

УДК 621.396.969

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2025-13-3-48-69>

EDN: YGYFAW

Исследование возможностей настройки для улучшения ключевых параметров сверхширокополосных систем локального позиционирования в реальном времени

✉ Белов А. А., Хуторная Е. В.

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, 190121, Российская Федерация

Постановка задачи. Сверхширокополосные технологии, основанные на передаче импульсных сигналов с шириной спектра 500 МГц и выше, в отличие от других технологий беспроводной связи (Wi-Fi, BLE, nanoNET), обеспечивают при локальном позиционировании высокую точность локализации (10–30 см) и битовую скорость (до 27,24 Мбит/с с перспективой роста). Однако при этом дальность передачи быстро снижается с ростом битовой скорости, а увеличение мощности передатчика ограничено нормами по спектральной плотности эквивалентной изотропно-излучаемой мощности. Тем не менее в силу своих достоинств сверхширокополосные технологии очень востребованы при решении таких задач, как предотвращение столкновений движущихся средств, управление роботами, обеспечение доступа к опасному оборудованию и в целом при построении мультитазовых систем позиционирования в реальном времени. Поэтому в настоящее время наблюдается активное внедрение сверхширокополосных систем позиционирования в реальном времени или гибридных систем, обязательно содержащих сверхширокополосные решения, несмотря на их сравнительно высокую стоимость. При этом производители чипов и проектировщики систем постоянно улучшают их ключевые параметры: точность локализации, скорость и дальность передачи. Сверхширокополосные модули также интегрируются в смартфоны и позволяют осуществлять высокоточную навигацию, поиск вещей, снабженных радиометкой. В этих условиях проектировщикам крайне важно понимать возможности и ограничения сверхширокополосного метода позиционирования, правильно оценивать действие влияющих факторов, а также тенденции развития нормативной и компонентной базы. Данная работа призвана сформировать методические аспекты указанного понимания, в чем и состоит ее **актуальность**. **Целью работы** является исследование возможностей улучшения ключевых параметров сверхширокополосных систем позиционирования в реальном времени методами настройки в интересах проектирования и обслуживания. **Используемые методы:** анализ тенденций развития нормативной и компонентной базы, исследование влияния параметров передачи и спектральных характеристик сигналов на ключевые параметры сверхширокополосных систем позиционирования в реальном времени, изучение возможностей разных режимов и настроек. **Новизна:** систематизированы регулировочные параметры, влияющие на дальность передачи сверхширокополосных сигналов без ущерба для битовой скорости. **Результат:** выявленные взаимосвязи между настройкой модулей и ключевыми параметрами сверхширокополосных систем позиционирования.

Библиографическая ссылка на статью:

Белов А. А., Хуторная Е. В. Исследование возможностей настройки для улучшения ключевых параметров сверхширокополосных систем локального позиционирования в реальном времени // Информационные технологии и телекоммуникации. 2025. Т. 13. № 3. С. 48–69. DOI: 10.31854/2307-1303-2025-13-3-48-69. EDN: YGYFAW

Reference for citation:

Belov A., Khutornaya E. A Study of Control Methods for Improving Key Parameters of Ultra-Wideband Real-Time Local Positioning Systems // Telecom IT. 2025. Vol. 13. Iss. 3. PP. 48–69. (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2025-13-3-48-69. EDN: YGYFAW

вания в реальном времени позволят улучшить эксплуатационные характеристики внедряемых систем. **Практическая значимость:** представленное исследование может быть использовано для сопровождения занятий по изучению сценариев построения и функционирования сверхширокополосных систем позиционирования в реальном времени, выбора наилучших режимов передачи, спектральных структур сигналов, настроек и компонентной базы под разные задачи при проектировании и обслуживании систем.

Ключевые слова: ультракороткие импульсы, сверхширокополосная связь, система локального позиционирования в реальном времени

Введение

Значимость и перспективность сверхширокополосных (СШП / UWB, аббр. от англ. Ultra Wide Band) решений для систем позиционирования в реальном времени (RTLS, аббр. от англ. Real Time Locations System) можно оценить по рисунку 1, на котором представлены зависимости скорости от дальности передачи для протоколов беспроводной связи (далее – протоколов) UWB [1] и некоторых версий Wi-Fi¹.

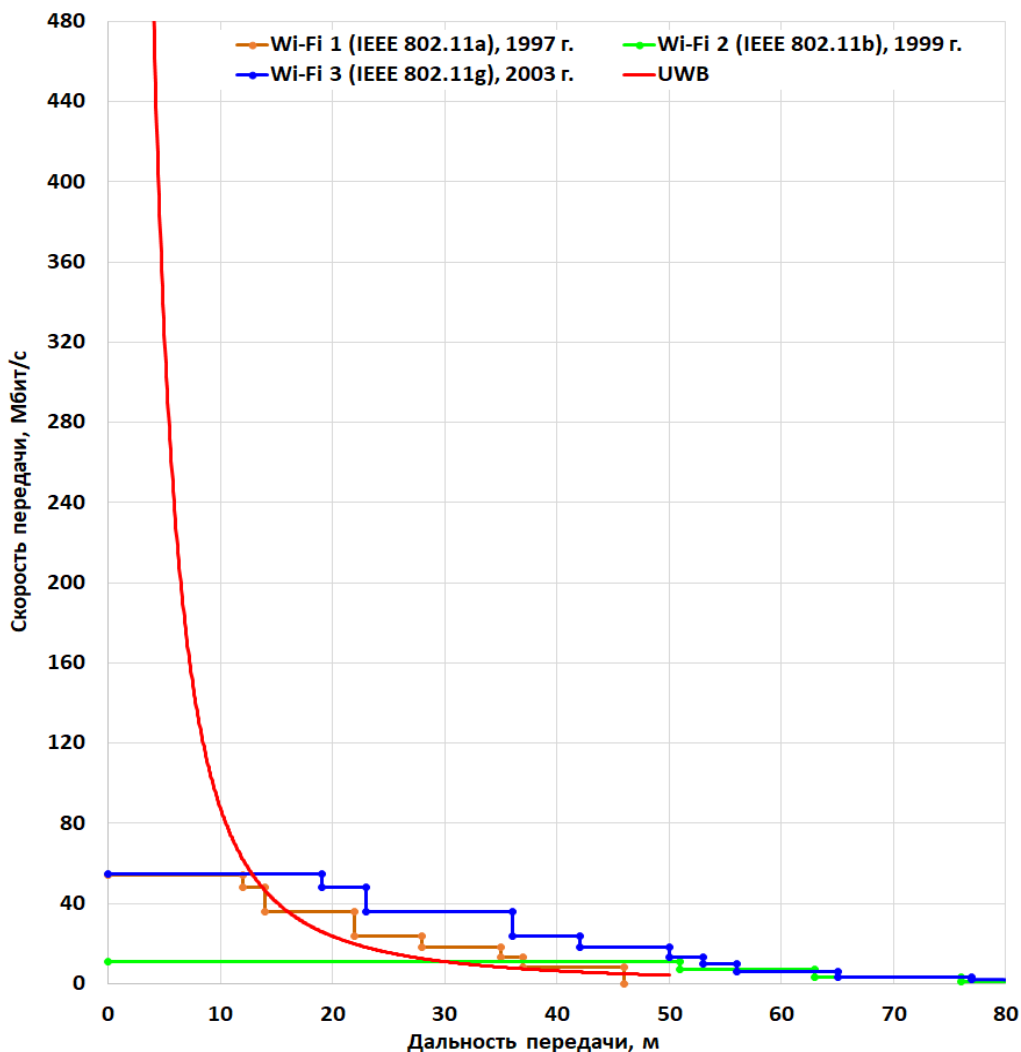


Рис. 1. Связь скорости и дальности передачи для протоколов Wi-Fi и UWB

¹ Скорость Интернета по Wi-Fi // Mosnet. URL: <https://mosnet.ru/customers/nastrojka-podklyucheniya/nastrojka-routera-wi-fi/skorost-interneta-po-wi-fi.html> (дата обращения 20.12.2025).

Из рисунка видно, что СШП передача может осуществляться с высокой битовой скоростью до 480 Мбит/с – такой же, как при проводном интерфейсе USB (*аббр. от англ. Universal Serial Bus* – универсальная последовательная шина), – что выгодно отличает протокол UWB от узкополосных протоколов, однако такая скорость может быть достигнута только при малом радиусе действия – до 3 м [1]. Этого вполне достаточно для межчиповой коммуникации, но даже для такого класса задач трудности в реализации остановили процесс на этапе опытных чипсетов, о чем речь пойдет ниже. В то же время для RTLS удалось довести СШП решения до массового внедрения, но при более низких битовых скоростях. Так, в мире в 2025 г. 38 % всех решений для RTLS были внедрены на базе СШП технологий².

На сегодняшний день задача состоит в выработке решений, которые позволили бы повышать скорость без ущерба для дальности передачи, в том числе путем настройки параметров, для чего необходимо:

- исследовать структуру передачи, спектральные свойства СШП сигналов и выявить возможные воздействия, которые позволили бы улучшать характеристики систем в условиях действия норм по спектральной плотности эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (СП ЭИИМ);
- определить границы регулирования ключевых параметров.

Влияние структуры передачи на ключевые параметры RTLS

Точность локализации для СШП сигналов составляет 10–30 см и во многом определяется длительностью импульсов, однако этот параметр передачи, как правило, не регулируется. А скорость и дальность передачи могут варьироваться в зависимости от параметров настройки СШП модулей, поэтому им следует уделить особое внимание.

СШП сигналы в RTLS являются измерительными, так как позиционирование осуществляется по измеренным временным, угловым или иным параметрам распространения импульсов. Однако такие СШП сигналы, называемые ультракороткими импульсами (УКИ), должны также переносить вспомогательную битовую информацию с применением мер обеспечения помехоустойчивости в соответствии с ГОСТ Р 58082-2018 (ИСО/МЭК 24730-62:2013)³, который разработан с учетом стандарта IEEE 802.15.4-2011 [2].

