

## **Стандарты связи для сверхширокополосных низкоскоростных беспроводных персональных сетей**

В.В. Ицков

*Институт радиотехники и электроники им В.А. Котельникова РАН  
125009, г. Москва, ул. Моховая 11/7.  
E-mail: [chaos@cplire.ru](mailto:chaos@cplire.ru)*

*В работе представлен обзор стандартов связи для низкоскоростных персональных СШП сетей, который фокусируется на характеристиках СШП физического уровня, а также функционала сетей в целом. Описан предшествующий нормативный документ, первый стандарт, а также дальнейшее развитие стандарта до современного состояния.  
Ключевые слова: стандарты беспроводной связи, сверхширокополосный, низкоскоростные персональные беспроводные сети.*

## **Communication standards for ultrawideband low-rate wireless personal area networks**

V.V. Itskov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS.*

*The paper provides an overview of communication standards for LR-WPAN UWB networks, which focuses on describing the characteristics of UWB PHY, as well as the functionality of networks in general. The appearance of the precursory normative document and the first standard, as well as the further evolution of the standard to the current state are described.  
Keywords: wireless communication standards, UWB, LR-WPAN*

### **Введение**

Первые исследования в области сверхширокополосной (СШП) беспроводной связи начались еще в 60-годы [1], однако активная работа по их развитию и стандартизации стартовала в начале 2000-х годов. С тех пор появилась целая серия стандартов по СШП связи, позволяющая применять СШП решения для широкого круга прикладных задач.

Разнообразие СШП сигналов, различающихся своими свойствами, предоставляет возможность выбора определенных типов этих сигналов для решения конкретных групп задач и способствует расширению областей их применения. Среди общих преимуществ СШП связи, во-первых, стоит отметить относительную невосприимчивость к многолучевому замиранию в отличие от традиционных систем на основе несущей, сети СШП обладают исключительной безопасностью и надежностью передачи данных, из-за высокой эффективности передачи данных устройства СШП расходуют минимальное количество энергии на 1 бит передаваемой информации, что позволяет полевым мобильным устройствам функционировать многие годы в автономном режиме от одной миниатюрной батареи.

Производители начали предлагать интегрированные решения после выхода первого стандарта по СШП связи (поправка IEEE 802.15.4a-2007 [9]). Например, таким решением был чип DWM1000 от компании Deca Wave [2]. Однако, широкое применение СШП решений началось уже после выхода поправки IEEE 802.15.4z-2020 [14], и первой большой компанией, внедрившей СШП чипы в свои продукты, стала

Apple (чип Apple U1) [3]. За ней последовали компании Samsung [4], Xiaomi и другие. Стоит отметить, что все заявленные продукты используют технологию Ультракоротких Импульсов УКИ и серий таких импульсов в диапазоне частот от 3.1 до 10.6 ГГц [5].

В данной работе кратко рассматривается эволюция характеристик СШП физического уровня в стандартах для низкоскоростных беспроводных персональных сетей (Low Rate Wireless Personal Area Networks LR-WPAN), а также описываются цели этих изменений.

### **Первый регламент по СШП сигналам**

Впервые параметры сверхширокополосных сигналов или СШП (Ultra Wide Band UWB) были регламентированы документом Федеральной Комиссии по Связи (Federal Communications Commission FCC), который являлся дополнением (Part 15) правил комиссии, касающимся СШП сигналов, и был опубликован в 2002 году [6]. Это дополнение не являлось полноценным стандартом, в нем скорее давались некоторые определения, предлагались сферы использования и описывались диапазоны и маски допустимой спектральной плотности. В частности, были выделены частоты для нелицензируемой СШП связи и сформулировано определение СШП сигналов, как сигналов, у которых относительная полоса частот больше 0.20 или полоса частот шире 500 МГц. На тот момент в качестве примера физического уровня передачи были описаны только УКИ.

