

УДК 621.391

Обнаружение и идентификация источников сигналов сетей LoRaWAN

Манелис В. Б., Шатилов Д. В., Ашихмин А. В.,
Сладких В. А., Ермаков М. Д.

Постановка задачи: в последние годы активно развиваются технологии удаленного взаимодействия устройств между собой («Интернет вещей»). В частности, широкое распространение получила технология беспроводной передачи данных LoRaWAN. Ее особенностями являются минимальное энергопотребление, относительно невысокая скорость передачи данных, достаточно большая дальность действия, низкая стоимость терминалов. Для планирования и эксплуатации этих сетей, проверки соответствия требований к параметрам передатчиков, контроля зон покрытия, проверки соблюдения частотно-территориального плана операторам сетей и государственным радиочастотным службам необходимо регулярно осуществлять поиск и анализ сигналов LoRaWAN. **Целью работы** является разработка быстродействующего помехоустойчивого алгоритмического комплекса обнаружения и идентификации сигналов LoRaWAN. **Новизна:** представлен полный комплекс процедур обнаружения и обработки сигналов LoRaWAN, включающий прием сообщения и выделение идентификационных данных. Предложенные алгоритмы обнаружения и оценки параметров передачи, частотно-временной и тактовой синхронизации, обеспечивающие разумный компромисс между быстродействием и помехоустойчивостью, обладают элементами новизны. **Результат:** разработан комплекс процедур обработки сигнала LoRaWAN, который позволяет выполнить обнаружение и идентификацию источников сигнала в условиях низких отношений сигнал-шум и существенных частотных и тактовых расстройках. Алгоритмический комплекс успешно протестирован как методом компьютерного моделирования сигналов LoRaWAN с помощью разработанного симулятора (при различных значениях спрединг фактора, ширины полосы, скорости кодирования, длины сообщения, частотных и тактовых расстройках, отношения сигнал-шум), так и на эфирных сигналах. **Практическая значимость:** представленный алгоритмический комплекс обнаружения и идентификации сигналов LoRaWAN предназначен для реализации в цифровых радиоприемных устройствах радиомониторинга. В частности, он используется в российском портативном анализаторе сигналов радиосетей АРСЕНАЛ-И. Анализатор применяется для планирования систем на этапах развертывания и ввода в эксплуатацию, анализа зон покрытия, для радиоконтроля существующих сетей с целью проверки параметров передатчиков и соответствия частотно-территориальному плану.

Ключевые слова: LoRaWAN, алгоритмический комплекс, LoRa модуляция, параметры передачи, преамбула, информационный блок, идентификационные данные.

Введение

В последние годы широкое распространение получили беспроводные системы связи между устройствами различного назначения (Интернет вещей – IoT). Такие системы могут применяться для передачи показаний датчиков,

Библиографическая ссылка на статью:

Манелис В. Б., Шатилов Д. В., Ашихмин А. В., Сладких В. А., Ермаков М. Д. Обнаружение и идентификация источников сигналов сетей LoRaWAN // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 2. С. 64-86. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-2-064-086

Reference for citation:

Manelis V. B., Shatilov D. V., Ashikhmin A. V., Sladkikh V. A., Ermakov M. D. Detection and identification of LoRaWAN network signal sources. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 2, pp. 64-86 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-2-064-086

трансляции изображений и видеоинформации, аппаратной автоматизации в производстве, в приложениях типа «Умный дом» и др. Интернет вещей охватывает множество различных стандартов связи: Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, NB-IoT, SigFox и др.

Одной из наиболее распространенных технологий IoT является LoRaWAN (Long Range Wide Area Networks) [1-3]. Основными элементами сети LoRaWAN являются оконечные устройства, базовые станции (шлюзы) и сервер сети, куда базовые станции ретранслируют сообщения оконечных устройств. Технология LoRaWAN включает в себя закрытый протокол физического уровня (модуляция, помехоустойчивое кодирование и др.) и набор открытых протоколов MAC уровня. Основой физического уровня является LoRa модуляция. Этот вид модуляции с расширением спектра реализуется посредством циклического сдвига ЛЧМ символов (CSS – Chirp Spread Spectrum). Терминалы LoRaWAN характеризуются минимальным энергопотреблением, относительно невысокой скоростью передачи данных, достаточно большой дальностью действия (до 10-15 км) и низкой стоимостью.

В настоящее время во многих странах мира осуществляется интенсивное развертывание глобальных сетей на основе LoRaWAN. Общее число выпущенных терминалов на 2024 год превышает 300 миллионов устройств. В России федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Ростандарт) 22 декабря 2023 г. утвердило стандарт LoRaWAN, который может быть использован для IoT [4]. Поэтому, для планирования и эксплуатации этих сетей, проверки соответствия требований к параметрам передатчиков, контроля зон покрытия, проверки соблюдения частотно-территориального плана операторам сетей и государственным радиочастотным службам необходимо регулярно проводить анализ сигналов LoRaWAN.

На сегодняшний день известно несколько видов оборудования для анализа сигналов LoRaWAN: многоканальный анализатор C-1200 (компании GW Instek), анализаторы RWC5020B, RWC5021P (ReedwoodComm). Кроме того, мировыми производителями аппаратуры радиомониторинга выпускаются устройства тестирования сетей на основе LoRa модуляции: ARF8123AA (Adeunis RF), RAK10701-P (RAKwireless), AN-106 (Shenzhen Winext Technology Co., Ltd.).

Большинство из перечисленного оборудования не обеспечивает прием идентификационных параметров системного уровня, а потому не могут использоваться для решения задач радиоконтроля. Кроме того, анализаторы зарубежного производства имеют высокую стоимость, и их свободное приобретение для российских потребителей не всегда возможно. В этой связи разработка процедур обнаружения и идентификации сигналов LoRaWAN и построение на этой основе отечественных анализаторов является актуальной теоретической и практической задачей. В [5-15] были описаны Российские анализаторы сигналов GSM, cdma2000, UMTS, LTE, 5G, Wi-Fi, DMR, ZigBee и др.