Необходимо пояснить, что для «чистой» передачи данных (без позиционирования) часто используются другие виды СШП сигналов, например, хаотические радиоимпульсы (ХР), которые станут частью дальнейших рассуждений и поэтому их следует коротко описать. Если УКИ напоминают видеоимпульс (как правило, биполярный), то ХР заполнены сверхвысокой радиочастотой от источника хаоса (рисунок 2).

² Real Time Location System (RTLS) Market Outlook from 2025 to 2035 // Future Market Insights (fmi). 2025. URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/real-time-location-system-market> (дата обращения 20.12.2025).

³ ГОСТ Р 58082-2018 (ИСО/МЭК 24730-62-2013). Системы позиционирования в реальном времени (RTLS). Часть 62. Сверхширокополосный радиointерфейс с высокой частотой повторения импульсов.

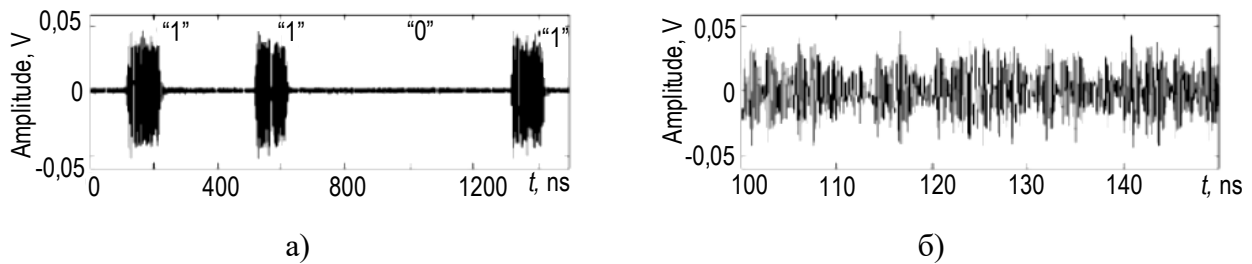


Рис 2. Хаотические радиоимпульсы: а) принцип кодирования битовой информации; б) внешний вид ХР [3]

ХР могут иметь очень простой алгоритм кодирования информации: есть импульс – «1», нет импульса – «0», в то время как УКИ используют более сложные алгоритмы. ХР могут следовать с малой скважностью, при этом переотраженные сигналы будут повышать мощность полезных сигналов, между тем для УКИ приходится принимать меры против многолучевого распространения.

Еще один плюс ХР – большое значение базы сигнала Б:

$$B = \Delta F \cdot T_{\text{и}} \gg 1, \quad (1)$$

в отличие от одиночных УКИ, для которых:

$$B = \Delta F \cdot T_{\text{и}} = 1,$$

где ΔF – эффективная ширина полосы спектра импульса; $T_{\text{и}}$ – эффективная длительность импульса. Эффективные ΔF и $T_{\text{и}}$ – это интервалы частоты и времени, в пределах которых сосредоточена основная часть энергии сигнала (обычно 0,9; иногда принимается 0,5). В дальнейшем слово «эффективный» опускается.

Выражение (1) обусловлено тем, что рост длительности радиоимпульса не ведет к расширению его частотного спектра, так как границы спектра задаются неизменной частотой внутри импульса. Для УКИ рост длительности импульса вызывает пропорциональное уменьшение ширины спектра.

Большая база ХР повышает отношение сигнал / шум [4], а значит, дальность передачи. Отсюда, в частности, следует, что при том же радиусе действия допустимый уровень отношения сигнал / шум для пачки ниже, чем для одиночного импульса [5]. Это выводится и из теории, согласно которой качество приема Q характеризуется удвоенным отношением энергии импульса E к спектральной плотности шума N_0 , которое можно выразить через отношение мощностей сигнала P_c и шума $P_{\text{ш}}$ [6] и затем через базу сигнала, т. е. качество приема пропорционально величине базы сигнала:

$$Q^2 = \frac{2E}{N_0} = \frac{2P_c \cdot T_{\text{и}}}{P_{\text{ш}} \cdot \Delta F} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \cdot 2\Delta F T_{\text{и}} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \cdot 2B.$$

Однако несмотря на перечисленные достоинства, ХР широко не применяют в RTLS, так как радиоимпульсы имеют сравнительно большую длитель-

ность (~ 100 нс) и, как следствие, низкую точность локализации (~ 3 м) при современных методах позиционирования, основанных на измерении временных и угловых параметров распространения СШП [7]. Этим объясняется, почему именно УКИ являются наиболее эффективными для RTLS по сравнению с другими видами СШП сигналов, однако следует понять, используются ли описанные достоинства ХР при передаче УКИ.

Для защиты битовой информации в RTLS в соответствии с ГОСТ Р 58082-2018 используется комбинированная ВРМ-BPSK-модуляция (*аббр. от англ. Biphas Modulation – пакетно-позиционная модуляция, Binary Phase Shift Keying – двоичная фазовая манипуляция*), при этом передача осуществляется следующим образом.

1) УКИ передаются пачкой, напоминающей радиоимпульс. Благодаря этому база сигнала больше 1, так как длительность импульса в данном случае определяется как длительность пачки T_{Π} :

$$B = \Delta F \times T_{\Pi} > 1.$$

При этом по аналогии с ХР обеспечивается повышенная устойчивость к шуму и рост дальности передачи, а также дополнительная помехоустойчивость вследствие возможности кодирования временного положения каждого импульса. Возможно также кодовое разделение канала между несколькими радиометками. Пачка может состоять из одного импульса, а может включать в себя до 512 импульсов.

2) Логическим событием считается символ длительностью $T_{\text{С}}$, содержащий ряд позиций длительностью T_{Π} (см. рисунок 3, на котором символ состоит из 32 позиций).

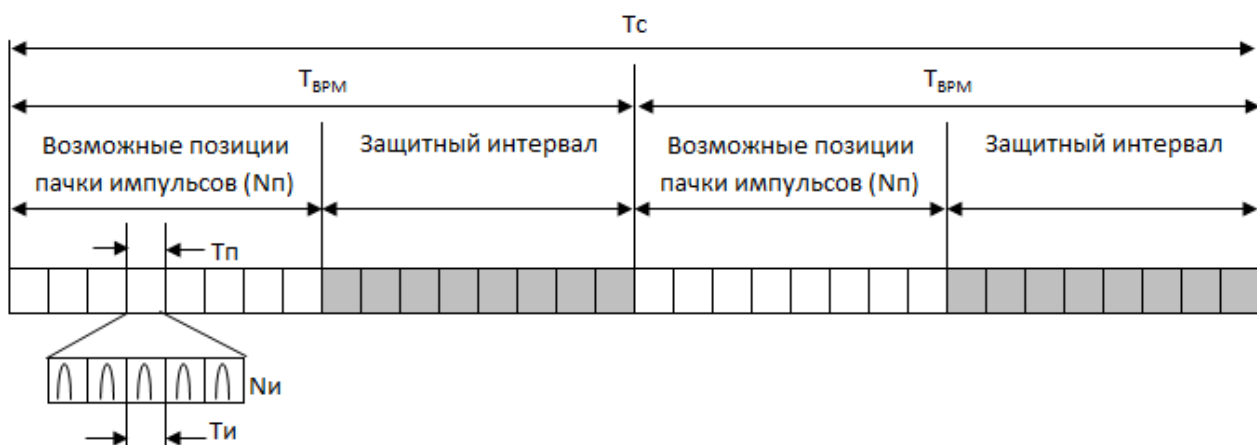


Рис. 3. Структура символа

Каждая позиция символа является возможным местом размещения пачки, однако во всем символе используется только одно место для одной пачки, которая включает в себя $N_{\text{И}}$ импульсов длительностью $T_{\text{И}}$ каждый:

$$T_{\Pi} = N_{\text{И}} \cdot T_{\text{И}}.$$

Символ разделен на два одинаковых ВРМ-промежутка ($T_{ВРМ} = T_C/2$), каждый из которых состоит из двух равных интервалов. Пачка может размещаться только в первом интервале каждого ВРМ-промежутка (белые ячейки), при этом переотраженные импульсы будут попадать в основном на защитный интервал (серые ячейки). Символ переносит два бита информации: один бит задается положением пачки («1» – в рамках первого ВРМ-промежутка, «0» – в рамках второго ВРМ-промежутка), второй бит – полярностью (фазой) пачки («1» – положительная полярность, «0» – отрицательная полярность). Это и есть ВРМ-ВРСК модуляция.

Длительность пачки намного меньше длительности ВРМ-промежутка, что обеспечивает некоторую защиту от помех многопользовательского доступа (в различных каналах могут использовать разные возможные позиции пачки). Позиция пачки может меняться от символа к символу согласно коду псевдослучайной перестройки для обеспечения дополнительной помехоустойчивости.

Пример формы импульса, приведенной с помощью фильтра Баттерворта 8-го порядка к ширине полосы пропускания приемника 500 МГц на уровне 3 дБ и соответствующей ГОСТ Р 58082-2018, показан на рисунке 4а. Данный пример совместим с 11 возможными каналами, имеющими полосу 499,2 МГц (таблица 1). При этом в памяти приемника зафиксирована форма эталонного импульса (рисунок 4б). Сигнал будет принят как рабочий, если расхождение его формы с формой эталонного импульса будет находиться в пределах кросс-корреляционной функции (рисунок 4в), которая задает характер возможных искажений и является еще одним средством обеспечения помехозащищенности.

