



ТЕХНОЛОГИИ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ IIoT УСТРОЙСТВ

А. В. Бородко*

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: borodkoa@mail.ru

Аннотация—Предмет исследования. В статье рассмотрены технические и математические особенности технологий и методов, применяемых при построении систем локального позиционирования. Технологии в области локального позиционирования. **Метод.** Сбор, анализ и сравнение опубликованной информации по технологиям в области локального позиционирования. Выделены основные технологии и методы, позволяющие решать задачу локального позиционирования. **Основные результаты.** В ходе проведенной работы был произведен обзор существующих решений в области локального позиционирования, выделены основные технологии и методы, позволяющие решать задачу локального позиционирования. Были рассмотрены подходы к решению задачи локального позиционирования в рамках концепции промышленного интернета вещей и выделены основные требования. Рассмотрены методы повышения точности позиционирования. Выявлены наиболее эффективные с точки зрения промышленного интернета вещей. **Практическая значимость.** Подготовлена основа для построения математической модели, состоящей из аналитической, алгоритмической и имитационной подмоделей. Модель предлагается создавать по требованиям, выдвигаемым к промышленной системе позиционирования.

Ключевые слова—системы локального позиционирования, промышленный Интернет Вещей, WiFi, Bluetooth Low Energy, RSSI, RTT.

Информация о статье

УДК 527.62

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 09.03.2021, принята к печати 28.07.2021.

Ссылка для цитирования: Бородко А. В. Технологии локального позиционирования IIoT устройств // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Том 9. № 2. С. 21–29. DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-2-21-29.



LOCAL POSITIONING TECHNOLOGIES FOR IIOT DEVICES

A. Borodko*

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

*Corresponding author: borodkoa@mail.ru

Abstract—Research subject. The article discusses the technical and mathematical features of technologies and methods used in the construction of local positioning systems. Local positioning technologies. **Method.** Collection, analysis and comparison of published information on technologies in the field of local positioning. The main technologies and methods that allow solving the problem of local positioning are highlighted. **Core results.** In the course of the work carried out, a review of existing solutions in the field of local positioning was made, the main technologies and methods were highlighted that allow solving the problem of local positioning. The approaches to solving the problem of local positioning within the framework of the concept of the industrial Internet of things were considered and the main requirements were highlighted. Methods for increasing the positioning accuracy are considered. The most effective from the point of view of the industrial Internet of things have been identified. **Practical relevance.** The basis for the construction of a mathematical model has been prepared, consisting of analytical, algorithmic and simulation submodels. The model is proposed to be created according to the requirements put forward for the industrial positioning system.

Keywords—local positioning systems, industrial Internet of Things, WiFi, Bluetooth Low Energy, RSSI, RTT.

Article info

Article in Russian.

Received 09.03.2021, accepted 28.07.2021.

For citation: Borodko A.: Local positioning technologies for IIoT devices // Telecom IT. 2021. Vol. 9. Iss. 2. pp. 21–29 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-2-21-29.



Переход на новую ступень развития человечества позволит принимать решения относительно стратегии развития производств, краткосрочного и долгосрочного планирования, опираясь на решения, полученные при помощи концепции сбора и анализа информации, называемой Индустриальным Интернетом Вещей (IIoT), применяющей принципы концепции Интернета Вещей к производственным объектам [1].

Использование данных, собранных IIoT, позволит оптимизировать производство, производить упреждающее техобслуживание оборудования, обеспечивать высокие показатели безопасности труда и многое другое [2, 3].

Немаловажную роль в новом промышленном мире играют и системы позиционирования, так как с помощью этих систем можно выполнять различные задачи, от определения оптимального маршрута детали по производственной линии или складскому помещению до нахождения местоположения каждого человека, находящегося на территории предприятия. В системах позиционирования используют такое понятие, как БС (базовая станция). Источники могут значительно отличаться в зависимости от выбранной технологии. В технологии Bluetooth базовой станцией будет Bluetooth-beacon, а при использовании технологии GPS-спутник.

Для определения положения объекта вне помещений используются технологии спутниковой навигации: глобальная система позиционирования (GPS) и глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС), а также технологии, использующие сети мобильной связи (GSM, HSDPA/HSUPA, LTE). Применение спутниковой навигации при решении задачи локального позиционирования невозможно из-за резкого снижения точности внутри помещений по причине рассеивания спутникового сигнала в стенах и перекрытиях здания. Системы локального позиционирования зачастую построены на основе беспроводных радиотехнологий. Информация о технологиях, применяемых в зависимости от масштаба системы приведена в таблице 1 [4].

