

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ SDR-ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ ЗАДАЧ СЕТЕВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ:
РЕАЛИЗАЦИЯ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ И ПРИЕМА НАВИГАЦИОННЫХ
ДАННЫХ**

Г.А. Фокин, д.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. Бонч-Бруевича, grihafokin@gmail.com;

К.Е. Рютин, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. Бонч-Бруевича ryutin.sut@gmail.com.

УДК 621.396.969

Аннотация. В последние годы проблема развития технологии сетевого позиционирования в условиях отсутствия сигналов глобальной навигационной спутниковой системы стала весьма актуальной. В данной работе формализованы, программно реализованы и экспериментально апробированы процедуры сбора, кодирования, передачи, приема, обработки и визуализации собственных глобальных координат базовых станций.

Ключевые слова: позиционирование; программно-конфигурируемое радио; LTE; передача данных; экспериментальная апробация.

**SOFTWARE-DEFINED RADIO NETWORK POSITIONING TECHNOLOGY
DESIGN: IMPLEMENTATION OF THE NAVIGATION DATA
TRANSMISSION AND RECEIVING CHANNEL**

Grigoriy Fokin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. Bonch-Bruевич;

Konstantin Ryutin, St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. Bonch-Bruевич.

Annotation. The problem of developing network positioning technology in Global navigation satellite system denied environment, has become highly relevant in the past years. In the present study, the procedures for base stations own navigation data acquisition, coding, transmission, reception, processing and visualization are formalized, implemented in software and experimentally verified.

Keywords: positioning; software-defined radio; LTE; data transmission; experimental validation.

Введение

В последние годы возникновение научно-исследовательских инициатив в области развития технологии сетевого позиционирования с использованием программного-конфигурируемого радио (*SDR – Software-Defined Radio*) объясняется отсутствием полного покрытия сигналами глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) в условиях плотной городской застройки, где наиболее востребована услуга точного определения местоположения [1-10].

Разработанный лабораторией программного-конфигурируемого радио в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича прототип технологии определения местоположения пользовательского устройства (*UE – User Equipment*) в сети стандарта *LTE (Long-Term Evolution)* [11-17] использует разностно-дальномерный метод позиционирования *OTDOA (Observed Time Difference Of Arrival)* [18-20],

специфицированный в стандартах *LTE* [21] и *5G* [22]. Экспериментальная апробация разработанного прототипа доказала возможность достижения дециметровой точности определения местоположения *UE* с использованием метода *OTDOA* [16]. В отличие о стандартизированного подхода на основе измерений по опорным сигналам позиционирования (*PRS – Positioning Reference Signals*), разработанный и экспериментально апробированный прототип использует только сигналы первичной (*PSS – Primary Synchronization Signal*) и вторичной (*SSS – Secondary Synchronization Signals*) синхронизации, а также опорные сигналы сот (*CRS – Cell-specific Reference Signal*). Таким образом, реализованный подход позволяет решить задачу позиционирования без необходимости для *UE* становиться абонентом какого-либо мобильного оператора.

Для дальнейшей апробации разработанного прототипа технологии сетевого позиционирования в глобальной системе координат (СК) необходимо реализовать приемопередачу собственных глобальных координат *SDR*-макетов базовых станций (*eNB – eNodeB*) вместе с опорными сигналами, по которым *UE* выполняет измерения разностей дистанций. Это позволит *UE* преобразовать результаты оценки координат (ОК) из локальной в глобальную СК.

Решение данной задачи начинается с получения от ГНСС-приемника на стороне макета *eNB* глобальных координат в формате *NMEA (National Marine Electronics Association)* [23] и дальнейшего кодирования их в соответствии с универсальным форматом представления навигационной информации в *3GPP*-сетях (*GAD – Geographical Area Description*) [24]. Затем глобальные координаты в формате *GAD* должны быть переданы *eNB* вместе с опорными сигналами *CRS* и получены на стороне макета *UE*.

Материал данной статьи организован следующим образом: во втором разделе формализованы процедуры получения навигационных данных в формате *NMEA*, кодирования их в формат *GAD* и обработки в транспортном и физическом каналах *LTE*; в третьем разделе формализованы процедуры приема сигнала *LTE* из эфира, обработки его в физическом и транспортном каналах *LTE*, декодирования пакета *GAD* и отображения координат на карте в глобальной СК; в четвертом разделе приводится экспериментальная апробация разработанного приемопередатчика навигационных данных в лабораторных условиях.