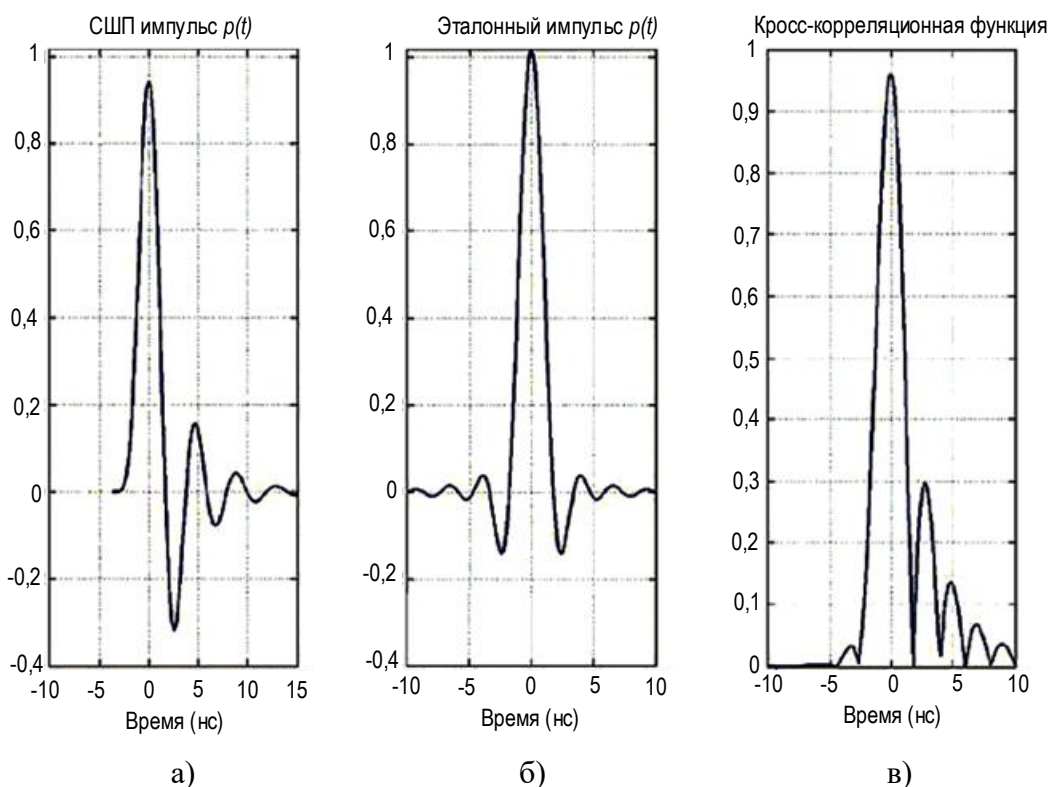


Рис. 4. Пример импульсов, соответствующих ГОСТ Р 58082-2018

Таблица 1 – Каналы по ГОСТ Р 58082-2018 и IEEE 802.15.4

Номер канала	Нижняя граница канала, МГц	Верхняя граница канала, МГц	Центральная частота, МГц	Ширина полосы Δf , МГц
1	3244,8	3744,0	3494,4	499,2
2	3744,0	4243,2	3993,6	499,2
3	4243,2	4742,4	4492,8	499,2
4	3328,0	4659,2	3993,6	1331,2
5	6240,0	6739,2	6489,6	499,2
6	6739,2	7238,4	6988,8	499,2
7	5948,8	7030,4	6489,6	1081,6
8	7238,4	7737,6	7488,0	499,2
9	7737,6	8236,8	7987,2	499,2
10	8236,8	8736,0	8486,4	499,2
11	7321,6	8652,8	7987,2	1331,2
12	8320,0	9651,2	8985,6	499,2
13	8819,2	10150,4	9484,8	499,2
14	9318,4	10649,6	9984,0	499,2
15	8807,32	10162,29	9484,8	1354,97

ГОСТ Р 58082-2018 также предусматривает более широкополосные каналы: 1081,6, 1331,2 и 1354,97 МГц, совместимые импульсы для которых будут короче в соответствии с формулой:

$$T_{0,5} = \frac{1}{\Delta f},$$

где $T_{0,5}$ – длительность первого лепестка приведенного сигнала по уровню 0,5 (с); Δf – ширина канала (Гц).

Отметим, что длительность приведенного сигнала не зависит от частот фактически распространяющегося спектра импульса, т. е. от положения канала в разрешенном диапазоне частот, а определяется только шириной канала. Чипы и модули по умолчанию настраиваются на канал 5.

3) Предусмотрено четыре скорости передачи (C): 110, 850, 6800, 27240 кбит/с и независимо от них две частоты повторения импульсов (f): 16 и 64 МГц, причем это средние частоты, поскольку временные промежутки между импульсами в пачке намного меньше промежутков между пачками.

C и f – основные задаваемые пользователем параметры, поэтому необходимо выяснить, что происходит с символами при их изменении и как это влияет на дальность передачи. В таблице 2 приведены наборы характеристик канала, составленные по требованиям ГОСТ Р 58082-2018, а на рисунке 5 – структура символов при разных сочетаниях C и f . Для анализа также потребуются эксплуатационные данные по какому-либо чипу приемопередатчика. Целесообразно взять распространенный чип DW1000 производства компании Qorvo (США),

так как в его спецификации содержатся эксплуатационные данные для двух битовых скоростей (110 и 6800 кбит/с) из четырех стандартных⁴.

Таблица 2 – Наборы характеристик канала по ГОСТ Р 58082-2018

Средняя частота повторения импульсов, МГц	Скорость передачи, кбит/с	Длина кода преамбулы	Частота следования символов, МГц	Длительность символа, Тс, нс	Длительность пачки, Тп, нс	Число мест для импульсов в символе	Число импульсов в пачке, Ми	Число позиций пачки в символе, Nп
16	110	31	0,12	8205,10	256,41	4096	128	32
16	850	31	0,98	1025,60	32,05	512	16	32
16	6800	31	7,80	128,21	4,01	64	2	32
16	27200	31	15,60	64,10	2,00	32	1	32
64	110	127	0,12	8205,10	1025,60	4096	512	8
64	850	127	0,98	1025,60	128,21	512	64	8
64	6800	127	7,80	128,21	16,03	64	8	8
64	27240	127	31,20	32,05	4,01	32	2	8

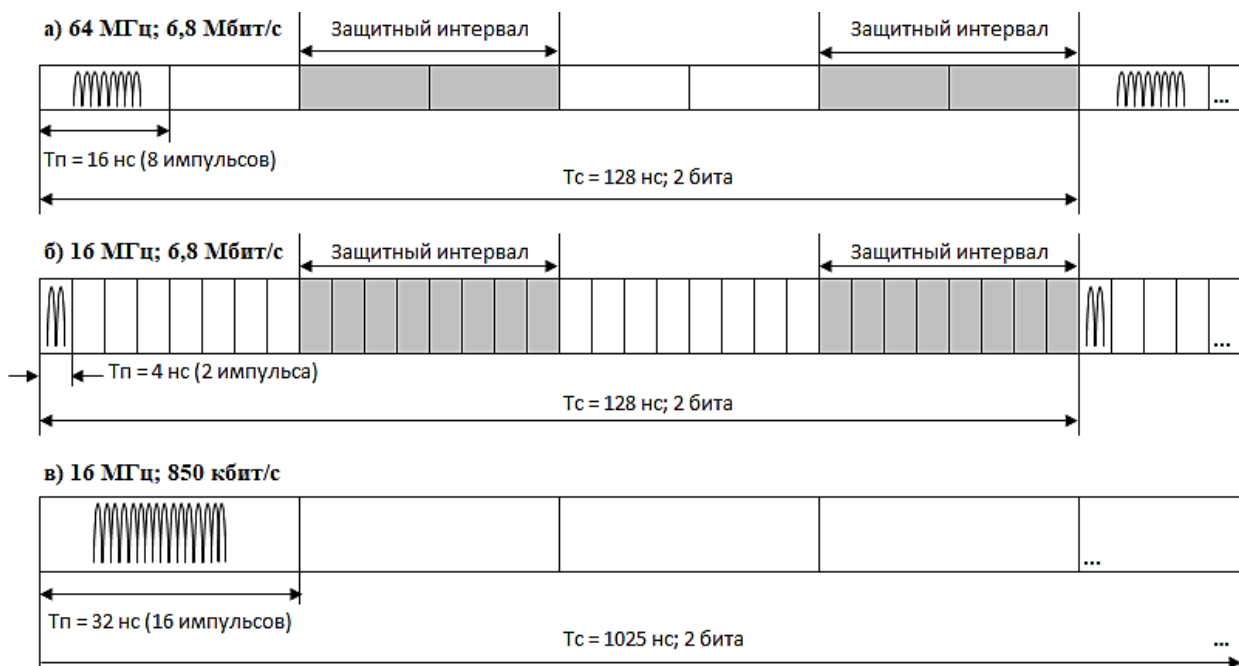


Рис. 5. Структура символов: а, б – при одной и той же скорости передачи (6,8 Мбит/с) и разных частотах повторения импульсов (16 и 64 МГц); б, в – при одной и той же частоте повторения импульсов (16 МГц) и разных скоростях передачи (6,8 Мбит/с и 850 кбит/с)

Ниже приведены таблица 3 и соответствующий ей рисунок 6, которые связывают типовой радиус действия передатчика (R) чипа DW1000 с параметрами настройки для разных рекомендуемых применений.

⁴ DW1000 3.5–6.5 GHz Ultra-Wideband (UWB) Transceiver IC with 1 Antenna Port // Qorvo. URL: <https://www.qorvo.com/products/p/DW1000> (дата обращения 20.12.2025).