Для предотвращения интерференции с уже существующими сигналами были введены регламенты использования СШП устройств в трех таких областях, как:

- 1) построение изображений, включающее в себя:
  - подповерхностные радары (с частотами до 960 МГц или 1.99 – 10.6 ГГц),
  - радары для детектирования объектов за стенами и препятствиями (с частотами до 960 МГц или 1.99 – 10.6 ГГц),
  - системы наблюдения (с частотами 1.99 – 10.6 ГГц),
  - медицинские системы построения изображений (с частотами 3.1 – 10.6 ГГц);
- 2) радарные системы для транспорта с направленными антеннами в диапазоне 22-29 ГГц;
- 3) системы связи и измерений для гражданского использования с частотами 3.1 – 10.6 ГГц.

### **Первый стандарт**

В 2003 году был опубликован базовый вариант стандарта IEEE 802.15.4 [7]. Целью этого документа стало формулирование стандарта беспроводной связи малого радиуса действия с низкой скоростью передачи для относительно простых устройств с малой стоимостью и низким потреблением, которые посредством механизмов, описанных в нем, смогут объединяться в низкоскоростные беспроводные персональные сети – так называемые Low Rate Wireless Personal Area Networks LR-WPAN. Стандарт определяет физический слой (PHY) и уровень управления доступом к среде (MAC). Слои более высокого уровня им не регламентированы.

Данный стандарт определял два типа устройств – полнофункциональные устройства FFD и устройства с ограниченной функциональностью RFD. Полнофункциональные устройства могут работать в качестве координатора беспроводной персональной сети, координатора или простого узла сети. Устройства с ограниченной функциональностью ограничены в ресурсах и способны выступать только в качестве узла сети. Топология сети предусматривает подключения типа звезда (star) и точка-точка (peer-to-peer). При первом типе подключение осуществляется между координатором беспроводной персональной сети и остальными устройствами.

При втором типе все FFD в сети могут связываться друг с другом, а устройства RFD могут быть связаны только с координатором беспроводной персональной сети. Топологии и типы устройств сохранялись в последующих ревизиях.

Через некоторое время после появления базового стандарта выяснились некоторые трудности его применения и неточности в описании. В связи с этим была выпущена первая ревизия IEEE 802.15.4-2006 [8]. В 2007 году в дополнение к этой ревизии была разработана поправка IEEE 802.15.4a-2007, что в итоге привело к появлению первого стандарта связи, в котором для реализации физического уровня используются сверхширокополосные сигналы [9]. Основным типом импульсов для передачи являются УКИ. В качестве опциональных типов импульсов упоминаются импульсы с Линейной Частотной Модуляцией ЛЧМ (chirps), Короткие Импульсы КИ (CS pulses) и линейная комбинация импульсов (LCP). По предложению ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и компании Samsung в качестве дополнительного физического уровня в данную поправку стандарта были включены хаотические радиоимпульсы (Annex H).

Диапазон частот для UWB PHY 3.1 – 10.6 ГГц совпадает с диапазоном, который был выделен для гражданских и коммерческих систем связи в документе FCC 2002 года. Он разделен на поддиапазоны: субгигагерцовый 249.6 МГц – 749.6 ГГц, нижний 3.1 – 4.8 ГГц и верхний 6 – 10.6 ГГц. Внутри них определены 16 каналов, 3 из которых являются обязательными (один внутри каждого поддиапазона). Обязательная скорость передачи данных составляет 851 кБит/с с опциональными скоростями 110 кБит/с, 6.81 МБит/с и 27.24 МБит/с. Модуляция реализована посредством комбинации модуляции по позиции пачки импульсов- burst'a (BPM) и двухпозиционной фазовой модуляции (BPSK) с тремя возможными частотами следования импульсов (PulseRateFrequencyPRF) 3.9 МГц, 15.6 МГц и 62.4 МГц. Для хаотических радиоимпульсов в стандарте описан способ модуляции по наличию/отсутствию импульса (ООК).