Таблица 1.

Технологии, применяемые в системах позиционирования

Технологии	Системы определения местоположения			
	глобальные	региональные	кампусные	локальные
Спутниковая система навигации	✓			
Мобильная сотовая связь		✓	✓	
Транкинговая радио связь		✓	✓	
Беспроводная локальная сеть Wi-Fi			✓	✓
Ячеистая сеть ZigBee			✓	✓
Беспроводная связь DECT			✓	✓
Радиосети RFID				✓
Радиосети Bluetooth				✓



Для определения местоположения объектов внутри помещений используются системы локального позиционирования, базирующиеся на технологиях беспроводных сетей, таких как ZigBee, nanoLOC, Bluetooth. Наибольшее распространение среди них получили технологии стандарта IEEE 802.11 (WiFi). Несмотря на то, что эти технологии изначально не были предназначены для решения задач позиционирования, они успешно используются для организации систем локального позиционирования. Основным плюсом является то, что, для использования технологий WiFi, Bluetooth, ZigBee и частичного диапазона RFID (125–134,2 КГц, 140–148,5 КГц и 13,56 МГц) используются открытые для свободного использования во многих странах диапазоны частот.

Существует несколько методов определения позиции, они делятся на геометрические и технические. Большинство методов опираются на уровень мощности сигнала (RSS), посылаемого базовой станцией. Такие методы делятся на две группы – методы, основой которых является построение модели распространения сигнала, и методы, базирующиеся на теории классификации [5].

Методы, использующие для решения задачи позиционирования время, затраченное на передачу и обработку сигналов между БС и объектом позиционирования можно систематизировать по наличию синхронизации между отправителем и получателем, и по направлению сигнала, по которому определяется время.

Среди методов, использующих синхронизацию, выделяется метод Time of Arrival (ToA), выдвигающий наиболее высокие требования к синхронизации клиентских устройств с базовыми станциями. Данный метод решает задачу позиционирования, определяя разницу между временем отправки сигнала объектом и временем получения его базовой станцией. Корректно местоположение определяется только при абсолютной синхронности устройств и наличии прямой видимости от объекта до минимум трех БС. Time of Flight – метод, определяющий расположение объекта позиционирования путем оценки времени прохождения сигнала с линейно-частотной модуляцией от объекта до БС, он не требует синхронизации объекта и базовых станций. Применение этого метода рассмотрено в работе [6].

Авторами была решена поставленная задача позиционирования, но также были отмечены недостатки метода, свойственные TDoA. Преимущество метода над TDoA – отсутствие необходимости в синхронизации между устройствами, что уменьшает вычислительную нагрузку на систему.

Также, среди методов, не требующих синхронизации, необходимо выделить Round Time Trip. Данный метод исследован в работе [7]. Автор рассмотрел применение RTT для определения местоположения объекта, выделил высокую точность позиционирования и основной недостаток – внутренняя задержка устройств, которая вносит нестабильность в определение местоположения.

Применяемые в радиосетях методы рассмотрены в таблице 2 (см. ниже).

Большинство существующих решений задачи позиционирования ориентировано на использование одной беспроводной технологии, что может приводить к проблемам, возникающим из-за недостатков используемой технологии.

Гибридная система позиционирования комбинирует эти технологии и достигает более высокой точности позиционирования, используя сильные стороны раз-



ных технологий. Также, использование гибридных систем позиционирования способствует исполнению требований, выдвигаемых со стороны IIoT по энергоэффективности и экономичности.

Таблица 2.