Процедуры передачи навигационных данных

Перед кодированием и обработкой навигационных данных в каналах *LTE* они должны быть сначала получены ГНСС-приемником по протоколу *NMEA*, затем разобраны и закодированы в пакет данных, определенный форматом *GAD* [24].

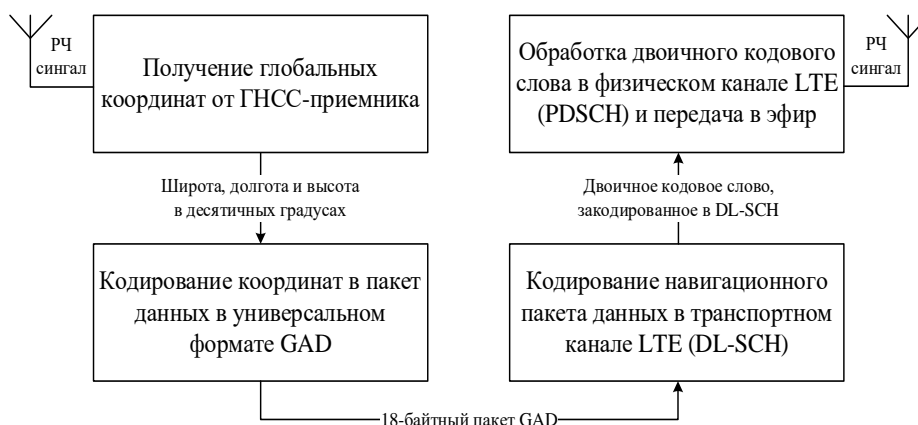


Рисунок 1

Далее пакет навигационных данных с координатами *eNB* кодируется в транспортном и обрабатывается в физических каналах *LTE*, модулируется и передается в эфир. Рисунок 1 иллюстрирует обобщенную последовательность процедур передачи навигационных данных. Ниже приводится подробное описание каждого блока процедур.

Процедуры приема и разбора данных *NMEA*

Получение глобальных координат *eNB* может быть выполнено с помощью любого ГНСС-приемника, который передает полученные данные через последовательный порт по протоколу *NMEA* [23]. Протокол *NMEA* поддерживает множество форматов представления навигационной информации, однако самым подходящим для решения поставленной задачи является формат *GGA*, который передает информацию о последнем зафиксированном местоположении ГНСС-приемника. В этом формате также присутствует флаг «*GPS Quality Indicator*», который сигнализирует о валидности полученных координат. Таким образом, при запуске программы происходит инициализация ГНСС-приемника через последовательный порт, затем запускается бесконечный цикл, условием окончания которого является получение *NMEA*-пакета в формате *GGA* с установленным флагом «*GPS Quality Indicator*». Далее происходит разбор полей полученного *NMEA*-пакета и преобразование координат в формат десятичных градусов. Полученные значения широты, долготы и высоты передаются в модуль кодирования в пакете *GAD*. Рисунок 2 иллюстрирует обобщенный алгоритм приема и разбора навигационных данных от ГНСС-приемника.