Таблица 3 – Данные из спецификации чипа приемопередатчика DW1000*

Вариант	Скорость передачи C , Мбит/с	Частота передачи f , МГц	Число символов в преамбуле	Объем пакета, байт	Длительность пакета, мкс	Радиус действия, R , м	Рекомендуемое применение
1	6,8	64	128	30	197	110	RTLS ToF**
2	6,8	64	128	12	179	100	RTLS TDoA**
3	6,8	16	128	30	194	97	RTLS ToF
4	6,8	16	128	12	175	95	RTLS TDoA
5	6,8	64	128	127	315	75	Передача данных
6	6,8	64	1024	1023	2275	55	Передача данных
7	6,8	16	128	127	312	65	Передача данных
8	6,8	16	1024	1023	2250	55	Передача данных
9	0,11	64	1024	30	3651	205	RTLS ToF
10	0,11	64	1024	12	2469	205	RTLS TDoA
11	0,11	16	1024	30	3625	180	RTLS ToF
12	0,11	16	1024	12	2443	180	RTLS TDoA
13	0,11	64	1024	127	11199	205	Передача данных
14	0,11	64	1024	1023	78264	205	Передача данных
15	0,11	16	1024	127	11173	180	Передача данных
16	0,11	16	1024	1023	78258	180	Передача данных

*В спецификации приведены данные только для канала № 2. Для совокупности каналов производитель чипа DW1000 оценивает возможности роста радиуса действия за счет штатных настроек значением 290 м.

**ToF и TDoA (*аббр. от англ. Time of Flight и Time Difference of Arrival*) – технологии определения расстояния, основанные, соответственно, на измерении времени распространения сигнала или разницы во времени прихода сигнала при передаче между передатчиком и приемником⁵.

Радиус действия указан в предположении выполнения норм FCC (*аббр. от англ. Federal Communications Commission – Федеральная комиссия по связи США*) по СП ЭИИМ: $-41,3$ дБм/МГц⁶.

⁵ Методы локализации СИП – TOF и TDOA // Nanjing Woxu Wireless Co.,Ltd. 2018. URL: <https://ru.woxuuwb.com/news/uwb-localization-techniques-tof-and-tdoa-53311699.html> (дата обращения 20.12.2025).

⁶ Before the Federal Communications Commission Washington, D.C. 20554 // Internet archive Wayback. 2002. URL: https://web.archive.org/web/20060321184536/http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf (дата обращения 20.12.2025).

Из анализа приведенных данных можно сделать следующие выводы:

– пачка импульсов не только увеличивает защиту от шумов и помех и дальность передачи, но также является важнейшим инструментом регулирования параметров передачи;

– настройка f на более высокий уровень (с 16 на 64 МГц) при той же скорости передачи $C = 6,8$ Мбит/с осуществляется путем увеличения числа импульсов в пачке. Кроме того, из-за связанного с этим роста переносимой энергии увеличивается СП ЭИИМ сигнала, что требует снизить мощность передатчика с целью соблюдения норм.

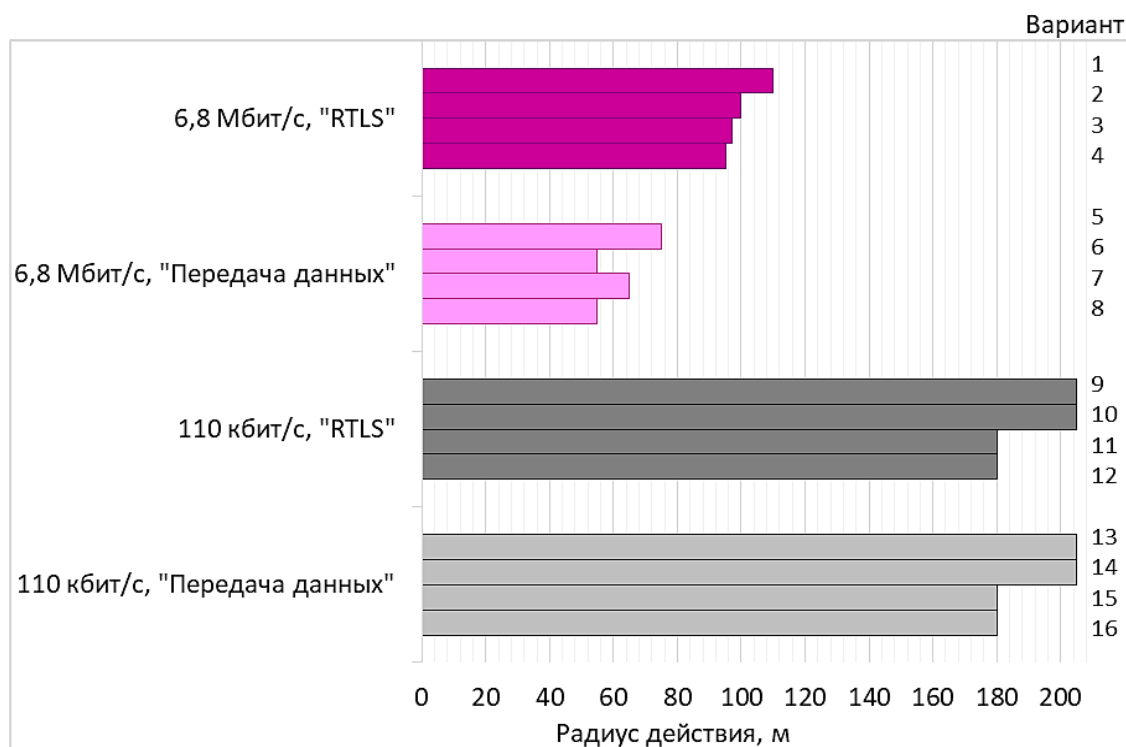


Рис. 6. Изменение радиуса действия чипа DW1000 при двух видах рекомендуемого применения и двух скоростях передачи (16 вариантов настройки в соответствии с таблицей 3)

Теоретически снижение мощности передатчика должно привести к уменьшению радиуса действия R , однако происходит обратное: для 64 МГц данный параметр на 12 % выше, чем для 16 МГц. Это объясняется тем, что на частоте 64 МГц пачка включает в себя в четыре раза больше импульсов, за счет чего из-за расширения базы сигнала растет качество приема, а значит и радиус действия. Получается, что на частоте 64 МГц эффект роста R от увеличения длительности пачки выше, чем на 16 МГц от повышения мощности передатчика.

Понижение скорости передачи с 6,8 Мбит/с до 850 кбит/с при той же частоте 16 МГц осуществляется путем увеличения числа импульсов в пачке и, соответственно, длины символа в восемь раз. При этом качество приема и радиус действия существенно растут. Но при уменьшении скорости передачи увеличивается чувствительность приемника из-за лучшего распознавания слабых сигналов, что вносит свой вклад в рост радиуса действия. Однако все это

приводит к снижению быстродействия, поскольку каждый символ переносит два бита, т. е. скорость поступления символов (битов) на приемник при частоте 16 МГц уменьшается в восемь раз в сравнении со скоростью при 64 МГц.

Скорость 27,24 Мбит/с является пределом для используемой структуры передачи, так как при ней число импульсов в пачке минимально (1 – при $f = 16$ МГц и 2 – при $f = 64$ МГц), что исчерпывает резервы регулирования.

Существенное влияние на дальность передачи оказывает объем передаваемых данных, в частности, длина кода преамбулы и объем пакета, впрочем, для вида рекомендуемого применения “RTLS” длинные преамбулы и объемные пакеты не применяются. Разброс значений дальности в рамках одного вида рекомендуемого применения (“RTLS” или «Передача данных») при разных настройках и одной скорости передачи не так уж велик – не более 15 %. Если удастся сократить объем передаваемых данных до уровня вида рекомендуемого применения “RTLS”, то можно увеличить радиус действия при той же скорости передачи более, чем в два раза (с 55 до 110 м при $C = 6,8$ Мбит/с).

Как видно из таблицы 3, минимальная дальность передачи (55 м) соответствует битовой скорости 6,8 Мбит/с и виду рекомендуемого применения «Передача данных», максимальная (205 м) – скорости передачи 110 кбит/с и не зависит от вида рекомендуемого применения. Таким образом, радиусы действия 55 и 205 м можно считать базовыми границами регулирования ключевых параметров системы для частотного канала 2.

Влияние спектральных свойств сигналов на ключевые параметры RTLS

Следует заметить, что описанные настройки чипа DW1000 рассчитаны на соблюдение норм FCC по СП ЭИИМ (не выше $-41,3$ дБм/МГц). В России нормы Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) до 2022 г. были значительно строже требований FCC (рисунок 7), поэтому дальность передачи оказывалась почти в два раза меньше [8]. Однако в 2020 г. ГКРЧ разрешила компании Apple провести испытания смартфонов модели 11 с модулем U1 СШП навигации и по результатам, в 2022 г. увеличила допустимую СП ЭИИМ до уровня FCC ($-41,3$ дБм/МГц) для любых устройств, но только для канала 5 (см. таблицу 1)⁷. Показательно, что в 2025 г. в смартфонах Apple модули UWB навигации U1 вдруг разблокировались, что, видимо, связано с упомянутым выше решением ГКРЧ 2022 г.⁸

⁷ Решение Государственной комиссии по радиочастотам при Министерстве связи и массовых коммуникаций Российской Федерации № 07-20-03-001 от 07.05.2007 «О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия». [Редакция от 04.07.2022] // URL <https://www.klerk.ru/doc/560754> (дата обращения 20.02.2026).

⁸ Пашкевич Д. У россиян заработали чипы Apple U1 на iPhone и AirTag // hi-tech. 27.01.2025. URL: <https://hi-tech.mail.ru/news/121580-u-rossiyan-zarabotali-chipy-apple-u1-na-iphone-i-airtag> (дата обращения 20.12.2025).