Различным аспектам приема сигналов LoRaWAN посвящены публикации [16-23] и др. Несмотря на отсутствие открытого стандарта, многими авторами были предприняты попытки обратного инжиниринга для вскрытия деталей фи-

зического уровня [16-19]. Наиболее полное описание структуры сигнала, модуляции и кодирования представлено, по нашему мнению, в обзоре [16].

Некоторые публикации [20-23] посвящены критически важным для приема LoRa сигнала вопросам частотно-временной и тактовой синхронизации. Представленные в этих работах алгоритмические решения имеют либо большую сложность реализации и низкое быстродействие, либо недостаточную точность синхронизации, что снижает потенциал помехоустойчивости LoRa модуляции. Кроме того, обзор известной литературы показал отсутствие полного описания процедур обработки сигналов LoRaWAN, а важный для анализа случай приема при неизвестных параметрах передачи (ширина полосы сигнала и спрединг фактор) не освещен вовсе.

В данной статье представлен полный быстродействующий помехоустойчивый алгоритмический комплекс обнаружения и идентификации сигналов LoRaWAN, устойчивый к значительным величинам частотной и тактовой расстройек. Для удобства восприятия статья дополнена описанием особенностей структуры сигнала LoRaWAN, а также примерами обнаружения и приема реального сигнала LoRaWAN.

1. Основные термины

В таблице 1 представлен перечень основных терминов, определений и обозначений, используемых в данной работе и относящихся к узкоспециализированным понятиям телекоммуникаций и обработки сигналов. Более подробное разъяснение терминов приведено в тексте статьи.

Таблица 1 – Определения, обозначения и сокращения

Термин	Определение
ЛЧМ	Линейная частотная модуляция – вид частотной модуляции, при которой частота сигнала изменяется во времени по линейному закону
LoRa	Long Range – физический протокол, включающий модуляцию, помехоустойчивое кодирование и др.
LoRa модуляция	Вид модуляции с расширением спектра, который реализуется посредством циклического сдвига ЛЧМ символов
MAC	Media Access Control – сетевой протокол
DevAddr	End-device address – короткий адрес оконечного устройства текущей сети
DevEUI	End-device identifier – глобальный идентификатор оконечного устройства, присваиваемый на этапе производства
NetID	Network identifier – уникальный идентификатор сети
SF	Спрединг фактор (число передаваемых бит на символ)
BW	Ширина полосы сигнала
β	Скорость изменения частоты LoRa символа
T_s	Длина LoRa символа
N_{up}	Число восходящих ЛЧМ символов преамбулы
γ	Нестабильность опорного генератора
δ	Тактовая расстройка, характеризующая временной уход в отсчетах за один символ

Термин	Определение
L	Количество байт в передаваемом сообщении
CR	Скорость кодирования сообщения
$\text{ceil}(\cdot)$	Ближайшее большее целое

2. Особенности технологии и структура сигнала LoRaWAN

Стандартом LoRaWAN определены радиочастотные диапазоны для различных регионов мира [3]. Для Российской Федерации выделены следующие диапазоны:

- 866 – 868 МГц (RU864-870);
- 864 – 865 МГц (RU864-870);
- 868,7 – 869,2 МГц (RU864-870);
- 433,075 – 434,75 МГц (EU433);
- 916 – 921 МГц (AS923-3) – лицензированный диапазон.

Важнейшими параметрами передачи LoRa сигнала являются спрединг фактор SF (число передаваемых бит на символ) и полоса сигнала BW . Спрединг фактор в общем случае может принимать одно из следующих значений: $SF = 7$, $SF = 8$, $SF = 9$, $SF = 10$, $SF = 11$, $SF = 12$. Полоса сигнала может быть равна $BW = 125$ кГц, $BW = 250$ кГц или $BW = 500$ кГц.

Частота ЛЧМ символов может увеличиваться (восходящие ЛЧМ символы) или уменьшаться (нисходящие ЛЧМ символы). Математически ЛЧМ восходящий немодулированный символ можно записать как

$$s(t) = \exp\left[j \cdot 2\pi \left(f_n + (-BW + \beta t)/2\right)t\right], \quad t \in [0, T_s],$$

где f_n – несущая (центральная) частота радиосигнала, $\beta = BW/T_s$ – скорость изменения частоты LoRa символа, $T_s = 2^{SF}/BW$ – длина LoRa символа, $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

При LoRa модуляции возможно 2^{SF} значений передаваемого символа, соответствующих различным величинам циклического сдвига $s = 0, 2^{SF} - 1$. Таким образом, модулированный LoRa символ (на нулевой частоте) можно представить в виде:

$$s(t) = \begin{cases} \exp\left[j\pi(-BW + \beta t + 2 \cdot s/T_s)t\right], & 0 \leq t < T_s \left(1 - s/2^{SF}\right); \\ \exp\left[j\pi(-3BW + \beta t + 2 \cdot s/T_s)t\right], & T_s \left(1 - s/2^{SF}\right) \leq t < T_s. \end{cases}$$

В качестве примера на рис. 1 приведен модулированный LoRa символ во временной и частотной области.

LoRa модуляция характеризуется высокой избыточностью и помехоустойчивостью, которая растет с увеличением спрединг фактора SF за счет увеличения длительности символа T_s . Минимальное значение рабочего отношения сигнал-шум при идеальной синхронизации варьируется от -7,5 дБ при $SF = 7$ до -20 дБ при $SF = 12$ [18].