Благодаря появлению UWB сигналов после этой поправки в стандарт добавлен новый важный функционал – возможность довольно точного измерения расстояний и положения узлов сети. На уровне MAC произошли изменения, позволяющие обеспечить эти измерения. Описан метод измерения расстояний – TWR (TwoWayRanging).

#### **Появление класса устройств с пониженной скоростью передачи и упрощенными типами модуляции**

Вторая ревизия стандарта была опубликована в 2011 году и называлась IEEE 802.15.4-2011 [10]. В поправке к этой ревизии IEEE 802.15.4f-2011 добавили два физических уровня для радиочастотной идентификации (Radio Frequency Identification– RFID), переработали структуру описания стандарта, убрали дополнительный физический уровень на хаотических радиоимпульсах (Annex H) [11]. Сети RFID в основном обладают такими особенностями, как значительное превосходство в количестве устройств-меток по сравнению с устройствами-приемниками, требование к низкой стоимости и низкому потреблению каждого устройства-метки, короткая длительность пакета (малое количество данных). Поэтому эти оптимизированные физические уровни характеризуются применением простой модуляции, отсутствием или значительным упрощением кодирования сигнала, отсутствием механизмов для сглаживания спектра. Одним из них является СШП физический уровень (Low Rate Pulse Repetition Frequency LR PRFUWBPHY) в диапазоне 6289.6 – 9185.6 МГц со скоростью 31.25 Кбит/с и модуляции по позиции импульса (PPM), в диапазоне 6289 – 9185.6 МГц со скоростью 250 Кбит/с и модуляцией ООК, и в диапазоне 6289.6 – 9185.6 МГц со скоростью 1000 Кбит/с и также модуляцией

по ООК. Возможные PRF – 1 МГц и 2 МГц. Описаны три режима работы меток – базовый, расширенный и дальнего действия (Base, Extended, Long Range). Они отличаются сценариями использования меток и, как следствие, типом модуляции, кодированием, скоростью данных и энергопотреблением. Авторы отмечают, что LRP UWB физический уровень выигрывает по сравнению с ранее определенным UWB PHY по большей части в задачах с относительно малыми партиями устройств. В таких ситуациях невыгодно запускать производство чипов под конкретную задачу и возможно изготовить устройства из дискретных готовых компонентов. Описаны изменения в MAC уровне для поддержки этих PHY.

В 2015-м году появилась третья ревизия стандарта UWB 802.15.4-2015 [12].

Она объединяла в себя предыдущую ревизию IEEE 802.15.4-2011, семь последующих поправок, а также уточнения и исправления. В этой ревизии для устранения путаницы существующий CSPP физический уровень UWBPHY был переименован в High Rate Pulserepetition frequency UWB или HRPUBW, а недавно добавленный LRPRFUWB – в LRPUBW.

### **Современное положение стандарта**

В 2020-м году появилась четвертая и последняя на сегодняшний день ревизия стандарта IEEE 802.15.4-2020 [13]. В одной из ее поправок IEEE 802.15.4z-2020, добавлены улучшения и дополнения режимов работы LRP UWB и HRP UWB[14].

В HRP UWB физический уровень добавили опциональные режимы HRPF (High) с повышенным средними частотами следования импульсов (PRF) - 124.8 МГц и 249.6 МГц, убрали поддержку 3.9 МГц и 15.6 МГц, а оставшийся обязательный режим 64.2 МГц переименовали в BPRF (Base). После этого для обратной совместимости с устройствами стандарта IEEE 802.15.4a-2007 нужно работать только в этом единственном режиме PRF. Произведены изменения MAC уровня, которые позволяют имплементировать эти улучшения физического уровня и обеспечить работу таких новых функций и алгоритмов измерений, таких как SS-TWR (Single Side Two Way Ranging) и DS-TWR (Double Side Two Way Ranging), которые являются модификацией алгоритмов измерения расстояния в ревизии IEEE 802.15.4a-2007 и позволяют улучшить их точность за счет уменьшения количества пакетов и времени передачи пакета в режимах HRPF. Также для увеличения точности измерения расстояний представлен новый тип периодических преамбул, генерируемых с помощью последовательностей Ипатова, применение которых повышает точность и надежность определения меток времени при измерении времени полета (Time of Flight–ToF).