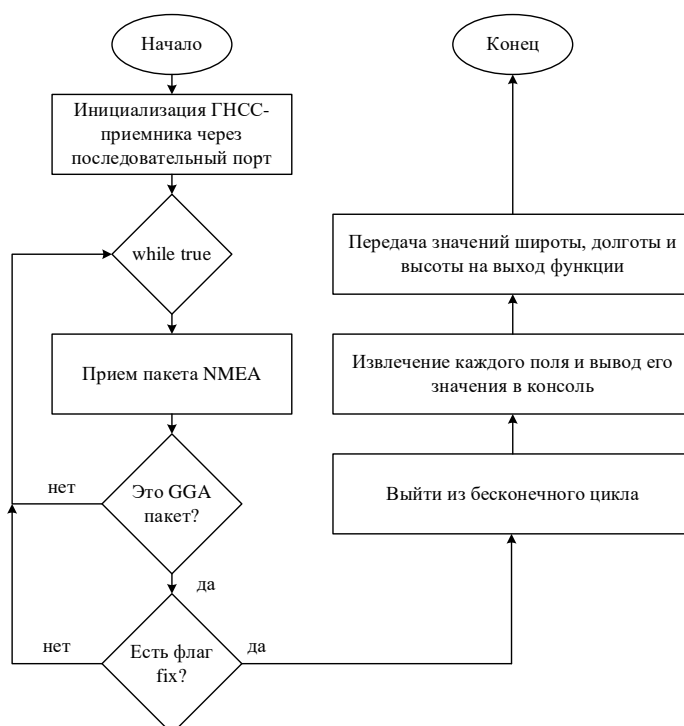


Рисунок 2

Процедуры кодирования навигационных данных в формат *GAD*

Широкий спектр сценариев позиционирования в сетях стандартов *LTE* и *5G*, а также неоднородность линий положения различных методов ОК, основанных на измерениях дальностей, разностей дальностей и углов прихода сигналов, обуславливают необходимость корректного представления и преобразования

форматов ОК. Спецификация 3GPP TS 23.032 [24] определяет правила кодирования, представления и преобразования форматов ОК для различных технологий сетевого позиционирования. Для кодирования навигационных данных в пакет *GAD* используется формат точки эллипсоида высокой точности с высотой и эллипсоидом неопределенности (*High Accuracy Ellipsoid point with altitude and uncertainty ellipsoid*). Формирование пакета данных в этом формате описано в [24].

Процедуры кодирования в транспортном канале *LTE*

После формирования пакета навигационных данных его необходимо закодировать и обработать на транспортном (*DL-SCH – DownLink Shared CHannel*) и физическом (*PDSCH – Physical Downlink Shared CHannel*) уровнях *LTE*, соответственно. Физический нисходящий разделяемый канал *PDSCH* используется для передачи нисходящего разделяемого канала *DL-SCH*. В свою очередь, *DL-SCH* – это транспортный канал, используемый для передачи нисходящих данных (транспортных блоков). В формировании пакета данных в транспортном канале *DL-SCH* участвуют следующие процедуры: 1) добавление контрольной суммы к исходному блоку данных; 2) сегментация блока данных, если он превышает максимальный размер, определенный спецификацией; 3) помехоустойчивое канальное турбо-кодирование; 4) согласование скорости; 5) объединение сегментированных блоков данных.

Рисунок 3 иллюстрирует диаграмму последовательности процедур кодирования пакета *GAD* в транспортном канале *DL-SCH*.

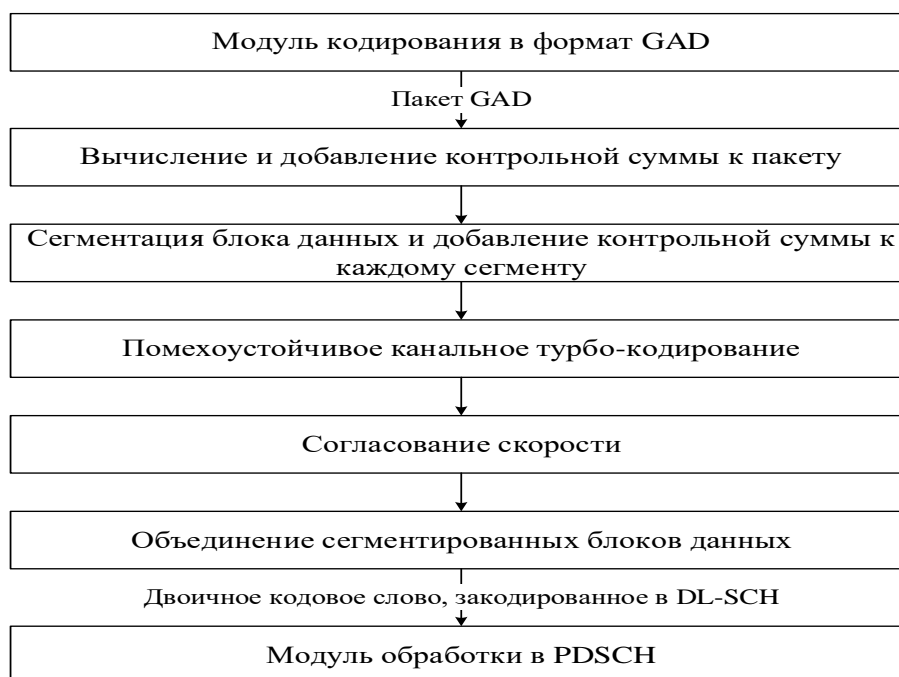


Рисунок 3

Процедуры обработки в физическом канале *LTE*

Обработка транспортного блока данных канала *DL-SCH* в физическом канале *PDSCH* выполняется согласно следующим процедурам: 1) скремблирование; 2) модуляция (формирование комплексных символов); 3) распределение комплексных символов одному уровню или нескольким

параллельным уровням; 4) прекодирование (преобразование информации в соответствии с алгоритмами *MIMO*).