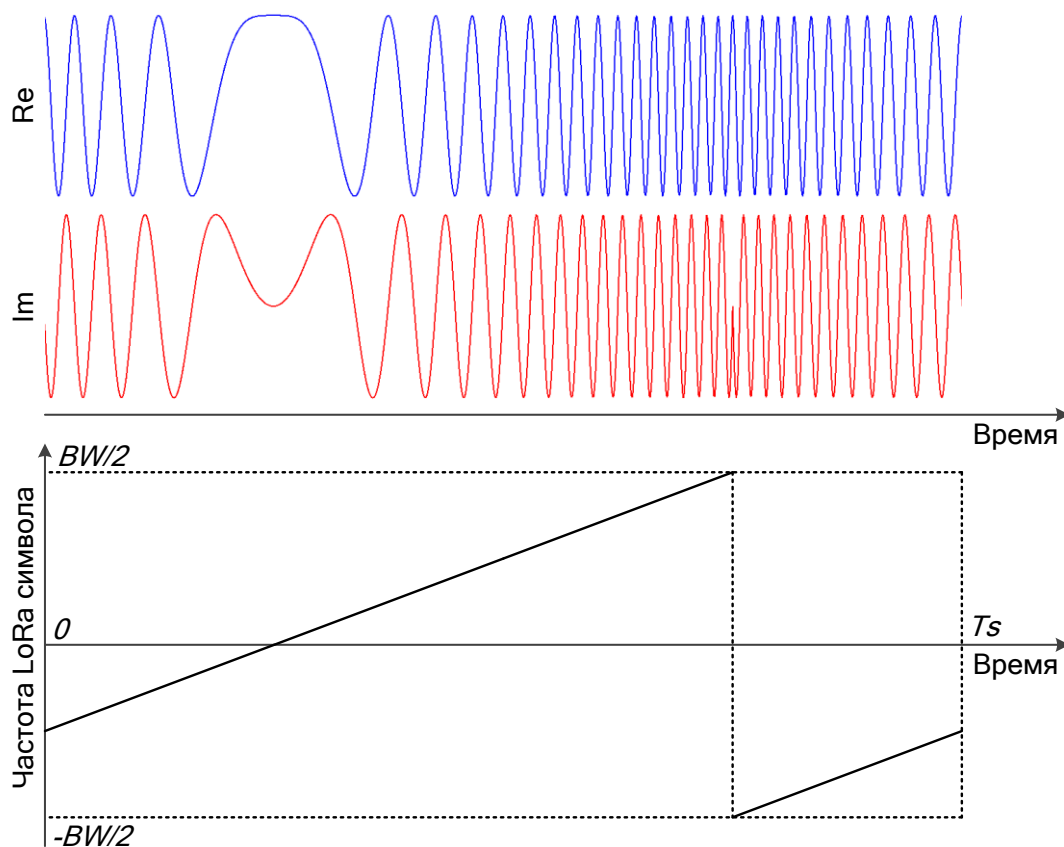


Рис. 1. Пример модулированного LoRa символа

Сигнал LoRaWAN состоит из преамбулы и следующего за ней информационного блока. Структура преамбулы представлена на рис. 2. В начале преамбулы передаются восходящие ЛЧМ символы, количество которых должно быть не менее шести. Они служат для обнаружения сигнала, а также предварительной частотной, временной и тактовой синхронизации. Затем следуют два модулированных LoRa символа, которые несут информацию о типе сети LoRaWAN: приватная или публичная. В конце преамбулы передаются два с четвертью нисходящих ЛЧМ символов, необходимых для окончательной временной и частотной синхронизации.

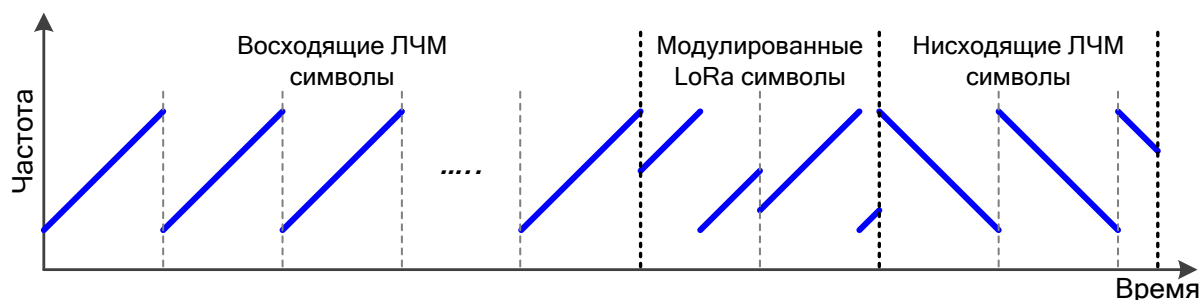


Рис. 2. Структура преамбулы LoRa сигнала

Информационный блок содержит передаваемые, в том числе идентификационные данные. На битовом уровне он в общем случае состоит из заголовка, сообщения и его проверочных бит (рис. 3). При передаче сигнала LoRaWAN заголовков, а также проверочные биты сообщения могут отсутствовать.

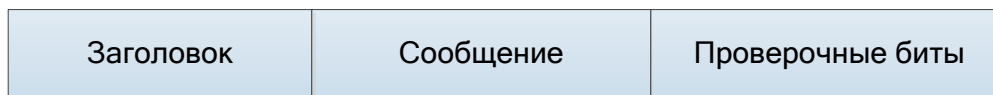


Рис. 3. Структура информационного битового блока LoRa сигнала

Исходный битовый блок заголовка LoRa сигнала (12 бит) содержит информацию о длине сообщения L в байтах (8 бит), наличии/отсутствии проверочных бит (1 бит) и скорости кодирования сообщения CR (3 бита). К этому битовому блоку добавляются 5 проверочных и 3 резервных бит, после чего расширенный блок подвергается кодированию Хэмминга (скорость кодирования $CR = 4/8$), модифицированному диагональному перемежению [16] и обратному преобразованию Грея. Полученные 40 бит отображаются на 8 LoRa символов заголовка.