В следствие ряда изменений произошло значительное улучшение точности и целостности измерения расстояний между устройствами и их позиционирования, а эти дополнительные улучшения названы режимами High Rate Pulse Enhanced Ranging Device (HRP-ERDEV). Добавлена также опциональная возможность измерения расстояний с помощью LRP UWB. На основе этой поправки разработаны такие протоколы, как FiRa, Apple – Nearby Interaction и Omlox, которые регламентируют слои более высокого уровня.

Стоит также упомянуть, что уже создана рабочая группа по работе над следующей поправкой P802.15.4ab, которая посвящена дальнейшим улучшениям UWB PHY и MAC[15]. Авторы обещают добавить поддерживаемые каналы и скорости передачи данных, доработать методы кодирования для повышения точности измерения расстояний, сохранив обратную совместимость с IEEE 802.15.4z-2020.

## **Выводы**

За два десятилетия интенсивного развития нормативной базы в области средств связи на основе СШП сигналов достигнут серьезный прогресс, который проявляется в увеличении типов сверхширокополосных сигналов, расширении частотных диапазонов, добавления функционала и сфер использования сетей на их основе.

## **Литература**

1. Fontana R.J. A Brief History of UWB Communications. Germantown: Multispectral Solutions, Inc. 2000. [www.multispectral.com/hystory/html](http://www.multispectral.com/hystory/html)  
<https://ru.scribd.com/document/92157802/A-Brief-History-of-UWB-Communications>
2. Официальный сайт Decawave, документация на модуль DWM1000.  
<https://www.decawave.com/sites/default/files/resources/dwm1000-datasheet-v1.3.pdf>
3. Официальный сайт Apple для разработчиков, информация о применении СШП технологии в устройствах Apple.  
<https://support.apple.com/guide/security/ultra-wideband-security-sec1e6108efd/web>
4. Kim K. J. // Samsung Newsroom. Suwon-si: Samsung Electronics Ltd., 12. Oct. 2020.  
<https://news.samsung.com/global/samsung-expects-uwband-to-be-one-of-the-next-big-wireless-technologies>
5. Coppens D., De Poorter E., Shahid A. et al. An Overview of Ultra-WideBand (UWB) Standards (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability. Aspects and Future Research Directions. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.02190>
6. Revision of part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems, First Report and Order. ET Docket 98-153, FCC 02-48. – Washington: Federal Communications Commission (FCC), 2002.  
[https://www.fcc.gov/Bureaus/Engineering\\_Technology/Orders/2002/fcc02048.pdf](https://www.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Orders/2002/fcc02048.pdf)
7. 802.15.4-2003 - IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 15: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN). N.Y.: IEEE, 2003. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4299496>
8. 802.15.4-2006 - IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). N.Y.: IEEE, 2006. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1700009>
9. 802.15.4a-2007 - IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs):Amendment 1: Add Alternate PHYs. N.Y.: IEEE, 2007. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1237559>
10. 802.15.4-2011 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). N.Y.: IEEE, 2011. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6012487>
11. 802.15.4f-2012 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-- Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 2: Active Radio Frequency Identification (RFID) System Physical Layer (PHY). N.Y.: IEEE, 2012. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6188488>
12. 802.15.4-2015 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. N.Y.: IEEE, 2016. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7460875>
13. 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. N.Y.: IEEE, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9144691>

14. 802.15.4z-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks--Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. N.Y.: IEEE, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9179124>

15. P802.15.4ab - Standard for Low-Rate Wireless Network Amendment: Enhanced Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Medium Access and Control (MAC) sublayer Enhancements. Active PAR. <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4ab/10694/>