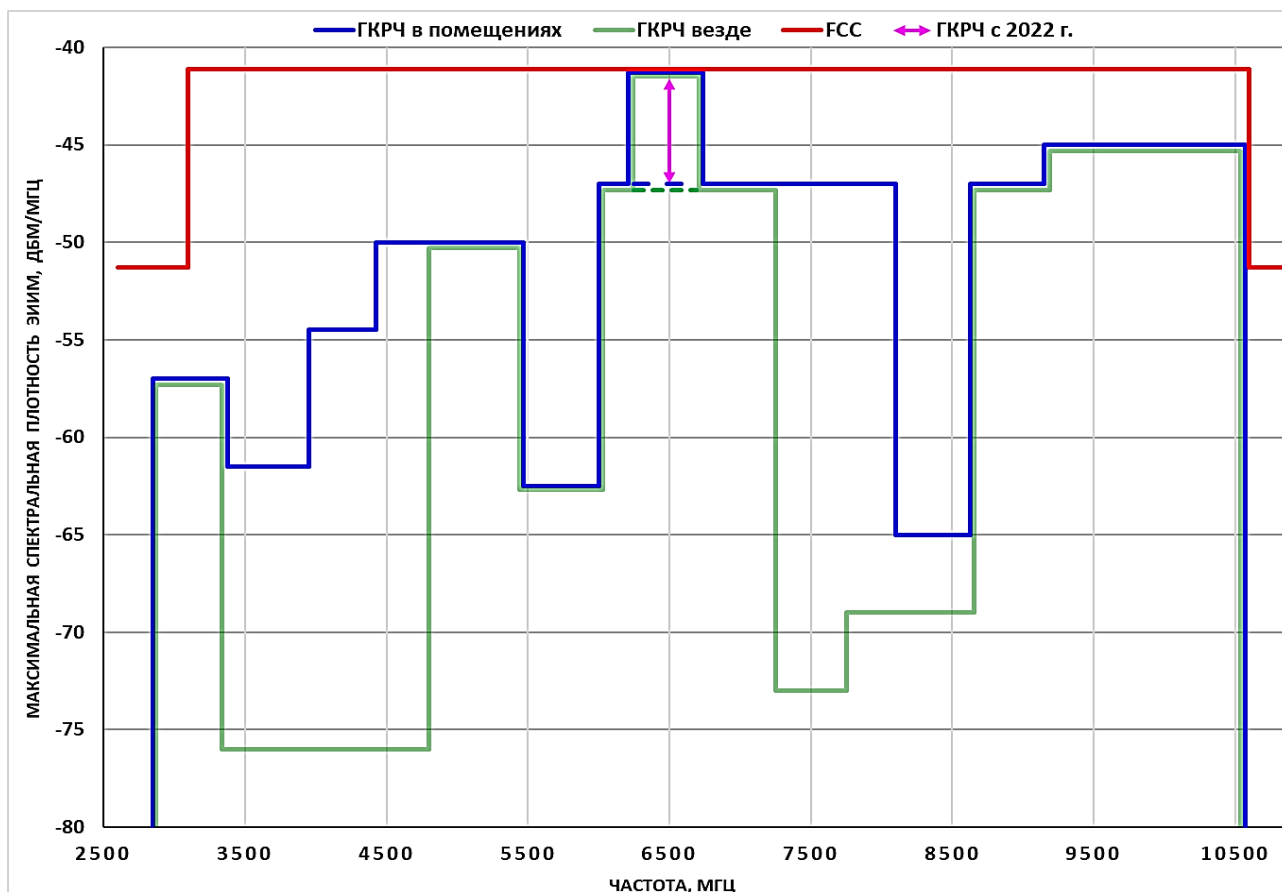
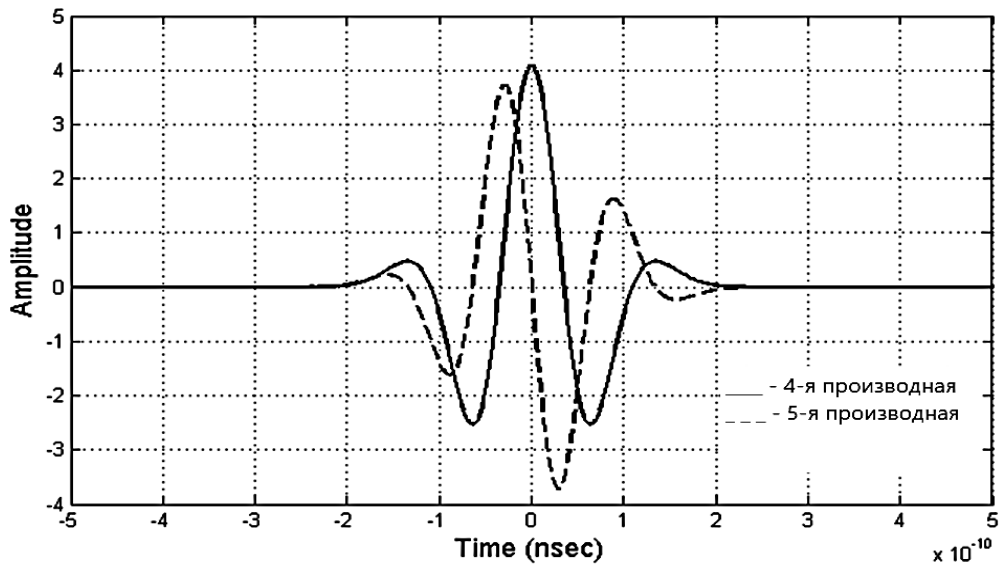


Рис. 7. Ослабление норм ГКРЧ в 2022 г. до уровня требований FCC

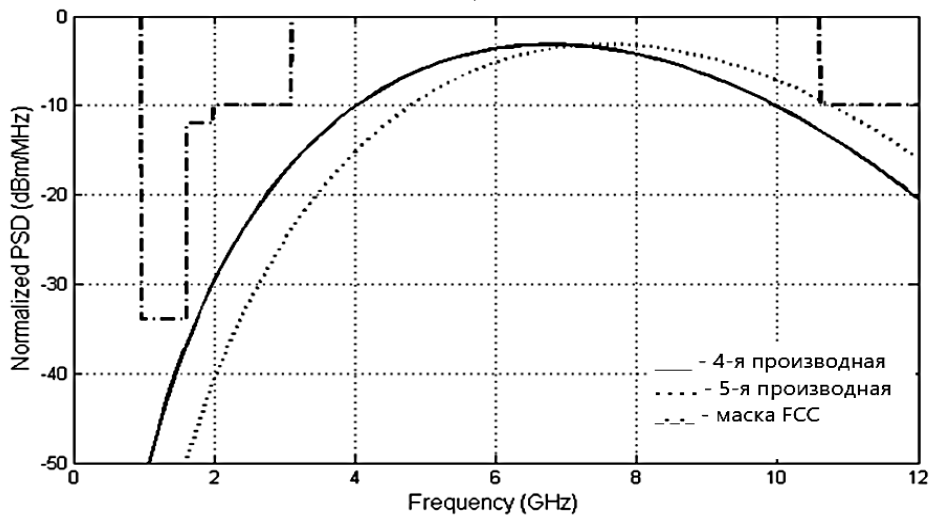
СП ЭИИМ излучаемого передатчиком сигнала должна укладываться в маску норм с центральной частотой, соответствующей выбранному каналу (см. таблицу 1). Спектр импульса может быть шире канала, но выход за границы разрешенного диапазона запрещен. Формирование сигналов, удовлетворяющих указанным требованиям, достигается, например, следующими способами. На рисунке 8 показаны формы импульсов, представляющих собой 4-ю и 5-ю производные импульса Гаусса (рисунок 8а). Это пример сигналов, у которых СП ЭИИМ довольно точно вписывается в маску FCC (рисунок 8б).

Однако маска может быть более сложной (например, нормы ГКРЧ), или требуется ограничить излучение на определенной частоте. В работе [9] показано, как можно с помощью комбинированного применения 4-й и 5-й производных импульса Гаусса и генетических алгоритмов подобрать импульс, в спектре которого будет вырезана узкая помехоопасная область частот в районе 5,2 ГГц. Результат изображен на рисунке 9.

Существуют и другие алгоритмы. Так, в работе [10] решается задача вписывания СП ЭИИМ в маску ГКРЧ сигнала, полученного на основе совмещения четырех импульсов Найквиста длительностью 0,8–1 нс. Характеристика первого импульса покрывает весь разрешенный диапазон частот, а кривые СП ЭИИМ трех остальных импульсов размещаются в трех «окнах» маски ГКРЧ (рисунок 10).



а)



б)

Рис. 8. Пример импульсов (а), у которых СП ЭИИМ вписывается в маску FCC (б) – 4-я и 5-я производные импульса Гаусса [9]

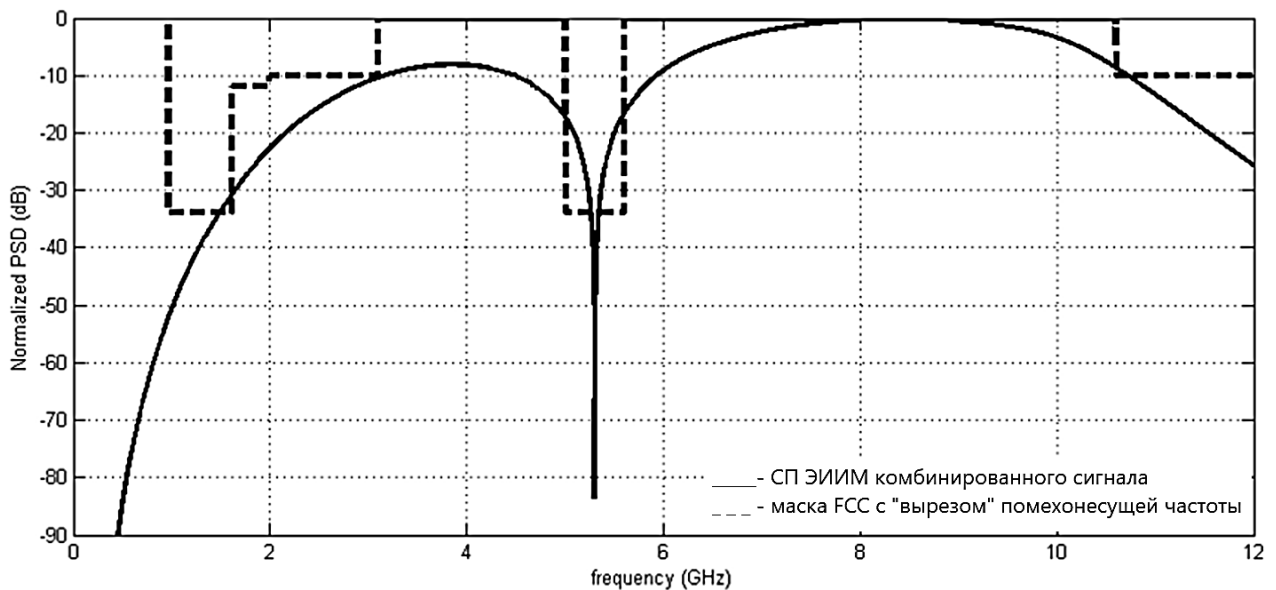


Рис. 9. Формирование характеристики СП ЭИИМ под сложную маску [9]