Исходный битовый блок сообщения (до 255 байт) содержит информацию о типе передаваемого сообщения, направлении передачи (от оконечного устройства к базовой станции или наоборот), сетевом идентификаторе, адресе оконечного устройства и др. Этот битовый блок рандомизируется, после чего к нему добавляются 16 проверочных бит, если они присутствуют. Затем полученный блок подвергается кодированию Хэмминга (возможны 4 значения скорости кодирования: $CR = 4/5$, $CR = 4/6$, $CR = 4/7$, $CR = 4/8$), диагональному перемежению и обратному преобразованию Грея. Сформированные биты группируются в символьные слова по SF бит каждое. Для повышения помехоустойчивости передаваемых сообщений предусмотрена возможность использования режима пониженной скорости передачи. В этом режиме два младших разряда символьного слова полагаются равными нулю, являются неинформативными и при приеме игнорируются. Этот режим всегда используется для LoRa символов заголовка и, как правило, автоматически активируется для остальных символов информационного блока при высоких значениях SF . Десятичное представление символьного слова определяет величину циклического сдвига s соответствующего LoRa символа.

В начале каждого сообщения передается однобайтовый заголовок MAC уровня. Его первые 3 бита определяют тип сообщения и направление передачи. Тип наиболее часто передаваемых сообщений – восходящие/нисходящие данные. В таких сообщениях за MAC заголовком следует короткий адрес оконечного устройства DevAddr (4 байта), как показано на рис. 4. Поле DevAddr состоит из префикса AddrPrefix, короткого сетевого идентификатора NwkID и короткого сетевого адреса оконечного устройства NwkAddr. Префикс определяет размеры полей NwkID и NwkAddr.

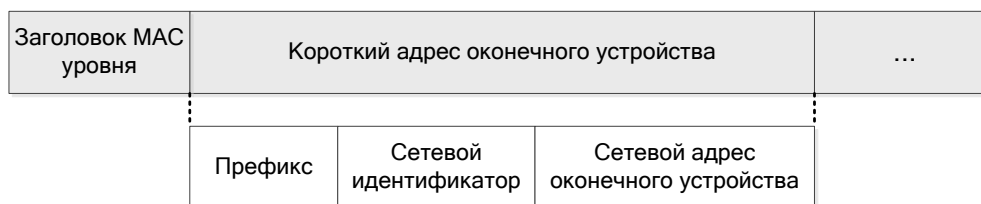


Рис. 4. Битовый блок сообщения «восходящие/нисходящие данные»

В сообщениях других типов могут передаваться также глобальный идентификатор оконечного устройства DevEUI (8 байт) и уникальный идентификатор сети NetID (3 байта).

3. Обнаружение и идентификация источников сигнала LoRaWAN

Для LoRa модуляции рабочие отношения сигнал-шум являются достаточно низкими. Это накладывает жесткие требования и к другим процедурам обработки для сохранения потенциала помехоустойчивости LoRa сигнала.

При практической реализации, кроме высокой помехоустойчивости, важной целью является повышение быстродействия разрабатываемых процедур. В этой связи было необходимо найти разумный компромисс между быстродействием и помехоустойчивостью алгоритмов.

Кроме того, LoRa терминалы используют дешевые опорные генераторы, нестабильность которых составляет порядка $\gamma = 10^{-5}$ и выше. Это приводит к необходимости обнаружения и обработки сигнала в условиях существенных частотных и тактовых расстройек.

Исходными данными для анализа являются отсчеты фильтрованного видеосигнала, поступающие с приемного устройства. Ширина полосы видеосигнала – 600 кГц (с запасом на частотную расстройку), частота дискретизации – $f_d = 1$ МГц.

Обработка записанного видеосигнала включает

- обнаружение LoRa сигнала, определение спрединг фактора и полосы сигнала, приближенную оценку начала преамбулы;
- частотно-временную синхронизацию, оценку тактовой расстройки, определение типа сети (публичная или приватная);
- прием заголовка информационного блока, определение длины сообщения и скорости кодирования;
- прием сообщения информационного блока, включая процедуры временной автоподстройки, демодуляции, деперемежения, декодирования, дерандомизации, проверки правильности приема;
- выделение идентификационных данных.

Общая схема обнаружения и идентификации источников сигнала LoRaWAN представлена на рис. 5. Источниками сигнала могут быть как оконечные устройства, так и базовые станции LoRaWAN.

