ближнего действия на базе SSB 5G.

В статье проведен анализ SSB 5G в диапазоне п79, утвержденном к использованию в России. Выполнено моделирование процесса обработки сигналов и проведены эксперимен-

тальные исследования в реальных условиях. Исследования показывают, что SSB 5G позволяет получить удовлетворительные результаты определения дальности до цели. Однако из-за относительно низкой частоты передачи импульсов синхронизации возникает трудность однозначного измерения скорости.

### Список литературы

1. Mazurek G. Signal conditioning for DAB-illuminated passive radar // Signal Processing Symp. (SPSympto), LODZ, Poland, 20–23 Sept. 2021. IEEE, 2021. P. 193–196. doi: 10.1109/SPSympto51155.2020.9593458

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. Sun H., Chia L. G., Razul S. G. Through-Wall Human Sensing with Wi-Fi Passive Radar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2021. Vol. 57, № 4. P. 2135–2148. doi: 10.1109/TAES.2021.3069767

4. 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

5. 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

6. Пассивная когерентная радиолокация / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев, А. А. Коновалов, Д. А. Ковалев, В. М. Кутузов, В. Н. Михайлов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. 163 с.

7. Griffiths H. D., Baker C. J. An introduction to passive radar. London: Artech House, 2017. 215 p.

8. 5G physical layer: Principles, Models and Technology Components / A. Zaidi, F. Athley, J. Medbo, U. Gstavsson, G. Durisi, X. Chen. Cambridge: Academic Press, 2018. 322 p.

doi: 10.1016/C2017-0-01973-0

9. 3GPP: 5G; NR; Physical layer procedures for control, ETSI TS 138 213 v15.15.0. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138200\\_138299/138213/15.15.00\\_60/ts\\_138213v151500p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138213/15.15.00_60/ts_138213v151500p.pdf) (дата обращения 15.01.2025)

10. 3GPP: 5G; NR; Radio Resource Control (RRC); protocol specification, ETSI TS 138 331 v15.15.0. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138300\\_138399/138331/15.15.00\\_60/ts\\_138331v151500p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138331/15.15.00_60/ts_138331v151500p.pdf) (дата обращения 02.02.2025)

11. 3GPP: Physical channels and modulation. 3GPP TS 38.211 version 18.2.0 Release 18. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138200\\_138299/138211/18.02.00\\_60/ts\\_138211v180200p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/18.02.00_60/ts_138211v180200p.pdf) (дата обращения 02.02.2025).

12. 3GPP: Base station (BS) radio transmission and reception, TS 38.104 URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138100\\_138199/138104/16.06.00\\_60/ts\\_138104v160600p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/16.06.00_60/ts_138104v160600p.pdf) (дата обращения 02.02.2025)

13. 3GPP TR 38.901 ver. 16.1.0 Release 16. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/138900\\_138999/138901/16.01.00\\_60/tr\\_138901v160100p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/16.01.00_60/tr_138901v160100p.pdf) (дата обращения 02.02.2025).

14. Нгуен В. Т., 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.

15. Abratkiewicz K., Malanowski M., Gajo Z. Target Acceleration Estimation in Active and Passive Radars // IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2023. Vol. 16. P. 9193–9206. doi: 10.1109/JSTARS.2023.3319829

### Информация об авторе

**Нгуен Ван Туан** – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2021), аспирант Вьетнамского государственного технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор четырех 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](mailto:hinhthien08@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-5652-6111>

### References

1. Mazurek G. Signal Conditioning for DAB-Illuminated Passive Radar. Signal Processing Symp. (SPSympto), LODZ, Poland, 20–23 Sept. 2021. IEEE, 2021, pp. 193–196.

(SPSympto), LODZ, Poland, 20–23 Sept. 2021. IEEE, 2021, pp. 193–196.

doi: 10.1109/SPSympto51155.2020.9593458

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. Sun H., Chia L. G., Razul S. G. Through-Wall Human Sensing with WiFi Passive Radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* 2021, vol. 57, no. 4, pp. 2135–2148.

doi: 10.1109/TAES.2021.3069767

4. 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

5. 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

6. Barkhatov A. V., Veremyev V. I., Vorobev E. N., Konovalov 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.)

7. Griffiths H. D., Baker C. J. An introduction to passive radar. London, Artech House, 2017, 215 p.

8. Zaidi A., Athley F., Medbo J., Gstavsson U., Durisi G., Chen X. 5G Physical Layer: Principles,

Models and Technology Components. Cambridge, Academic Press, 2018, 322 p.

doi: 10.1016/C2017-0-01973-0

9. 3GPP: 5G; NR; Physical layer procedures for control, ETSI TS 138 213 v15.15.0. Available at: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138200\\_138299/138213/15.15.00\\_60/ts\\_138213v151500p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138213/15.15.00_60/ts_138213v151500p.pdf) (accessed 15.01.2025)

10. 3GPP: 5G; NR; Radio Resource Control (RRC); protocol specification, ETSI TS 138 331 v15.15.0. Available at: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138300\\_138399/138331/15.15.00\\_60/ts\\_138331v151500p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138331/15.15.00_60/ts_138331v151500p.pdf) (accessed 02.02.2025)

11. 3GPP: Physical channels and modulation. 3GPP TS 38.211 version 18.2.0 Release 18. Available at: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138200\\_138299/138211/18.02.00\\_60/ts\\_138211v180200p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/18.02.00_60/ts_138211v180200p.pdf) (accessed 02.02.2025)

12. 3GPP: Base station (BS) radio transmission and reception, TS 38.104 Available at: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138100\\_138199/138104/16.06.00\\_60/ts\\_138104v160600p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/16.06.00_60/ts_138104v160600p.pdf) (accessed 02.02.2025)

13. 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](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/16.01.00_60/tr_138901v160100p.pdf) (accessed 02.02.2025)

14. Nguyen V. T., Kutuzov V. M., Vorobev E. N. Signal Processing in Passive Radar Systems Using 5G: A Simulation Study. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics.* 2024, vol. 27, no. 6, pp. 44–54. (In Russ.)

doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-44-54

15. Abratkiewicz K., Malanowski M., Gajo Z. Target Acceleration Estimation in Active and Passive Radars. *IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2023, vol. 16, pp. 9193–9206.

doi: 10.1109/JSTARS.2023.3319829

### Information about the author

**Nguyen Van Tuan**, Specialist in Specialty "Radioelectronic systems and complexes" (2021), postgraduate student of Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). The author of 4 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](mailto:hinhthien08@gmail.com)

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