

## ТЕХНОЛОГИЯ LoRa КАК СРЕДСТВО ЦИФРОВОЙ РАДИОТЕЛЕМЕТРИИ ДЛЯ IoT УСТРОЙСТВ

**Карманов А.А., Савостин А.А.**

*(СКУ им. М. Козыбаева)*

Термин IoT, (Интернет вещей), подразумевает коллективную сеть, которая обеспечивает связь устройств с Интернетом, а также устройств друг с другом [1]. Благодаря разнообразию современных цифровых микросхем, датчиков и исполнительных устройств существуют десятки миллиардов устройств, подключенных к сети Интернет.

Взаимодействие этих устройств друг с другом и с сетью Интернет было бы невозможным без цифровых средств радиотелеметрии, комплексному обзору одного из которых посвящена настоящая статья.

Анализ технических возможностей современных технологий беспроводной связи (LTE-M, NB-IoT, EC-GSM-IoT, LoRa, Symphony Link, Sigfox и др.) позволяет сделать вывод, что с точки зрения оптимального баланса между энергопотреблением, скоростью обмена, используемым спектром частот, бюджетом канала связи и доступностью аппаратных решений, наиболее предпочтительным средством радиотелеметрии для IoT устройств является технология LoRa. Ниже изложены аргументы в пользу заявленного утверждения

На сегодняшний день LoRa является одной из самых универсальных технологий, принадлежащей к категории несотовых стандартов. Технология поддерживается консорциумом LoRa Alliance, состоящим более чем из 500 компаний, включая Cisco, IBM, SK Telecom и др., что обеспечивает разработчику средств радиотелеметрии широкий выбор доступных аппаратных решений, реализующих технологию, а также её непрерывное развитие и совершенствование [2].

Технология LoRa базируется на методе модуляции с широкополосным расширением и различных вариациях линейной частотной модуляции (CSS), с прямой коррекцией ошибок (FEC), что значительно улучшает чувствительность приемника. Как и у других методов расширенной модуляции, LoRa использует широкую пропускания канала, что делает его устойчивым к канальным помехам и невосприимчивым к смещениям, вызванным неточностью настройки частот при использовании бюджетных источников тактирования [3].

Технология LoRa позволяет демодулировать сигналы с уровнями на 21 дБ ниже уровня шума, а для большинства систем с частотной манипуляцией (FSK) необходима мощность сигнала на 8-10 дБ выше уровня шума для корректной демодуляции.

LoRa определяет физический уровень (PHY), используемый с различными протоколами и сетевыми архитектурами, такими как сеть, звезда и точка-точка [2].

Радиоинтерфейс LoRa характеризуется шириной спектра радиосигнала  $BW$ , значительно превышающей скорость передачи данных  $R_b$  ( $BW \gg R_b$ ), а также корреляционной функцией, которая существенно отличается от корреляционной функции узкополосного радиосигнала.

Высокая устойчивость к помехам и точность временной синхронизации радиосигнала достигается за счёт его частотной избыточности и узкой корреляционной функции. Для передачи данных в системе LoRa используются методы расширенного спектра сигнала, такие как ЛЧМ и CSS (расширение частоты сигнала посредством chirp-модуляции), где CSS радиосигнал может как возрастать (up-chirp), так и уменьшаться (down-chirp).

Значение коэффициента расширения спектра (SF) определяет длину символа данных в битах, передаваемого через радиоинтерфейс за время, необходимое для передачи одного такого символа ( $T_{sym}$ ).

На Рисунке 1 показано, как ЛЧМ-сигнал выглядит во временной области, а на Рисунках 2 и 3 показан спектр этого сигнала с шириной полосы равной 125 кГц и коэффициентом расширения спектра равным 128 (SF=7) и 4096 (SF=12) соответственно [4].