Стандарт *LTE* позволяет обрабатывать более одного кодового слова параллельно. Рисунок 4 иллюстрирует диаграмму последовательности процедур обработки блока данных в физическом канале *PDSCH*.

После формирования комплексных модулированных символов их необходимо отобразить на частотно-временной ресурсной сетке *OFDM* (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) кадра. Во избежание ухудшения результатов работы корреляторов по *CRS*, для размещения на ресурсной сетке были выбраны индексы символов, в которых *CRS* не размещаются вовсе, а также размещение выполнялось в самой маленькой полосе – 1,4 МГц для гарантированного доступа к навигационной информации при работе в любой полосе. После размещения символов на ресурсной сетке формируется *OFDM*-сигнал во временном домене с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (*ОБПФ*). Далее происходит инициализация *SDR*-платформы и передача в эфир полученного *OFDM*-сигнала.

Рисунок 5 иллюстрирует диаграмму последовательности процедур формирования ресурсной сетки и передачи сигнала в эфир.

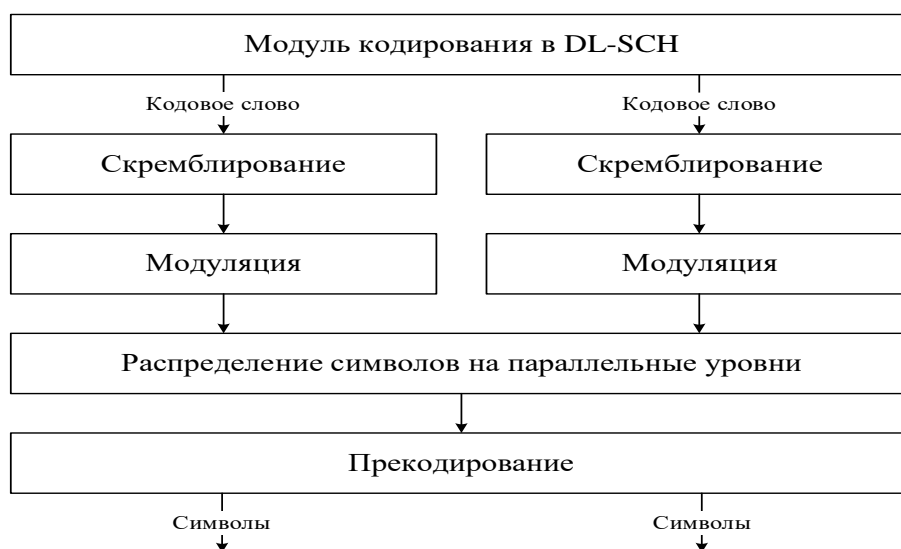


Рисунок 4

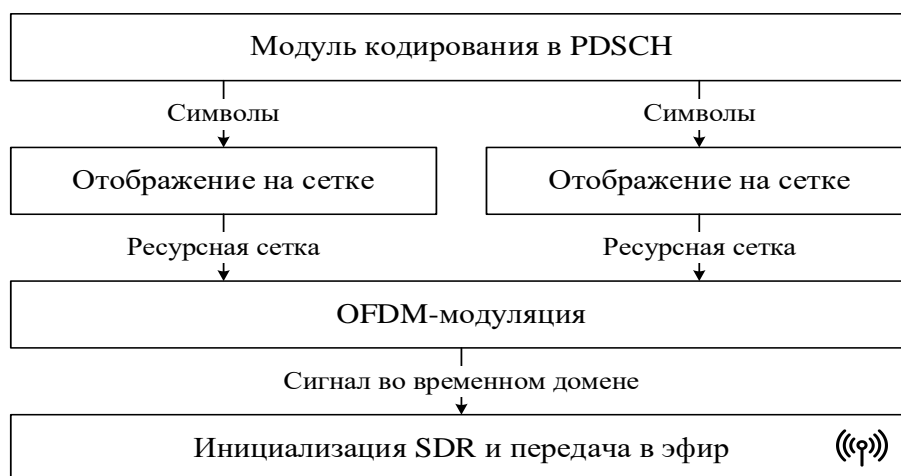


Рисунок 5

Процедуры приема навигационных данных

На приемной стороне выполняются обратные процедуры, из которых итоговой является вывод местоположения макета базовой станции *eNB* на карте в глобальной СК WGS-84.