Методы, применяемые в системах позиционирования

Метод	
Received Signal Strength (RSS)	Оценка местоположения определяется на основании мощности от сигнала БС
Angle of Arrival (AoA)	Оценка местоположения строится в пределах площадитреугольника, получаемого в результате пересечения осей направленности антенн трех ближайших БС.
Round Time Trip (RTT)	Местоположение объекта определяется по общему времени, которое затрачивается на доставку сигнала и получение ответа.
Time of Arrival (ToA)	Позиция оценивается по разнице времени между отправкой сигнала объектом и получением его БС. Необходима синхронизация по времени объекта и БС.
Inertial Measurement Unit (IMU)	Местоположение объекта получается исходя из инерциальной навигации, с использованием датчиков движения объекта – акселерометра, гироскопа
Time Difference of Arrival (TDoA)	Местоположение определяется исходя из разницы времени доставки сигнала, отправляемого объектом до нескольких БС. Обязательное условие – необходима синхронизация всех БС по времени.
Time of Flight(ToF)	Позиция объекта определяется временем, затраченным сигналом с линейно-частотной модуляцией от объекта до БС.

Среди работ, рассматривающих гибридные системы, стоит отметить работу A. Baniukevic, C. S. Jensen, H. Lu [8], которые выдвинули предложения об улучшении качества позиционирования систем по сигналам WiFi при помощи использования сигнала Bluetooth.

Методы определения RTT для WiFi и Bluetooth различаются. Для технологии WiFi основой является Fine Timing Management (FTM). Среди технологий, применяющихся для определения позиционирования при помощи WiFi, отдельно необходимо выделить FTM [9]. Первая версия данной технологии впервые была представлена в стандарте 802.11n-2011 и носила название Time Measurement (TM).

Технология базируется на временных отметках, определяемых по отправленным и полученным TM-пакетах. Данная версия не могла обеспечить высокую точность определения местоположения, поскольку средняя ошибка достигала 10 м. В дальнейшем данный стандарт был обновлен до стандарта 802.11mc, в котором были внесены существенные изменения в технологию FTM, позволяя измерять расстояние до точки доступа с точностью 1–2 м, что существенно превосходит существующие методы, базирующиеся на RSSI. Среди ключевых изменений необходимо отметить уменьшение периода получения временных отметок с 10 до 0,1 нс. Полученные временные метки складываются, и, учитывая задержку на оборудовании, получается круговая задержка, поделив которую пополам можно получить достаточно точную оценку расстояния (рис. 1).



Внедрение данной технологии позволило применять метод RTT к технологии WiFi. На данный момент RTT over WiFi возможно применять только на устройствах, поддерживающих FTM и использующих Android Pie, выпущенный в 2018 году. Согласно предоставляемой документации¹ можно добиться точности в 1–2 метра, при использовании WiFi RTT и мультilaterации.