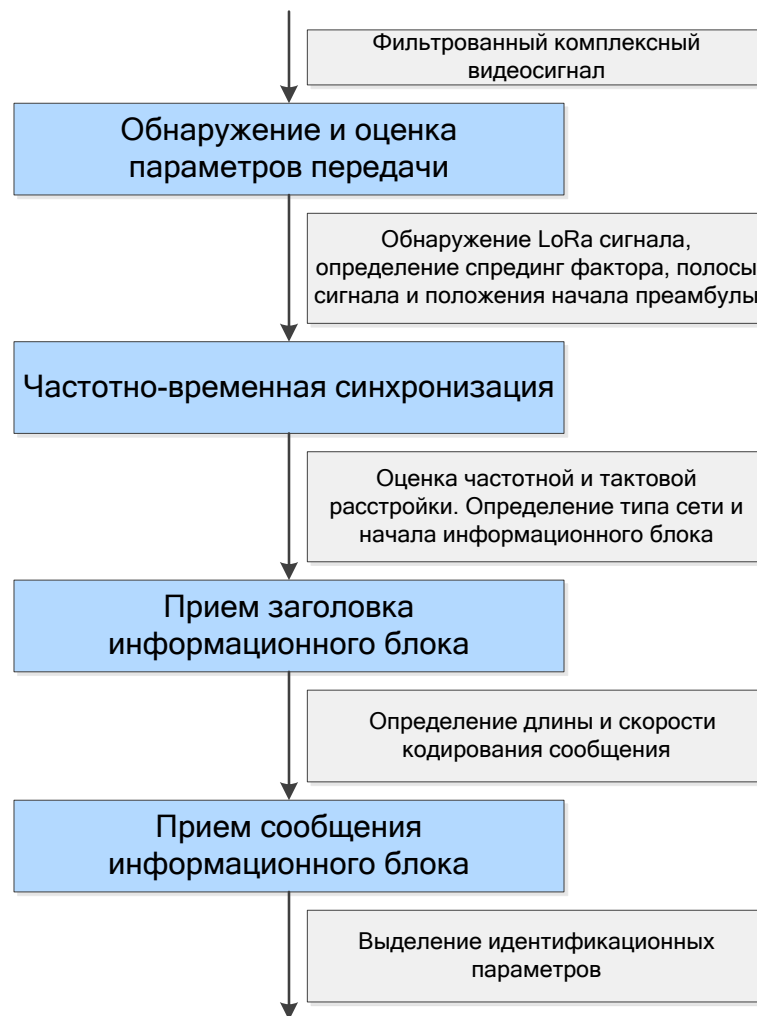


Рис. 5. Общая схема обнаружения и идентификации источников LoRaWAN

Кратко опишем необходимые процедуры.

Для определения параметров передачи может быть использован оптимальный алгоритм, основанный на анализе корреляций входного сигнала с символами преамбулы, соответствующими всевозможным комбинациям параметров SF , BW . Однако такой подход является чрезмерно громоздким и неудовлетворительным с точки зрения быстродействия. Поэтому был разработан относительно простой эвристический двухэтапный алгоритм, достаточно устойчивый к шумам и значительным частотным и тактовым расстройкам. На первом этапе оценивается скорость β изменения частоты LoRa символов, на втором этапе – их длина T_s .

В общем случае величина β может принимать 10 различных значений. Для оценки этой величины формируются произведения отсчетов входного сигнала. Перемножаемые отсчеты сдвинуты друг относительно друга на 128 отсчетов. Массивы из 4096 произведений подвергаются преобразованию Фурье (БПФ), формируя блоки спектров мощности. Эти блоки усредняются с помощью скользящего окна длиной 16, как показано на рис. 6.

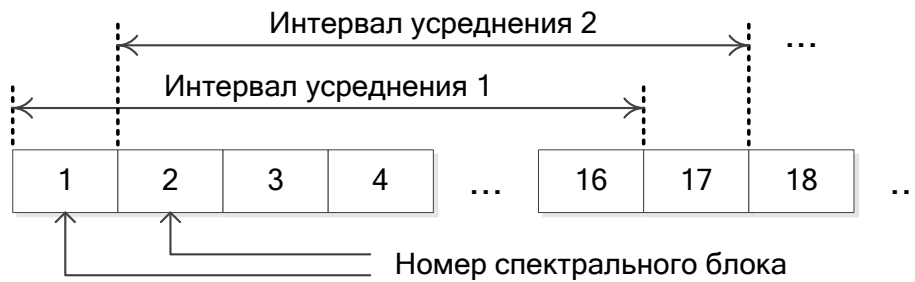


Рис. 6. Формирование усредненных спектров мощности

Оценка скорости изменения частоты LoRa символов основана на том, что каждому возможному значению β соответствует свое положение спектральной компоненты в сформированном усредненном спектре. При наличии LoRa сигнала спектральная компонента, соответствующая истинному значению параметра β , будет существенно превосходить другие возможные компоненты.

Для каждого усредненного спектра определяется положение максимальной компоненты. Если из всех спектральных компонент порог превышен только максимальной компонентой, то выполняется досрочная оценка параметра β , что существенно снижает время обработки. В случае если для всех усредненных спектров это условие не выполняется (при низком отношении сигнал/шум), то оценка выносится по спектру с наибольшим максимумом. Пример усредненного спектра представлен на рис. 7.

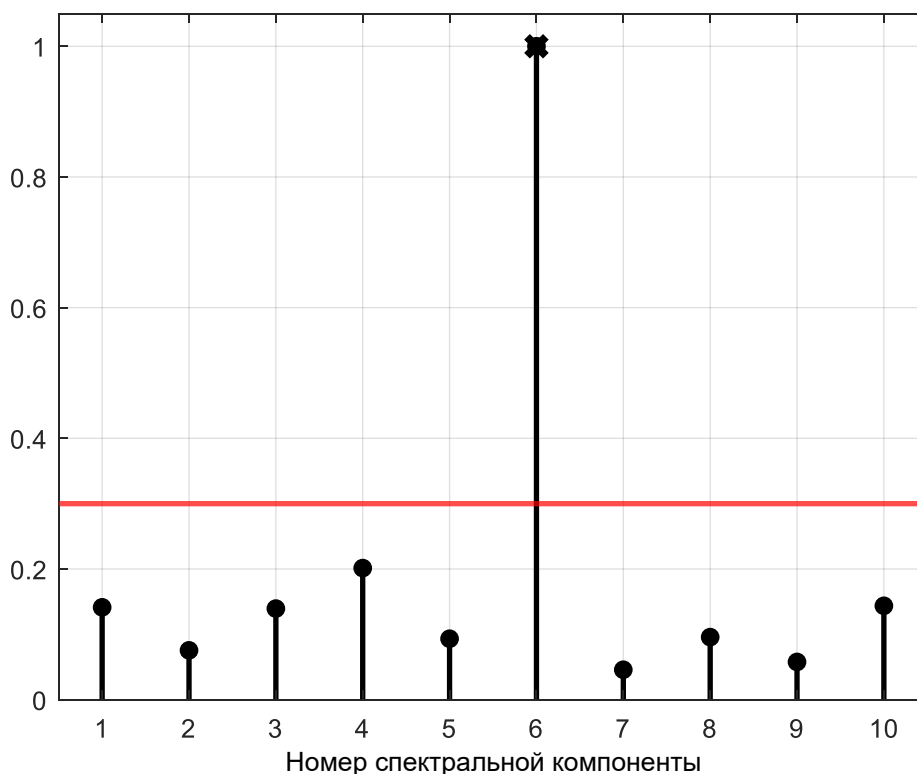


Рис. 7. Пример возможных спектральных компонент усредненного спектра мощности

Оцененному значению β могут соответствовать разные длины T_s LoRa символа (до трех значений). Для окончательной оценки параметра T_s формируется выходной сигнал коррелятора, согласованного с восходящим ЛЧМ символом с максимально возможной длительностью $T_s^{(\max)}$ при оцененном β . Параллельно с выходным сигналом коррелятора формируется адаптивный порог на основе экспоненциального фильтра этого сигнала. Фиксируются превышения порога и определяются положения двух первых локальных максимумов. Если расстояние между ними соответствует одному из возможных значений T_s , то принимается решение об обнаружении LoRa сигнала с параметрами β, T_s . При этом положение первого локального максимума фиксируется как начало преамбулы LoRa сигнала, по которому можно рассчитать предварительные оценки положения восходящих символов преамбулы.