Рисунок 6 иллюстрирует обобщенную последовательность процедур приема и декодирования навигационных данных.

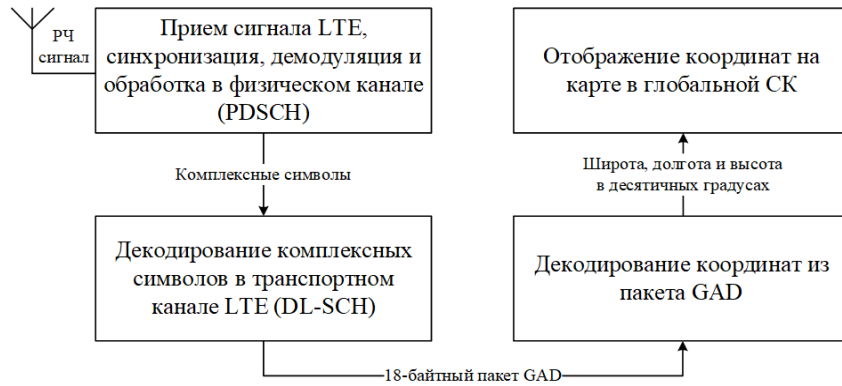


Рисунок 6

Процедуры приема и обработки в физическом канале LTE

Перед декодированием физического канала *PDSCH* выполняются следующие процедуры: 1) инициализация *SDR*-платформы и запись сигнала из эфира; 2) оценка и коррекция частотного сдвига; 3) вычисление корреляций по *PSS* и *SSS* для определения границ кадра и обнаружения идентификатора соты *Cell ID*; 4) демодуляция *OFDM*-сигнала; 5) извлечение комплексных символов навигационных данных из ресурсной сетки в соответствии с *Cell ID*.

Рисунок 7 иллюстрирует диаграмму последовательности процедур приема и извлечения символов навигационных данных.

После получения из эфира комплексных символов навигационных данных они обрабатываются в физическом канале *PDSCH* согласно следующим процедурам: 1) депрекодирование; 2) извлечение символов из параллельных уровней; 3) демодуляция символов; 4) дескремблирование.

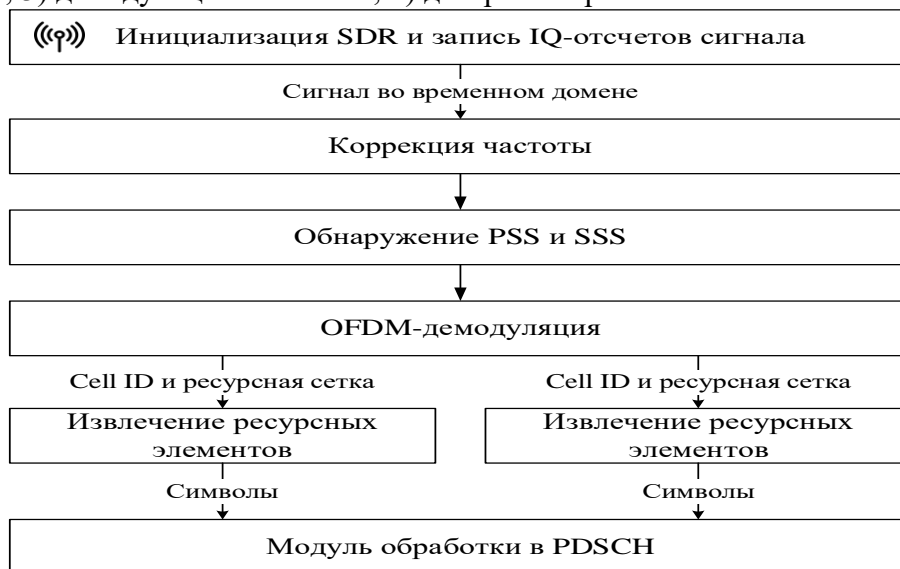


Рисунок 7

Рисунок 8 иллюстрирует диаграмму последовательности процедур обработки в физическом канале *PDSCH* на стороне приемника.