Механизм работы FTM

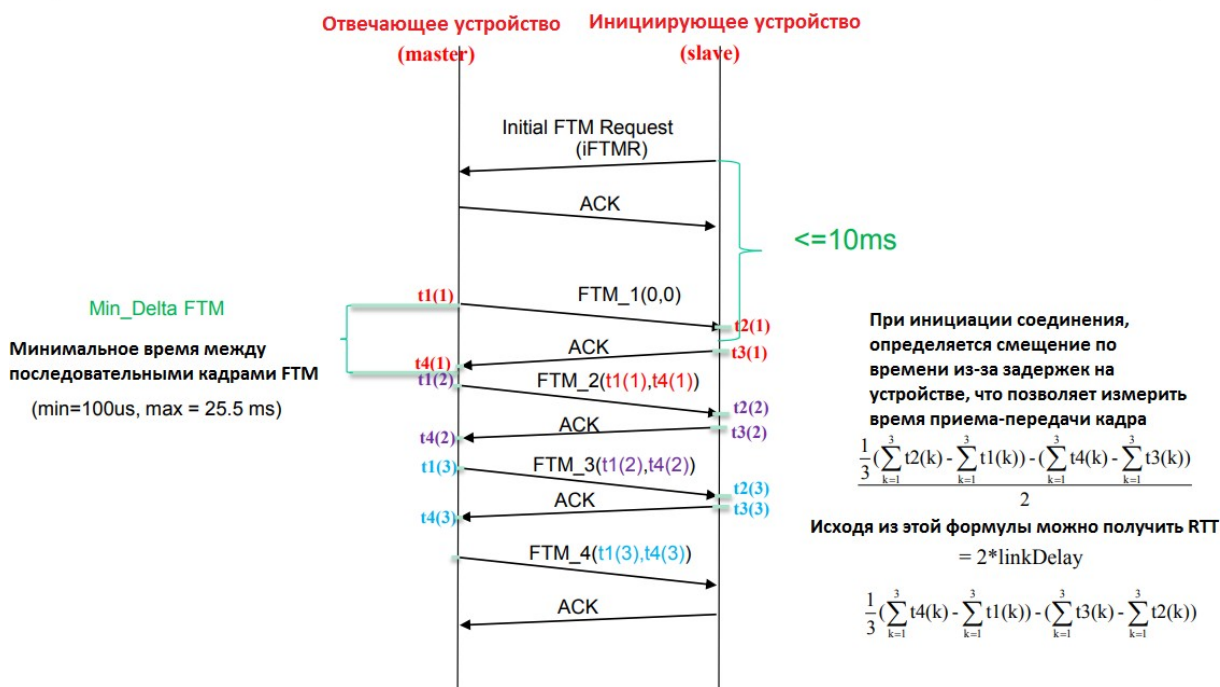


Рис. 1. Механизм работы FTM

Применение метода RTT для Bluetooth описано в работе [10]. Автором отмечено что данный метод можно реализовать при минимальных затратах трафика из-за особенности BLE, которая заключается в способности передавать данные не осуществляя подключение. Это происходит во время стадии соединения – Advertising State. Если обратиться к каналам, используемым BLE, можно увидеть, что каналы Bluetooth, работающие в Advertising State – 37, 38 и 39, также называемые Advertising Channels. Каналы и частоты Bluetooth, применяемые в BLE изображены на рис. 2.



Рис. 2. Каналы и несущие частоты, на которых работает BLE

¹ Wi-Fi location: ranging with RTT. URL: <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/wifi-rtt> (дата обращения: 11.02.2020)



Максимальный пакет, пересылаемый в Advertising State – 47 байт, он состоит из следующих полей: Preamble, Access Address, Packet Data Unit (PDU) and Cyclic Redundancy Check (CRC). Поля Preamble и Access Address фиксированы и имеют значения 0xAA и 0x8E89BED6 соответственно.

PDU может быть трех видов: ADV_IND для подключаемых неконтролируемых событий, ADV_NONCONN_IND для неподключаемых неконтролируемых событий и ADV_SCAN_IND для неподключаемых широкополосных событий с дополнительной информацией, отправляемой после получения ответа.

При сканировании отправляется пакет SCAN_REQ, длиной в 37 байт. Ответный пакет SCAN_RSP отправляется только в режимах ADV_IND и ADV_SCAN_IND. Сразу же после отправки пакета SCAN_REQ запускается таймер, определяющий RTT. Как только отправитель «рекламных пакетов» получает пакет SCAN_REQ, он отправляет ответный пакет SCAN_RSP. Получив ответный пакет сканер останавливает таймер. Таким образом получается итоговое время круговой задержки. Диаграмма обмена представлена на рис. 3.