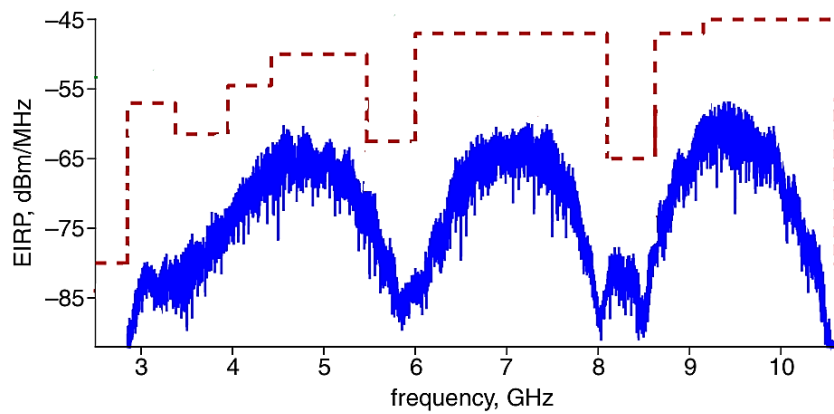


Рис. 10. Вписывание СП ЭИИМ составного импульса под сложную маску ГКРЧ, существовавшую до 2022 г. [10]

Помимо комбинации разных импульсов для получения сигнала нужной формы можно применить фильтр на выходе передатчика, а также использовать несущую на центральной частоте требуемого канала [11] (рисунок 11а). Такой сигнал имеет суженный спектр вплоть до полосы пропускания приемника (рисунки 11 б–г). Благодаря этому возможна настройка тракта на самый незашумленный или самый выгодный по ограничениям СП ЭИИМ канал.

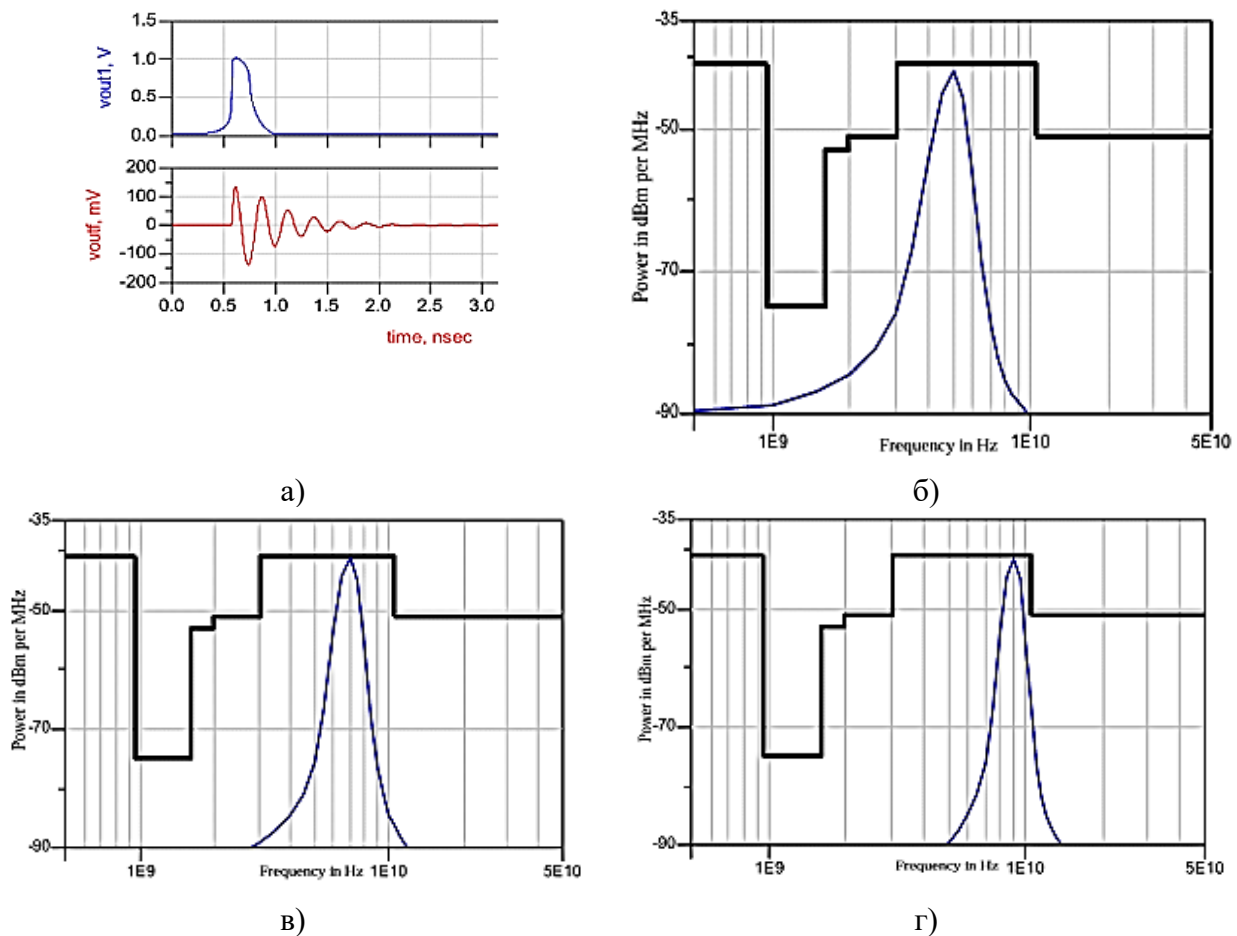


Рис. 11. Модуляция импульса Гаусса центральной частотой канала (а) и получающиеся СП ЭИИМ для разных каналов (б, в, г) под маской FCC [11]

Сказанное особенно актуально в условиях ослабления норм ГКРЧ до уровня FCC только для канала 5. При этом следует учитывать, что с ростом центральной частоты спектра сигнала растет и его затухание, а значит импульс, занимающий верхнюю часть спектра, например канал 14, будет передаваться на меньшую дальность в сравнении с импульсом, спектр которого концентрируется в канале 2.

Необходимо добавить, что спектр пачки импульсов получается «резанным» в сравнении со спектром одиночного импульса. Рисунок 12 иллюстрирует изменение спектра при переходе от прямоугольного импульса к пачке. На рисунке изображена ситуация для однополярных импульсов, спектр которых начинается от нулевой частоты, в связи с чем его трудно вписать в маску норм (без несущей на центральной частоте какого-либо канала). Поэтому УКИ, применяемые в RTLS, обычно биполярные. Однако показанный на рисунке 12 характер изменения спектра сохраняется и для биполярных импульсов.

Во всех случаях важно не просто вписать сигнал в норму, но и получить высокий коэффициент заполнения маски, так как он тоже влияет на радиус действия. Этот коэффициент может принимать значения в диапазоне 0,4–0,88 [8] в зависимости от эффективности алгоритмов формирования сигнала.

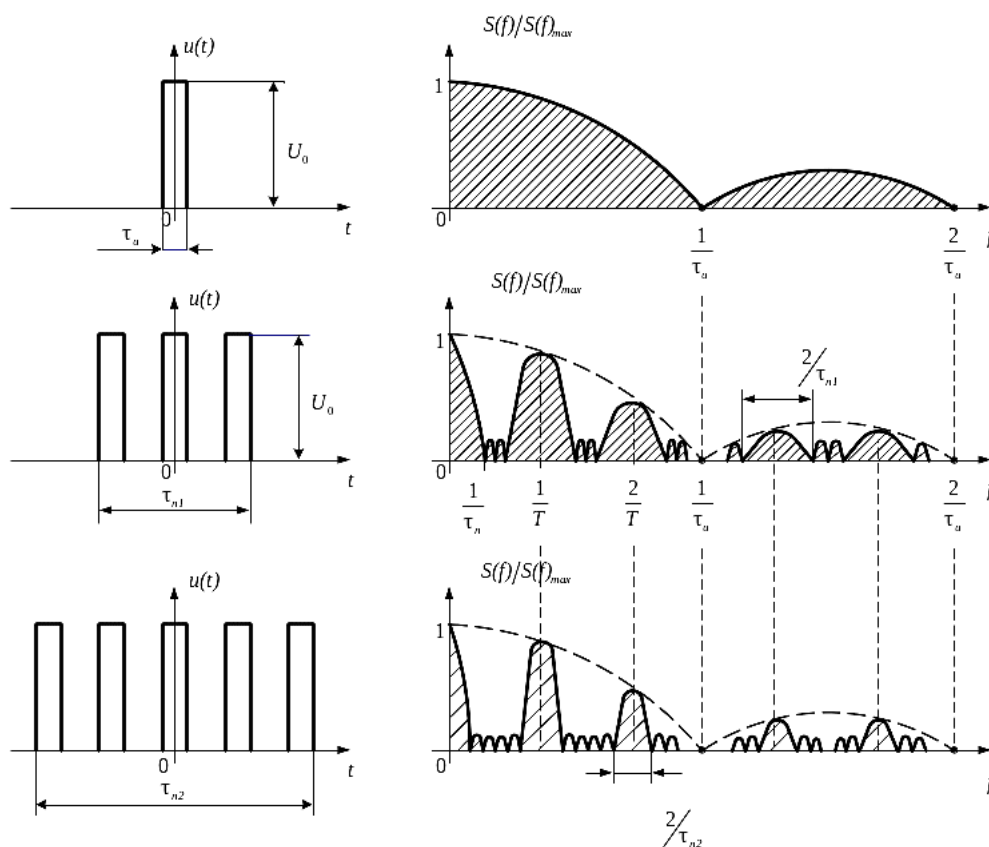


Рис. 12. Конфигурации спектров импульса и пачки импульсов⁹

⁹ Сложные сигналы и их спектры // StudFiles. URL: <https://studfile.net/preview/8838941/page:10> (дата обращения 20.12.2025).