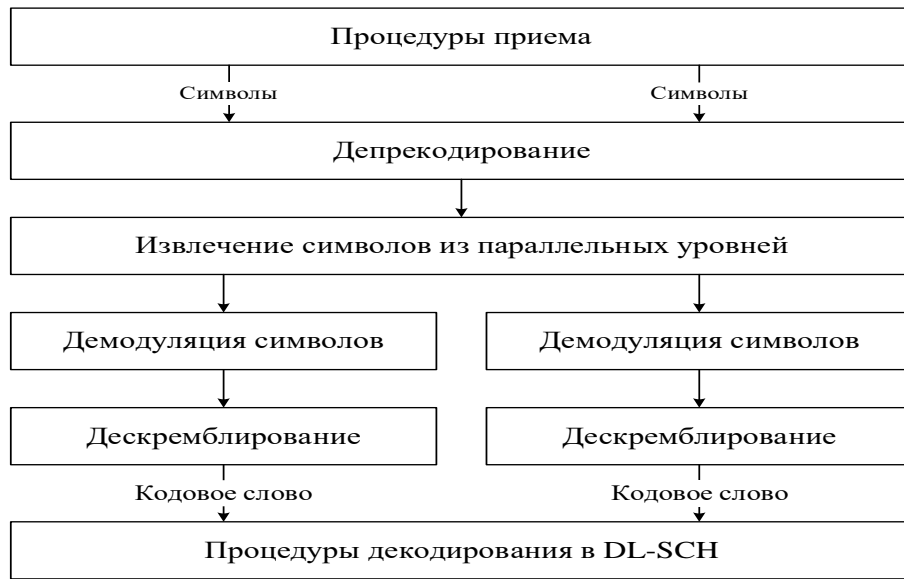


Рисунок 8

Процедуры декодирования в транспортном канале *LTE*

После обработки навигационных данных в физическом канале *PDSCH* их необходимо декодировать в транспортном канале *DL-SCH* согласно следующим процедурам: 1) разделение на кодовые блоки; 2) восстановление скорости; 3) помехоустойчивое канальное турбо-декодирование; 4) объединение кодовых блоков; 5) вычисление и проверка контрольной суммы.

Рисунок 9 иллюстрирует диаграмму последовательности процедур декодирования навигационных данных в транспортном канале *DL-SCH*.



Рисунок 9

Процедуры декодирования навигационных данных из пакета *GAD*

Поля пакета навигационных данных, полученные после декодирования в транспортном канале *DL-SCH*, поочередно преобразуются из двоичного представления в десятичные кодовые числа, а затем в значения широты, долготы и высоты в соответствии с [24]. Далее эти координаты отображаются в виде точки на карте в глобальной СК.

Экспериментальная апробация

Экспериментальная апробация приемопередатчика навигационных данных в сети *LTE* проводилась с использованием *SDR*-платформы *USRP B210* [25] и ГНСС-приемника *Globalsat BU-353S4* [26] и заключалась в приеме глобальных координат ГНСС-приемником на стороне макета *eNB*, кодировании их, передаче в эфир, приеме *LTE* сигнала макетом *UE*, декодировании навигационных данных и отображении на карте местоположения макета *eNB* в соответствии с вышеописанными процедурами. Фото экспериментального стенда приведено на рис. 10. Слева на рис. 10 располагается макет *eNB*, а справа – макет *UE*.