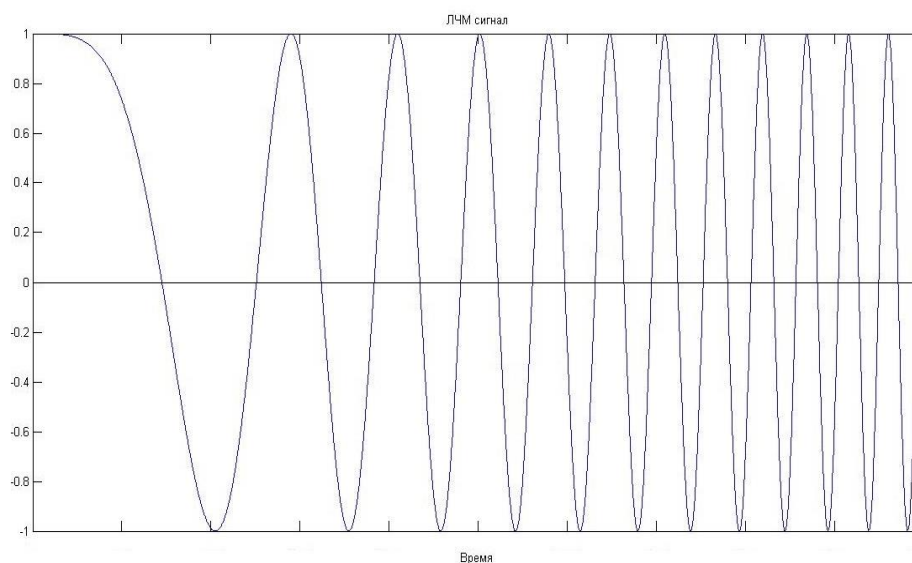


Рисунок 1. – Сигнал ЛЧМ

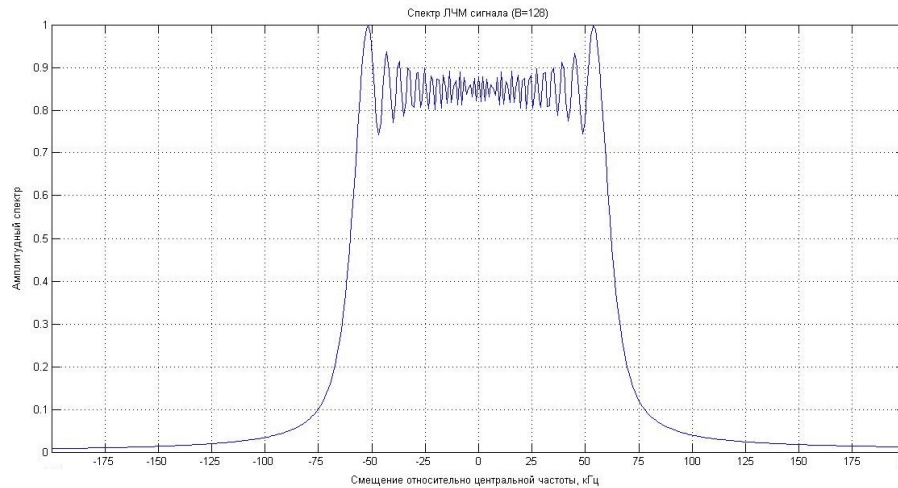


Рисунок 2. – ЛЧМ спектр при  $SF = 7$

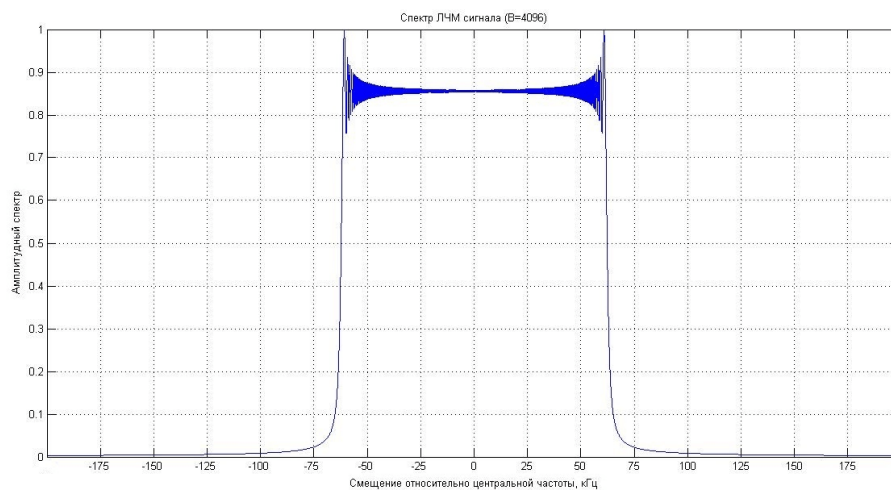


Рисунок 3. – ЛЧМ спектр при  $SF = 12$

Синхронизация передатчика и приёмника определяет границы передачи-приёма целых блоков данных и отдельных символов. Технология передачи LoRa использует асинхронный режим, в котором передатчик может начать отправку радиосигнала в любой момент времени. Для обнаружения активности передатчика и выполнения символьной синхронизации приёмник использует преамбулу, содержащую последовательность символов.