Границы регулирования ключевых параметров RTLS

Следует отметить, что производители чипов для RTLS обычно ограничивают скорость передачи на уровне 6,8 Мбит/с, максимум 27,24 Мбит/с, в то время как по теоретическим оценкам [1] битовая скорость составляет 480 Мбит/с (рисунок 1). В связи с этим необходимо уточнить, для какого вида СШП сигналов построен график на рисунке 1 с максимумом битовой скорости 480 Мбит/с. Дело в том, что протокол UWB не ограничивается рассмотренными выше видами сигналов XP и УКИ и применим не только для RTLS, но и для других систем.

В 2002 г. был предложен проект стандарта IEEE 802.15.3a [12] по использованию высокоскоростного UWB для приложений, связанных с мультимедиа и визуализацией, в том числе для создания беспроводного интерфейса CW-USB (*аббр. от англ. Certified Wireless USB – сертифицированный беспроводной USB*) с такой же скоростью, как у проводного USB (480 Мбит/с). Однако в 2006 г. рабочая группа была распущена, так как два крупных альянса не смогли выбрать одну из двух спецификаций: 1) многодиапазонное мультиплексирование с ортогональным частотным разделением – MB-OFDM (*аббр. от англ. Multi Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), предложенную Intel и Texas Instruments, или 2) передачу в виде сплошного спектра – DS-UWB (*аббр. от англ. Direct Sequence UWB*) от компании Motorola. Тем не менее спецификация MB-OFDM была принята организацией WiMedia Alliance для разработки беспроводного USB, а DS-UWB не нашла применения. Стандарт IEEE 802.15.3a так и остался проектом.

Что касается устройств, соответствующих MB-OFDM, то в 2007 г. они появились на рынке, но в 2008 г. продажи резко упали, а в 2010 г. прекратила свою деятельность организация WiMedia Alliance. Ситуация объясняется в частности тем, что падение скорости передачи реальных устройств при высокой битовой скорости составило 80 % уже на расстоянии 30 см от передатчика, при этом процесс подключения устройств к компьютеру оказался неудобным, существовали и другие препятствия. В то же время возросли возможности Wi-Fi и Bluetooth [12]. В 2008 г. появилась организация UWB Alliance, учредителями которой стали Hyundai, Kia, Decawave (ныне Qorvo) и другие компании. Организация участвовала в разработке современных версий стандарта IEEE 802.15.4, т. е. по ее идеологии в настоящее время идет развитие RTLS на базе УКИ.

Описанное положение дел объясняет барьеры, стоящие на пути к высокой битовой скорости, а также позицию производителей чипов, выбирающих ограниченный ряд скоростей (110, 850, 6800 кбит/с) и частот повторения импульсов (16 и 64 МГц) для обеспечения высокой помехозащищенности и радиуса действия в пределах 55–290 м за счет «упаковки» импульсов в пачки и символы в различных вариантах. Следует заметить, что в ГОСТ Р 58082-2018 и международных стандартах-источниках указана также более высокая битовая скорость 27,24 Мбит/с, при которой символ имеет очень малую длину – 32 нс, один импульс в пачке (при $f = 64$ МГц) и малые защитные интервалы (по 8 нс). При этом вероятность помех от переотраженных сигналов повышается, тем не

менее существует, как минимум, один известный производитель чипа, рассчитанного на скорость передачи 27,24 Мбит/с при частотах повторения импульсов до 64 МГц – компания MKSemi (США – Китай), производящая чип MR8000¹⁰.

В 2020 г. была предпринята попытка преодолеть описанные барьеры с помощью нового стандарта IEEE 802.15.4z. Дело в том, что частота 64 МГц относится к режиму передачи BPRF (*аббр. от англ. Base Pulse Repetition Frequency* – базовая частота повторения импульсов). В стандарте IEEE 802.15.4z введен еще один режим передачи – HPRF (*аббр. от англ. High Pulse Repetition Frequency* – высокая частота повторения импульсов), использующий частоты 124,8 и 249,6 МГц. Таких частот удалось достичь за счет отказа от комбинированной модуляции BPM-BPSK в пользу одной BPSK, в результате чего пакеты импульсов стали передаваться в обоих BPM-промежутках. При этом технологический барьер, ограничивающий битовую скорость на уровне 27,24 Мбит/с (один импульс в пакете), преодолевается, и появляется возможность ее роста до 31,2 и даже 62,4 Мбит/с. Существует, как минимум, одна микросхема SoC QM35825 фирмы Qorvo (выпуск 2025 г.) с указанными параметрами¹¹, причем режим HPRF имеет примерно в 10 раз лучшую помехоустойчивость, чем BPRF из-за более высокой частоты повторения импульсов (более длинных пакетов) и совершенных схем кодирования [13], а значит большую дальность передачи. Необходимо добавить, что, устройства с повышенным радиусом действия – HRP-ERDEV (*аббр. от англ. High Rate Pulse-Enhanced Ranging Device*) должны поддерживать оба режима (BPRF и HPRF).

Выводы

Защитные интервалы в символе сигнала, модуляция, передача СШП импульсов в виде пакетов, сложная кросс-корреляционная функция, случайный порядок занятия пакетом позиции в символе и другие виды кодирования, а также комплексная поддержка режимов передачи (BPRF + HPRF) защищают приемник от многолучевого распространения и помех, обеспечивая надежную передачу данных при низких показателях отношения сигнал / шум и улучшенные характеристики по помехоустойчивости, битовой скорости и радиусу действия.

Различные методы формирования сигналов (комбинирование, фильтрация, использование несущей) позволяют выбирать центральную частоту и ширину полосы, оптимальные с точки зрения вписывания СП ЭИИМ сигнала в те или иные нормы.

Разные виды рекомендуемого применения (“RTLS” и «Передача данных»), знание взаимосвязи параметров передачи, особенностей формирования спектральных характеристик, а также описанные в статье широкие возможно-

¹⁰ MK8000 Introduction // MKSEMI. 2024. URL: <https://www.firaconsortium.org/sites/default/files/2024-08/MKSEMI%20Intro%20-%20MK8000.pdf> (дата обращения 20.12.2025).

¹¹ QM35825. Wireless Chipset by Qorvo // URL: <https://www.everythingrf.com/products/wireless-soc-s/qorvo/787-483-qm35825> (дата обращения 24.02.2025).

сти настроек позволяют принимать решения, обеспечивающие рост устойчивости к многолучевому распространению, воздействию шумов и помех и, как следствие, увеличение радиуса действия и снижение стоимости внедрения (например, за счет сокращения количества анкеров при увеличении дальности передачи).

Современная компонентная база позволяет выбрать лучший режим из многих вариантов при настройке, исходя из требований заказчика и результатов тестирования. При этом максимальная битовая скорость, обеспечиваемая интегральной микросхемой SoC QM35825 производства компании Qorvo, для RTLS составляет 62,4 Мбит/с. Дальнейшее повышение скорости (быстродействия) без ущерба для дальности передачи возможно двумя основными путями:

– решением довольно сложной задачи – приема полезного сигнала на фоне многолучевого распространения и сокращения длительности символа за счет защитных интервалов [8];

– повышением частоты следования импульсов выше максимальной, оговоренной стандартом IEEE 802.15.4z (249,6 МГц).

В обоих случаях необходимо применение более помехоустойчивых схем кодирования, фильтрации, формирования оптимальных спектров сигналов.

Ослабление в 2022 г. норм ГКРЧ по СП ЭИИМ до уровня требований FCC (–41,3 дБм/МГц) в полосе частот 6240–6740 МГц для любых устройств – несомненный прогресс в вопросах разработки и внедрения СШП RTLS в России.

Судя по регулярно выходящим новым стандартам серии IEEE 802.15.4, UWB Alliance активно развивает технологию связи с УКИ: так, согласно стандарту IEEE 802.15.4z одновременно с ростом скорости передачи в 10 раз повышается помехоустойчивость канала, что существенно увеличивает дальность передачи. При этом альянс и не отказывается от достижения скорости передачи 480 Мбит/с.

Литература

1. Лурье С. Сверхширокополосная связь UWB: что это такое и для чего это нужно? // ixbt.com. 2004. URL: <https://www.ixbt.com/comm/UWB/UWB.shtml> (дата обращения 20.12.2025)

2. Coppens D., Shahid A., Lemey S., Herbruggen B. V., Marshall C., et al. An Overview of UWB Standards and Organizations (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability Aspects and Future Research Directions // IEEE Access. 2022. Vol. 10. PP. 70219–70241. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3187410

3. Кузьмин Л. В. Характеристики беспроводных систем связи на сверхширокополосных хаотических радиоимпульсах в условиях реальных каналов // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь»: сборник докладов (26–30 октября 2009 г., Москва). М.: ИРЭ РАН, 2009. С. 499–503.