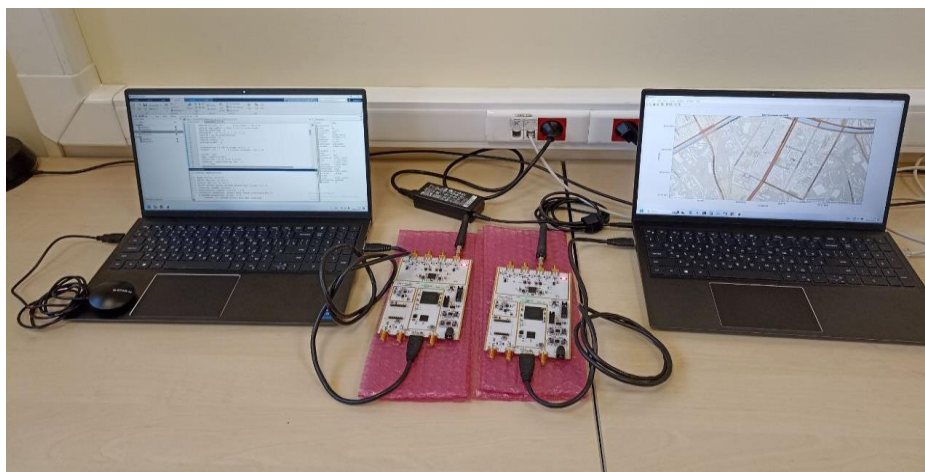


Рисунок 10

На стороне передатчика в командном окне *MATLAB* выводится информация о зафиксированных ГНСС-приемником навигационных данных (рисунок 11). На стороне приемника макета *UE* после успешной демодуляции и декодирования выводится графическое окно с картой в глобальной СК и отображенным на ней местоположением макета *eNB* (рисунок 12).

```
Command Window
Координаты зафиксированы!
1) Время (UTS+3): 12:04:09
2) Широта (WGS-48): 59.9106 N
3) Долгота (WGS-48): 30.35 E
6) Высота антенны над/под средним уровнем моря (геоид): 38.8 М
4) Количество видимых спутников: 12
5) Горизонтальное снижение точности: 0.8
7) Геоидальное разделение, разница между земным эллипсоидом WGS-84
и средним уровнем моря (геоид): 18 М
'- ' означает, что средний уровень моря ниже эллипсоида
```

Рисунок 11

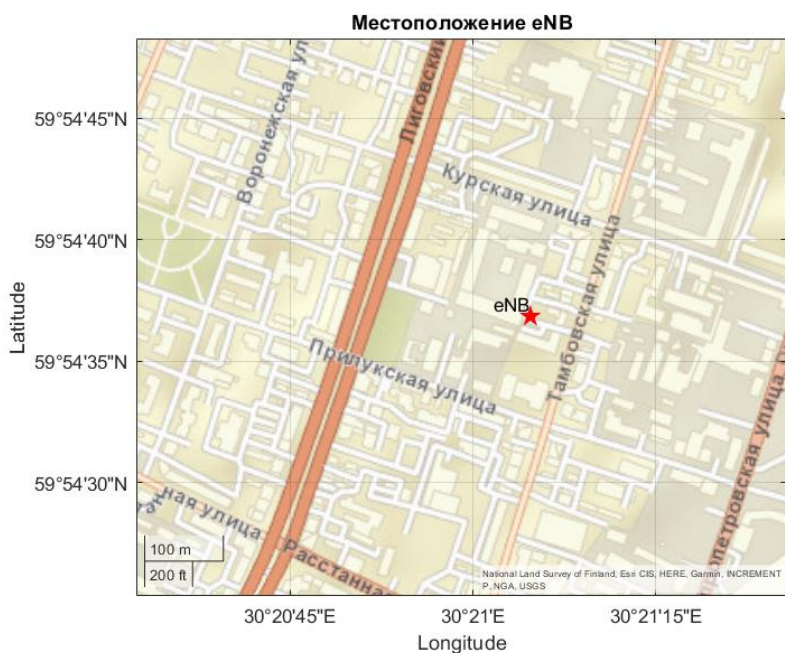


Рисунок 12

В ходе экспериментальной апробации приемопередатчика навигационных данных в сети стандарта *LTE* были успешно переданы, приняты и декодированы глобальные координаты *SDR*-макета *eNB*.

Заключение

В результате проведенного исследования был разработан и экспериментально апробирован приемопередатчик навигационных данных в сети стандарта *LTE*. Реализация описанных процедур кодирования и декодирования позволяет использовать его для приема и передачи не только навигационных, но и любых других данных. Направлением дальнейших исследований является реализация разработанных алгоритмов на ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема).