Длина преамбулы должна быть не менее  $T_1 + 2 \cdot T_2$ , где  $T_1$  определяет максимальное время "сна" приёмника, а  $T_2$  - время поиска преамбулы. После преамбулы следует слово синхронизации (Sync Word) и блок данных физического уровня.

Длина слова синхронизации может быть настроена в диапазоне от 1 до 8 байт. Значения Sync Word определены в спецификации LoRa. Высокая помехоустойчивость радиоканала LoRa является его основным преимуществом.

Функционирование детектора сигнала LoRa в условиях аддитивного белого гауссовского шума показано на Рисунках 4 и 5.

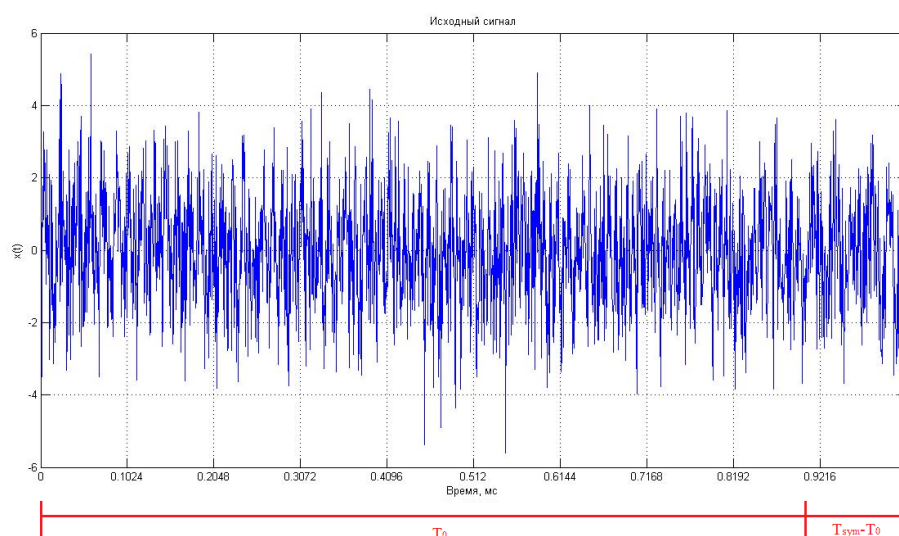


Рисунок 4. – Исходный сигнал в условиях белого гауссовского шума

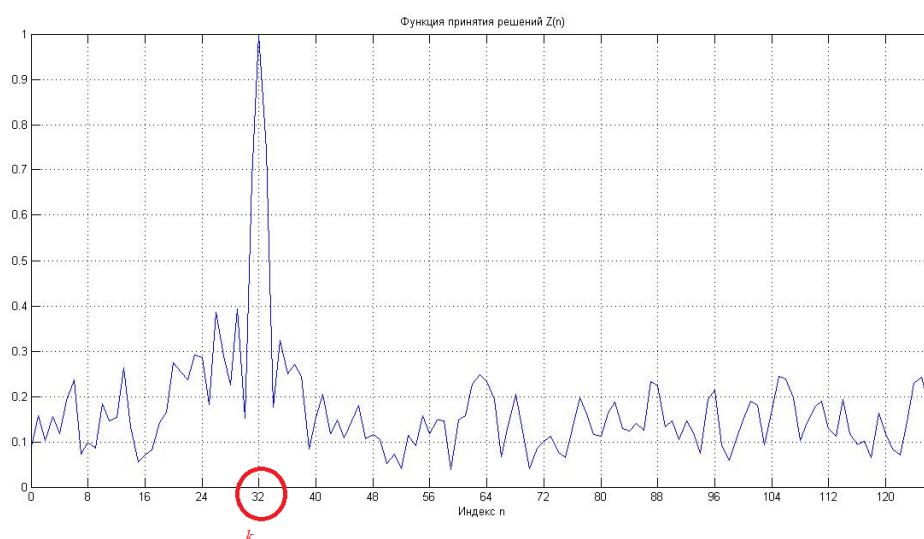


Рисунок 5. – Функция принятия решения

В ходе сравнительного анализа доступных аппаратных решений для реализации LoRa радиолinii рассмотрены наиболее распространённые микросхемы от ведущих производителей: «Analog Device», «Maxim», «Microchip», «RF Monolithics Inc.», «Semtech».