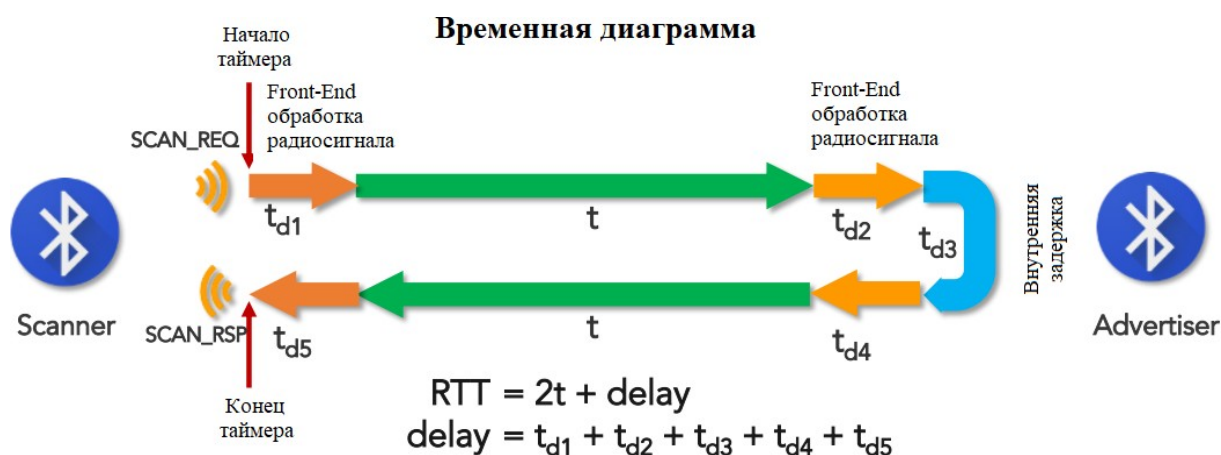


Рис. 3. Временная диаграмма обмена данными в Advertising State

В 2019 году организацией Bluetooth Special Interest Group была выпущена спецификация ядра Bluetooth версии 5.1, в которой был добавлен метод Direction Finding [10]. В основе данного метода лежит использование специализированного оборудования в роли массива антенн, которое позволит обрабатывать получаемые данные, для определения направления сигнала. Direction Finding предлагает 2 вида архитектуры, которые опираются на общую базу. Первый – Angle of Arrival (AoA), второй – Angle of Departure (AoD).

Основой определения направления, в котором находится объект позиционирования является разность фаз волн, взаимодействующих с массивом антенн. Из-за расстояния между принимающими антеннами можно определить разность фаз и определить расстояние. Данный метод позволяет значительно увеличить точность позиционирования. По данным, полученным авторами спецификации, достигается точность позиционирования в 10–20 см.

Одним из подходов к повышению точности позиционирования является совместное использование беспроводных технологии разной физической природы для того чтобы уменьшить ошибки позиционирования. Кроме этого такой подход



позволит увеличить доступность системы позиционирования при отказе одной из технологий, так как координаты объекта могут быть определены по данным систем, которые остались доступными.

В системах локального позиционирования увеличение точности системы WiFi достигается за счет добавления точек доступа Bluetooth, функционирующих как маячки. Главное преимущество при использовании базовых станций Bluetooth, достигается за счет того, что их эффективный радиус действия меньше по сравнению с точками доступа WiFi. Эта особенность позволяет корректировать оценки координат объектов в проблемных с точки зрения точности зонах, либо в зонах, требующих повышенного внимания. Аналогичные подходы рассматриваются в работе [8].

Поскольку построение системы позиционирования является комплексной технической задачей, требующей математического обоснования и тонкой конфигурации, целесообразно проводить математическое моделирование, создать алгоритмическую и аналитическую модели, показывающие логику работы рассматриваемой системы, позволяющие пошагово воспроизвести процессы, происходящие в системе позиционирования. Затем в имитационной модели, наиболее приближенной к реальной системе, в процессе разработки которой могут быть применены технологии и методы позиционирования, описанные в статье, возможно получение итогового результата, полученного имитационной моделью, который можно сравнить с требованиями, выдвигаемыми к системе позиционирования.

Литература

1. Гулин К. А., Усков В. С. О роли интернета вещей в условиях перехода к четвертой промышленной революции // Проблемы развития территории. 2017. № 4 (90). С. 112–131.
2. Бородко А. В., Пантюхин О. И. Анализ содержания типовых стадий и задач проектирования современных центров обработки данных специального назначения // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды IV межвузовской научно-практической конференции. СПб.: ВАС, 2019. С. 127–131.
3. Бородко А. В., Пантюхин О. И. Реализация облачных систем хранения на основе центров обработки данных // Интернет вещей и 5G (INTHITEN 2017). 3-я Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: СПбГУТ, 2017. С. 62–67.
4. Малышев А. В., Семенова А. Ю., Омелянчук Е. В. Обзор технологий позиционирования мобильных объектов в реальном времени // Наука. Технологии. Производство. 2014. № 3. С. 115–118.
5. Banin L., Schatzberg U., Amizur Y. Next generation indoor positioning system based on WiFi time of flight // Proc. 26th Int. Tech. Meeting Satellite Division Inst. Navigat (ION GNSS+). 2013. pp. 975–982.
6. Banin L. et al. Reference Positioning Engine & Measurements Database for Wi-Fi RTT (FTM) Positioning. 2018. URL: https://www.researchgate.net/profile/Ofer-Bar-Shalom/publication/326736387_Reference_Positioning_Engine_Measurements_Database_for_Wi-Fi_RTT_FTM_Positioning/links/5b61a43b0f7e9bc79a73527d/Reference-Positioning-Engine-Measurements-Database-for-Wi-Fi-RTT-FTM-Positioning.pdf
7. Ассур О. С., Филаретов Г. Ф. Сравнительный анализ методов и систем локального позиционирования // Информационные технологии в науке, образовании и управлении: труды международной конференции IT + S&E`15 (Гурзуф, 22 мая–01 июня 2015 г) / под. ред. проф. Е. Л. Глориозова. М.: ИНИТ, 2015. Весенняя сессия. С. 172–182.