Литература

1. Koelemeij J.C.J., Dun H., Diouf C.E.V. [et al] A hybrid optical-wireless network for decimetre-level terrestrial positioning // *Nature*, 2022. – Vol. 611. – № 7936. – P. 473-478.
2. Diouf C., Janssen G.J.M., Dun H., Kazaz T., Tiberius C.C.J.M. A USRP-Based Testbed for Wideband Ranging and Positioning Signal Acquisition // in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021. – Vol. 70. – P. 1-15.
3. Yan H., Hanna S., Balke K., Gupta R., Cabric D., Software Defined Radio Implementation of Carrier and Timing Synchronization for Distributed Arrays // *2019 IEEE Aerospace Conference, Big Sky*. – MT, USA, 2019. – P. 1-12.
4. Diouf C., Janssen G.J.M., Kazaz T., Dun H., Chamanzadeh F., Tiberius C.C.J.M. A 400 Msp/s SDR platform for prototyping accurate wideband ranging techniques // *2019 16th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC)*. – Bremen, Germany, 2019. – P. 1-6.

5. Prager S., Haynes M.S., Moghaddam M. Wireless Subnanosecond RF Synchronization for Distributed Ultrawideband Software-Defined Radar Networks // in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020. – Vol. 68. – № 11. – P. 4787-4804.
6. Prager S., Thirvikraman T., Haynes M., Stang J., Hawkins D., Moghaddam M. Ultra-wideband synthesis for high-range resolution software defined radar // 2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18). - Oklahoma City, OK, USA, 2018. – P. 1089-1094.
7. Dun H., Tiberius C.C.J.M., Diouf C., Janssen G.J.M. Terrestrial Precise Positioning System Using Carrier Phase from Burst Signals and Optically Distributed Time and Frequency Reference // Proceedings of the 2021 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, 2021. – P. 510-524.
8. Peral-Rosado J. A. [et al] Software-defined radio LTE positioning receiver towards future hybrid localization systems // in Proceedings of 31st AIAA International Communications Satellite Systems Conference, 2013. – P. 5610.
9. Driusso M., Marshall C., Sabathy M., Knutti F., Mathis H., Babich F. Vehicular Position Tracking Using LTE Signals // in IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017. – Vol. 66. – № 4. – P. 3376-3391.
10. Driusso M., Babich F., Knutti F., Sabathy M., Marshall C. Estimation and tracking of LTE signals time of arrival in a mobile multipath environment // 2015 9th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA). – Zagreb, Croatia, 2015. – P. 276-281.
11. Fokin G., Volgushev D. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Problem Statement // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – Moscow, Russian Federation, 2022. – P. 1-6.
12. Fokin G., Volgushev D. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Transmitter Development // 2022 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). – Sofia, Bulgaria, 2022. – P. 153-158.
13. Volgushev D., Fokin G. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Receiver Development // 2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). – Moscow, Russian Federation, 2022. – P. 1-6.
14. Fokin G., Volgushev D. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Receiver Processing Procedures // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – Moscow, Russian Federation, 2023. – P. 1-7.
15. Fokin G., Ryutin K., Grigoriev V., Bobrovskiy V. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Synchronization Subsystem // 2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). - Pskov, Russian Federation, 2023. – P. 1-6.
16. Fokin G., Volgushev D., Grigoriev V., Ryutin K. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Field Experiment Demonstrator // 2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). – Moscow, Russian Federation, 2023. – P. 1-6.
17. Ryutin K.E., Fokin G.A. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. MIB Transceiver Development // 2023 Seminar on Signal Processing. – Saint Petersburg, Russian Federation, 2023. – P. 115-119.
18. Mashkov G., Borisov E., Fokin G. Experimental validation of multipoint joint processing of range measurements via software-defined radio testbed // 2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). – PyeongChang, Korea (South), 2017. – P. 979-984.

19. Mashkov G., Borisov E., Fokin G. Positioning accuracy experimental evaluation in SDR-based MLAT with joint processing of range measurements // 2016 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET). - Jakarta, Indonesia, 2016. – P. 7-12.
20. Mashkov G., Borisov E., Fokin G. Experimental validation of multipoint joint processing of range measurements via software-defined radio testbed // 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). - PyeongChang, Korea (South), 2016. – P. 268-273.
21. 3GPP TS 36.214 V17.0.0 (2022-03) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements (Release 17).
22. 3GPP TS 38.215 V18.1.0 (2023-12) NR; Physical layer measurements (Release 18).
23. NMEA 0183-Standard for interfacing marine electronic devices: Version 3.01.2002.
24. 3GPP TS 23.032. Universal Geographical Area Description (GAD). V17.2.0, 2021-12.
25. URL <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/> (дата обращения – март 2024 г.).
26. URL <https://www.globalsat.ru/catalog/snyatye/bu-353s4> (дата обращения – март 2024 г.).