В результате сделан вывод о том, что наиболее оптимальными по критерию отношения цена/функционал являются микросхемы приёмопередатчиков компании «Semtech» и их аналоги, построенные с использованием гибридных технологий и имеющие в своём составе модем и встроенный усилитель мощности.

Эти микросхемы имеют большую базу данных программного обеспечения с открытым исходным кодом для разработки приложений. Диапазон рабочих частот

включает частоты 137 – 175 МГц, 410 – 525 МГц, 862 – 1020 МГц. Имеется возможность выбора видов модуляции и кодовых конструкций. Используются стандартные типы последовательных интерфейсов.

Экспериментальные радиолинии испытаны на микросхемах SX1276 с параметрами, рассчитанными с использованием фирменного ПО производителя SX1276 «Semtech Calculator» для оптимальных значений выходной мощности, вида модуляции, ширины полосы пропускания и скорости передачи данных (Таблица 1).

Таблица 1. – Расчётные параметры экспериментальной радиолинии

Параметр SX1276	Значение	
	для диапазона 137 – 175 МГц	для диапазонов 410-525 и 862-1020 МГц
Spreading Factor (SF)	7	9
Bandwidth (BW)	125 кГц	500 кГц
Coding Rate (CR)	2	
Payload Length	32	
Low Data Rate Optimize (DE)	0	
Preamble Length (PL)	10 (total 14.25)	
Implicit Header Mode On (IH)	0	
Sync Word	0 – широковещательный ID 1...51; 53...255 – избирательный ID 52 – зарезервирован производителем	
CRC On Payload	1	
Rx Payload CRC On	1	
Рассчитанные выходные результаты (на основе вышеуказанных настроек):		
Техническая скорость	~ 4,55729 кбит/с	~ 5,85938 кбит/с
Информационная скорость	~ 3,278 кбит/с	~ 3,891 кбит/с
Чувствительность приёмника	минус 123 дБ	
Бюджет канала связи (при мощности 1 Вт)	~150 дБ	

В Таблице 2 приведены результаты работы детектора экспериментальной радиолинии при различных отношениях сигнал/шум (SNR) и коэффициентах расширения спектра (SF).

Таблица 2. – Результаты обнаружения ошибок детектирования сигнала

ОСШ (SNR), дБ	Коэффициент расширения (Spread Factor), %					
	7	8	9	10	11	12
<b>0</b>	0.9	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0
<b>Минус 3,0</b>	0.9	0.6	0.2	0.1	0.1	0.0
<b>Минус 6,0</b>	2.0	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0
<b>Минус 9,0</b>	6.9	1.5	0.2	0.1	0.1	0.0
<b>Минус 12,0</b>	18.0	5.8	1.3	0.1	0.0	0.0
<b>Минус 15,0</b>	42.2	17.6	5.4	0.6	0.1	0.0
<b>Минус 18,0</b>	68.9	44.2	18.0	5.1	1.1	0.1
<b>Минус 21,0</b>	87.5	73.7	49.3	18.9	5.2	0.8

Вышеприведённые данные обмена тестовым трафиком при коэффициенте расширения спектра SF=12 свидетельствуют о возможности корректного демодулирования сигнала, принимаемого на 21 дБ ниже уровня шума (уровень полезного сигнала более чем в 100 ниже уровня шума).

Подобным результатом не может похвастаться ни одна из других, существующих на сегодняшний день технологий беспроводной передачи данных.

### Литература

1. Литвинов, А. В. (2018). Интернет вещей. Новосибирск: Новосибирский государственный университет.
2. Марков, А. А. (2020). Применение LoRaWAN технологии в Интернете вещей. Красноярск: Сибирский федеральный университет.
3. Карташов, С. В., Гуржий, А. С., & Смирнов, М. В. (2017). Исследование технологий беспроводной связи в системах Интернета вещей. Сборник трудов Международной конференции "Управление развитием сложных систем", 168-173.
4. Литвинов, А. В. (2019). Моделирование и анализ алгоритмов модуляции и коррекции ошибок в системах радиотелеметрии Интернета вещей. Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии, 17(2), 89-95.