8. Baniukevic A., Jensen C. S., Lu H. Hybrid indoor positioning with Wi-Fi and Bluetooth: Architecture and performance // 2013 IEEE 14th International Conference on Mobile Data Management. IEEE, 2013. Vol. 1. pp. 207–216.

9. Stanton K., Aldana C. Addition of p802. 11-MC Fine Timing Measurement (FTM) to p802. 1 ASRev: Tradeoffs and Proposals // Rev 0.10. IEEE Draft presented at IEEE. 2015. Vol. 802.

10. Woolley Martin. Bluetooth Direction Finding A Technical Overview. URL: https://3pl46c46ctx02p7rzdsvs21-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/Files/developer/1903_RDF_Technical_Overview_FINAL.pdf (дата обращения: 20.02.2020).

References

1. Gulin K. A., Uskov V. S. On the role of the internet of things in the conditions of transition to the fourth industrial revolution // Problems of territory's development. 2017. No. 4 (90). pp. 112–131.

2. Borodko A. V., Pantyuhin O. I. Analiz sodержaniya tipovyh stadij i zadach proektirovaniya sovremennyh centrov obrabotki dannyh special'nogo naznacheniya // Problemy tekhnicheskogo obespecheniya vojsk v sovremennyh usloviyah. Trudy IV mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. SPb.: VAS, 2019. S. 127–131.

3. Borodko A., Pantyuhin O. Implementation of cloud based storage data centers // Internet of Things and 5G (INTHITEN 2017). 3-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. SPb.: SPbGUT, 2017. S. 62–67.

4. Malyshev A. V., Semenova A. Yu., Omel'yanchuk E. V. Obzor tekhnologij pozicionirovaniya mobil'nyh ob'ektov v real'nom vremeni // Nauka. Tekhnologii. Proizvodstvo. 2014. № 3. S. 115–118.

5. Banin L., Schatzberg U., Amizur Y. Next generation indoor positioning system based on WiFi time of flight // Proc. 26th Int. Tech. Meeting Satellite Division Inst. Navigat (ION GNSS+). 2013. pp. 975–982.

6. Banin L. et al. Reference Positioning Engine & Measurements Database for Wi-Fi RTT (FTM) Positioning. 2018. URL: https://www.researchgate.net/profile/Ofer-Bar-Shalom/publication/326736387_Reference_Positioning_Engine_Measurements_Database_for_Wi-Fi_RTT_FTM_Positioning/links/5b61a43b0f7e9bc79a73527d/Reference-Positioning-Engine-Measurements-Database-for-Wi-Fi-RTT-FTM-Positioning.pdf

7. Assur O. S., Filaretov G. F. Comparative analysis of the methods and local positioning systems // Informacionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii: trudy mezhdunarodnoj konferencii IT + S&E` 15 (Gurzuf, 22 maya–01 iyunya 2015 g) / pod. red. prof. E. L. Gloriovova. M.: INIT, 2015. Vesennaya sessiya. S. 172–182.

8. Baniukevic A., Jensen C. S., Lu H. Hybrid indoor positioning with Wi-Fi and Bluetooth: Architecture and performance // 2013 IEEE 14th International Conference on Mobile Data Management. IEEE, 2013. Vol. 1. pp. 207–216.

9. Stanton K., Aldana C. Addition of p802. 11-MC Fine Timing Measurement (FTM) to p802. 1 ASRev: Tradeoffs and Proposals // Rev 0.10. IEEE Draft presented at IEEE. 2015. Vol. 802.

10. Martin Woolley. Bluetooth Direction Finding A Technical Overview. URL: https://3pl46c46ctx02p7rzdsvs21-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/Files/developer/1903_RDF_Technical_Overview_FINAL.pdf (20.02.2020).

Бородко Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры
Санкт-Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
borodkoa@mail.ru

Borodko Alexander V.

Candidate of engineering sciences, associate professor,
The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University
of Telecommunications,
borodkoa@mail.ru