Пример выходного сигнала коррелятора приведен на рис. 8.

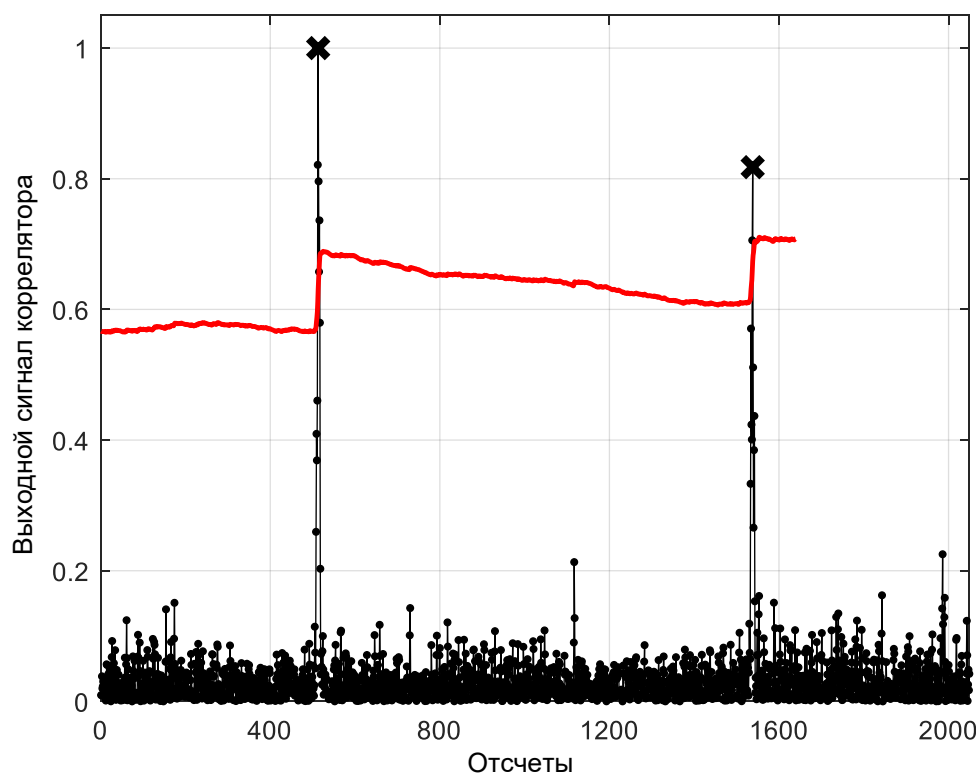


Рис. 8. Пример выходного сигнала коррелятора, порог – красным цветом

По оцененным величинам β, T_s параметры передачи SF, BW рассчитываются по формулам

$$SF = \log_2(\beta \times T_s^2), \quad BW = \beta \times T_s.$$

При анализе выходного сигнала коррелятора могут отсутствовать два локальных максимума или расстояние между ними может не соответствовать ни одному из возможных значений длительности символа T_s . Для этих случаев

считаем, что спектральная компонента, соответствующая оцененному β , поражена помехой, и для оценки параметров передачи выполняем дальнейший анализ усредненных спектров без учета этой компоненты.

После обнаружения LoRa сигнала, определения параметров передачи и положения преамбулы выполняется трехэтапная частотно-временная синхронизация.

На первом этапе определяется число N_{up} восходящих ЛЧМ символов преамбулы и оценивается тактовая расстройка δ , понимаемая как временной уход в отсчетах за один символ. Эта величина зависит от нестабильности опорного генератора и может достигать значений $\pm N_s \gamma$, где $N_s = T_s f_d$ – длина LoRa символа в отсчетах. Например, при $BW = 125$ кГц, $SF = 12$ и $\gamma = 10^{-5}$ величина δ может достигать 0,33 отсчета.

Рассчитывается корреляция входного сигнала с опорным восходящим ЛЧМ символом, соответствующим найденным параметрам передачи SF , BW . Для сокращения времени обработки выходной сигнал коррелятора формируется только на интервалах, соответствующих окрестности предварительных оценок положений восходящих символов преамбулы. На каждом таком временном интервале выполняется сравнение локального максимума коррелятора с порогом. Положение первого локального максимума, превысившего порог, полагаем началом первого символа преамбулы. Процедура поиска других символов преамбулы заканчивается, если порог не превышен на двух соседних интервалах. В этом случае положение последнего локального максимума, превысившего порог, считается началом последнего восходящего ЛЧМ символа преамбулы. По положениям первого и последнего восходящих символов преамбулы рассчитывается общее число N_{up} восходящих символов.

Пример оценки положений и числа восходящих символов преамбулы иллюстрируется на рис. 9.