4. Быстров Р. П., Черепенин В. А. Теоретическое обоснование возможностей применения метода генерации мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения при создании радиолокационных систем

электронной борьбы (РЭБ) для поражения объектов // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 4. С. 3. EDN: MSPQKD

5. Серебренников Л. Я., Чигринец В. А. Комбинированные методы приема составных шумоподобных сигналов в защищенных системах связи // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2004. № 3. С. 49–56. EDN: THUHID

6. Манохин А. Е. Многоканальные радиосистемы передачи информации с комбинированным разделением каналов: электронное текстовое издание. Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2013. 21 с. URL: https://study.uufu.ru/Aid/Publication/11597/1/Manohin_1.pdf (дата обращения 20.12.2025)

7. Ефремова Е. В., Дмитриев А. С., Кузьмин Л. В. Измерение расстояния между излучателем и приемником в беспроводном канале связи при помощи сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов // Письма в Журнал технической физики. 2019. Т. 45. № 17. С. 3–7. DOI: 10.21883/PJTF.2019.17.48214.17865. EDN: KJYDOW

8. Калинин В. О., Носов В. И. Оценка параметров короткоимпульсной сверхширокополосной системы связи // Вестник СибГУТИ. 2011. № 3. С. 73–85. EDN: OJXLHF

9. Khalesi H., Ghods V. An Optimized IR-UWB Communication System with Interference Reduction on a Narrowband System Using Genetic Algorithm // Wireless Personal Communication. 2021. Vol. 118. PP. 447–460. DOI: 10.1007/s11277-020-08023-5. EDN: BZLGMC

10. Grakhova E. P., Rommel S., Jurado-Navas A., Sultanov A. Kh., Vegas Olmos J. J., et al. First Experimental Impulse-Radio Ultra-Wideband Transmission under the Russian Spectral Emission Mask // Electronics Letters. 2016. Vol. 52. Iss. 10. PP. 877–879. DOI: 10.1049/el.2016.0635

11. Dhar S. K., Chakraborty Sh., Biswas P. 3.51pJ/pulse/1.2V CMOS IR-UWB Transmitter // IJCSI International Journal of Computer Science Issues. 2012. Vol. 9. Iss. 6. No 1. PP. 237–243. DOI:10.1049/el.2016.0635

12. Kaiser C. What went wrong with wireless USB // Old Vintage Computing Research. 03.05.2025. URL: <https://oldvcr.blogspot.com/2025/05/what-went-wrong-with-wireless-usb.html> (дата обращения 20.12.2025)

13. Корчагин Ю. Э., Титов К. Д., Петров Ю. Г., Кондратович П. А. Исследование помехоустойчивости сверхширокополосных средств связи стандарта IEEE 802.15.4 при воздействии широкополосных помех // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 11. С. 6. DOI: 10.30898/1684-1719.2024.11.14. EDN: ZXYLHV

**Статья поступила 25 ноября 2025 г.
Одобрена после рецензирования 22 декабря 2025 г.
Принята к публикации 23 декабря 2025 г.**

Информация об авторах

Белов Антон Андреевич – студент 2-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного морского технического университета.

E-mail: belov-anton2014@yandex.ru.

Хуторная Екатерина Викторовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. E-mail: hutorianka@yandex.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2025-13-3-48-69>

EDN: YGYFAW

A Study of Control Methods for Improving Key Parameters of Ultra-Wideband Real-Time Local Positioning Systems

 A. Belov ,  E. Khutorная

Saint Petersburg State Marine Technical University,
St. Petersburg, 190121, Russian Federation

Problem statement. Ultra-wideband technologies based on the transmission of pulsed signals with a spectral width of 500 MHz and higher, unlike other wireless communication technologies (Wi-Fi, BLE, nanoNET), provide high localization accuracy (10–30 cm) and bit rates (up to 27.24 Mbps with potential for growth) for local positioning. However, the transmission range rapidly decreases with increasing bit rate, and the increase in transmitter power is limited by the standards for the spectral density of equivalent isotropically radiated power. Nevertheless, due to their advantages, ultra-wideband technologies are in high demand for solving problems such as collision avoidance for moving vehicles, robot control, providing access to hazardous equipment, and, in general, for building multi-task real-time positioning systems. Therefore, there is currently a rapid adoption of ultra-wideband real-time positioning systems or hybrid systems that necessarily incorporate ultra-wideband solutions, despite their relatively high cost. At the same time, chip manufacturers and system designers are constantly improving their key parameters: localization accuracy, transmission speed, and range. Ultra-wideband modules are also integrated into smartphones and enable high-precision navigation and the search for tag-enabled items. Under these conditions, it is crucial for designers to understand the capabilities and limitations of ultra-wideband positioning, correctly assess the impact of influencing factors, and the development trends of the regulatory and component base. This work is intended to formulate methodological aspects of this understanding, which is its **relevance**. **The goal of the work** is to explore the possibilities of improving the key parameters of ultra-wideband real-time positioning systems through tuning methods for the purposes of design and maintenance. **Methods used:** analysis of regulatory and component development trends, study of the influence of transmission parameters and spectral characteristics of signals on key parameters of ultra-wideband real-time positioning systems, and exploration of the capabilities of different modes and settings. **Novelty:** control parameters affecting the transmission range of ultra-wideband signals without sacrificing bit rate are systematized. **Result:** the identified relationships between module settings and key parameters of ultra-wideband real-time positioning systems will improve the operational characteristics of the implemented systems. **Practical significance:** the presented research can be used to support classes on the study of scenarios for the construction and operation of ultra-wideband real-time positioning systems, the selection of the best transmission modes, spectral structures of signals, settings, and component base for various tasks during system design and maintenance.

Keywords: ultra-short pulses, ultra-wideband communication, local real-time positioning system

References

1. Lurie S. Ultra-Wideband Communication (UWB): What It Is and What It Is Used for? // ixbt.com. 2004. (in Russian) URL: <https://www.ixbt.com/comm/UWB/UWB.shtml> (Access 20.12.2025)
2. Coppens D., Shahid A., Lemey S., Herbruggen B. V., Marshall C., et al. An Overview of UWB Standards and Organizations (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability Aspects and Future Research Directions // IEEE Access. 2022. Vol. 10. PP. 70219–70241. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3187410
3. Kuzmin L. V. Characteristics of Wireless Communication Systems on Ultra-Wideband Chaotic Radio Pulses in Real Channel Conditions // Proceedings of the III All-Russian Conference “Radar and Radio Communication” (October 26–30, 2009, Moscow). Moscow: Institute of Radio Electronics RAS Publ., 2009. PP. 499–503. (in Russian)
4. Bystrov R. P., Cherepenin V. A. Theoretical Justification of the Potential Applications of the Method of Generating Powerful Nanosecond Electromagnetic Pulses in the Creation of Electronic Warfare (EW) Radar Systems for Targeting Objects // Journal of Radio Electronics. 2010. Iss. 4. P. 3. (in Russian) EDN: MSPQKD
5. Serebrennikov L. J., Tchigrinets V. A. Combined Methods of Reception Aggregate Signal in the Protected Communication Systems // Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2004. Iss. 3. PP. 49–56. EDN: THUHID (in Russian)
6. Manokhin A. E. Multichannel Radio Information Transmission Systems with Combined Channel Division. Yekaterinburg: Ural Federal University Publ., 2013. 21 p. (in Russian) URL: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/11597/1/Manohin_1.pdf (Access 20.12.2025)
7. Efremova E. V., Dmitriev A. S., Kuzmin L. V. Measuring the Distance Between an Emitter and a Receiver in the Wireless Communication Channel by Ultrawideband Chaotic Radio Pulses // Technical Physics Letters. 2019. Vol. 45. Iss. 9. PP. 853–857. DOI: 10.1134/S1063785019090037. EDN: WVJIWY
8. Kalinin V. O., Nosov V. I. Estimation of Short-Impulse UWB Systems’ Parameters // Vestnik SibGUTI. 2011. Iss. 3. PP. 73–85. (in Russian) EDN: OJXLHF
9. Khalesi H., Ghods V. An Optimized IR-UWB Communication System with Interference Reduction on a Narrowband System Using Genetic Algorithm // Wireless Personal Communication. 2021. Vol. 118. PP. 447–460. DOI: 10.1007/s11277-020-08023-5. EDN: BZLGMC
10. Grakhova E. P., Rommel S., Jurado-Navas A., Sultanov A. Kh., Vegas Olmos J. J., et al. First Experimental Impulse-Radio Ultra-Wideband Transmission under the Russian Spectral Emission Mask // Electronics Letters. 2016. Vol. 52. Iss. 10. PP. 877–879. DOI: 10.1049/el.2016.0635
11. Dhar S. K., Chakraborty Sh., Biswas P. 3.51pJ/pulse/1.2V CMOS IR-UWB Transmitter // IJCSI International Journal of Computer Science Issues. 2012. Vol. 9. Iss. 6. No 1. PP. 237–243. DOI:10.1049/el.2016.0635.
12. Kaiser C. What went wrong with wireless USB // Old Vintage Computing Research. 03.05.2025. URL: <https://oldvcr.blogspot.com/2025/05/what-went-wrong-with-wireless-usb.html> (Access 20.12.2025)

13. Korchagin Yu. E., Titov K. D., Petrov Yu. G., Kondratovich P. A. The Noise Immunity of IEEE 802.15.4 Standard Radio Communication Systems under the Interference Effect of Wideband Noise // Journal of Radio Electronics. 2024. Iss. 11. P. 6. DOI: 10.30898/1684-1719.2024.11.14. (in Russian) EDN: ZXYLHB

Information about Authors

Belov Anton – 2nd Year Master’s Student (Saint Petersburg State Marine Technical University). E-mail: belov-anton2014@yandex.ru

Khutornaia Ekaterina – Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automatic Control and Onboard Computing Systems (Saint Petersburg State Marine Technical University).
E-mail: hutorianka@yandex.ru