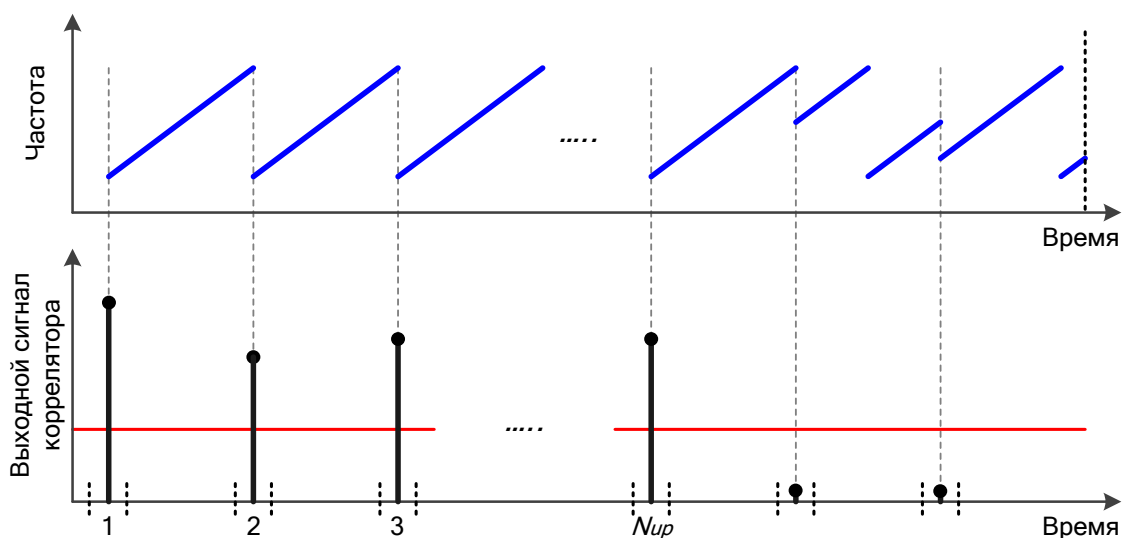


Рис. 9. Пример оценки положений и числа восходящих символов преамбулы, порог – красным цветом

Оценка тактовой расстройки определяется по формуле

$$\delta = \frac{y_{N_{up}} - y_1}{N_{up} - 1} - N_s,$$

где $y_1, y_{N_{up}}$ – оценки положения первого и последнего восходящих символов преамбулы, уточненные посредством квадратурной интерполяции.

На втором этапе по восходящим и нисходящим ЛЧМ символам преамбулы выполняется оценка частотной расстройки F и ее компенсация. Заметим, что для LoRa сигнала частотная расстройка порождает ошибку в определении положения символов преамбулы, то есть ошибку временной синхронизации, которая пропорциональна частотной расстройке. Это приводит к неправильному определению положения информационных символов и, как следствие, ошибкам демодуляции. Поэтому высокоточная оценка частотной расстройки (которая может достигать 10 кГц и выше) является ключевым элементом приема LoRa сигнала. Для оценки частотной расстройки используются две особенности сигнала. Первая – одинаковые восходящие символы преамбулы, позволяющие использовать фазоразностный метод. Ограничиться только этим методом не представляется возможным, поскольку при значительных частотных расстройках имеет место переход оценки фазы через 2π , и, как следствие, неопределенность оценки частотной расстройки. Вторая особенность – наличие нисходящих ЛЧМ символов. Выходные сигналы корреляторов, согласованные соответственно с восходящим и нисходящим ЛЧМ символами, при наличии частотной расстройки имеют противоположное временное смещение локальных максимумов. Это позволяет, используя структуру преамбулы, приближенно оценить временное смещение, по которому получить приближенную оценку частотной расстройки и устранить неопределенность фазоразностного метода. В работе для оценки частотной расстройки использованы обе эти особенности сигнала.

Связь частотной расстройки F и смещения временного положения $T = F/\beta$ максимумов выходного сигнала корреляторов восходящего и нисходящего символов иллюстрируется на рис. 10. Синим цветом показан случай наличия частотной расстройкой F , серым цветом – ее отсутствия.

Оценка частотной расстройки F формируется как сумма двух компонент. Первая компонента $F1$ определяется фазоразностным методом [24] по восходящим символам преамбулы

$$F1 = \frac{1}{2\pi \times T_s} \arg \left[\sum_{m=1}^{N_{up}-1} (Q_m^* \times Q_{m+1}) \right],$$

где $Q_m, m = \overline{1, N_{up}}$ – комплексные значения выходного сигнала коррелятора в точках начала восходящих символов.

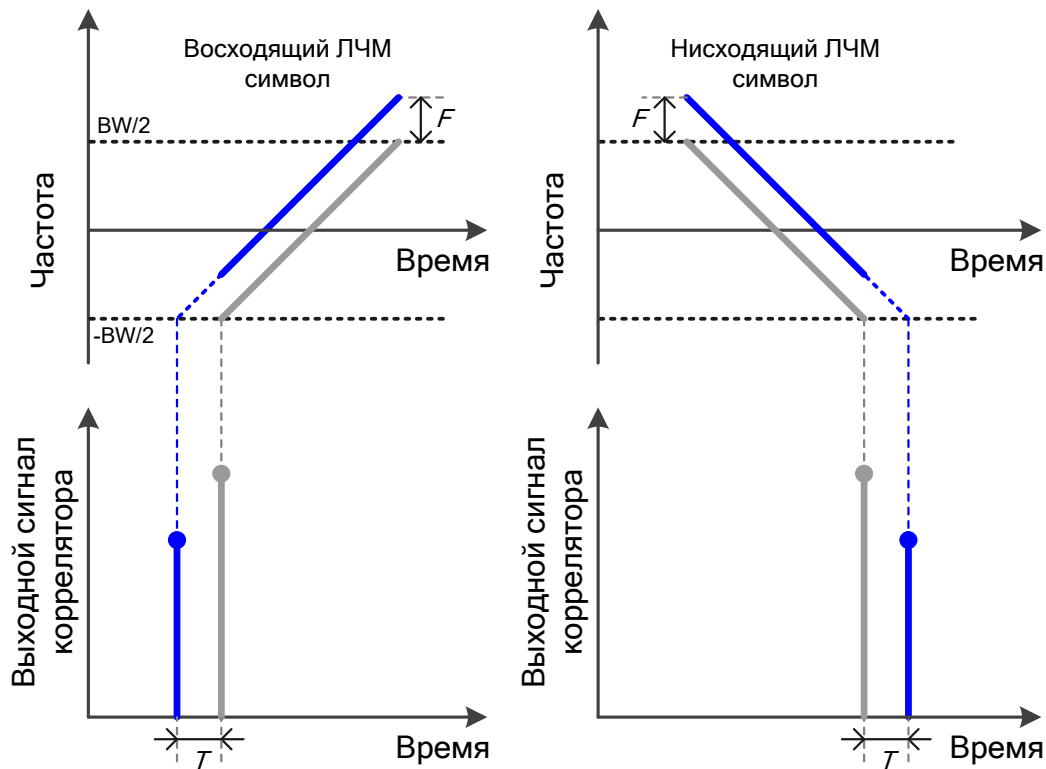


Рис. 10. Связь частотной расстройки и временного смещения максимумов выходного сигнала корреляторов восходящего и нисходящего символов

Для оценки второй компоненты $F2$ анализируем выходной сигнал коррелятора, согласованного с нисходящим ЛЧМ символом. Положение первого локального максимума, превысившего порог, полагаем началом первого нисходящего символа преамбулы.

С учетом структуры преамбулы, полученных оценок позиций последнего восходящего и первого нисходящего символов, а также тактовой расстройки вторая компонента $F2$ частотной расстройки равна

$$F2 = \frac{1}{T_s} \text{round} \left[\frac{\left(z - y_{N_{up}} - 3N_s - 3\delta \right)}{2} \times \frac{BW}{f_d} - F1 \times T_s \right],$$

где z – оценка положения первого нисходящего символа преамбулы, уточненная посредством квадратурной интерполяции, $\text{round}(\cdot)$ – ближайшее целое. В результате получаем оценку частотной расстройки $F = F1 + F2$, по которой осуществляется частотная подстройка входного сигнала.

На третьем этапе определяется начало информационного блока и тип сети. Для этого формируется корреляция скорректированного по частоте входного сигнала с нисходящим ЛЧМ символом. Превышение выходным сигналом коррелятора порога фиксируется как положение второго нисходящего символа преамбулы, по которому, используя структуру LoRa сигнала, рассчитывается начало информационного блока. В случае если превышения порога на заданном интервале не произошло, принимается решение о плохих условиях приема, и дальнейший анализ прекращается.

По двум модулированным символам преамбулы определяется тип сети. Для этого выполняем демодуляцию этих символов, то есть, получаем оценку их циклического сдвига. В битовом представлении циклического сдвига информативными являются только биты с четвертого по седьмой. В результате из двух модулированных символов формируется группа из 8 бит. При публичном типе сети эта группа равна (00110100), при приватном типе сети – (00010010). Из полученной группы выделяются три бита (второй, третий и шестой). Выполняется сравнение выделенной группы с блоками (110) и (001). Если выделенная группа ближе к блоку (110), принимается решение о публичном типе сети. В противном случае – о приватном типе сети.

После установления частотно-временной синхронизации для подавления внеполосных шумов осуществляется фильтрация входного сигнала до полосы BW и прием заголовка информационного блока. Блок-схема приема представлена на рис. 11.

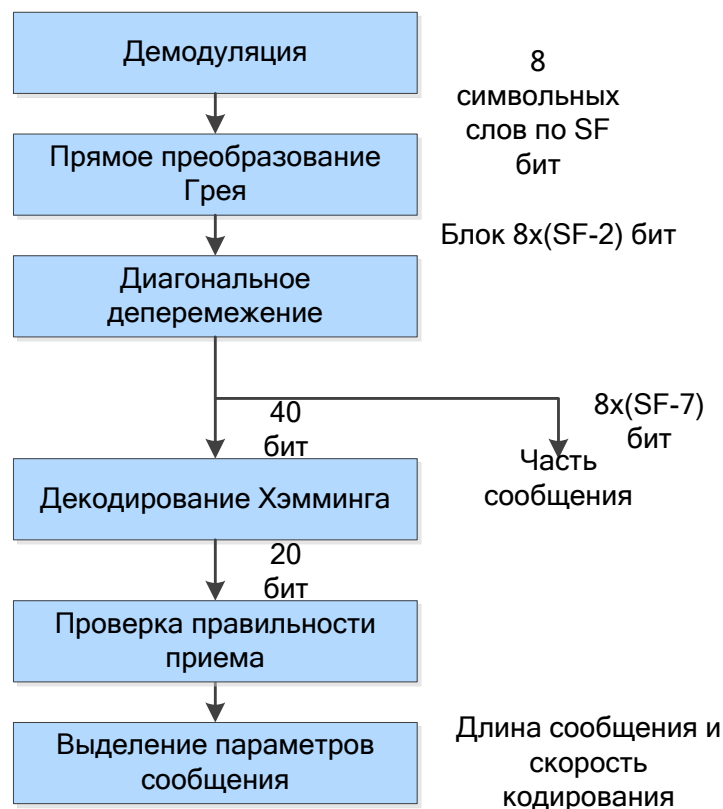


Рис. 11. Блок-схема приема заголовка информационного блока

Для приема заголовка используются 8 первых символов информационного блока. Формируется опорный сигнал с частотой дискретизации BW , соответствующий нисходящему ЛЧМ символу. Демодуляция LoRa символов состоит в следующем. Для каждого LoRa символа заголовка выполняется поэлементное перемножение отсчетов входного фильтрованного и опорного сигналов. Входной сигнал децимируется до частоты дискретизации BW . Затем над полученным блоком произведений выполняется БПФ. Оценка циклического

сдвига LoRa символа определяется по положению максимума квадрата модуля результата БПФ.

Пример результата демодуляции LoRa символа показан на рис. 12.

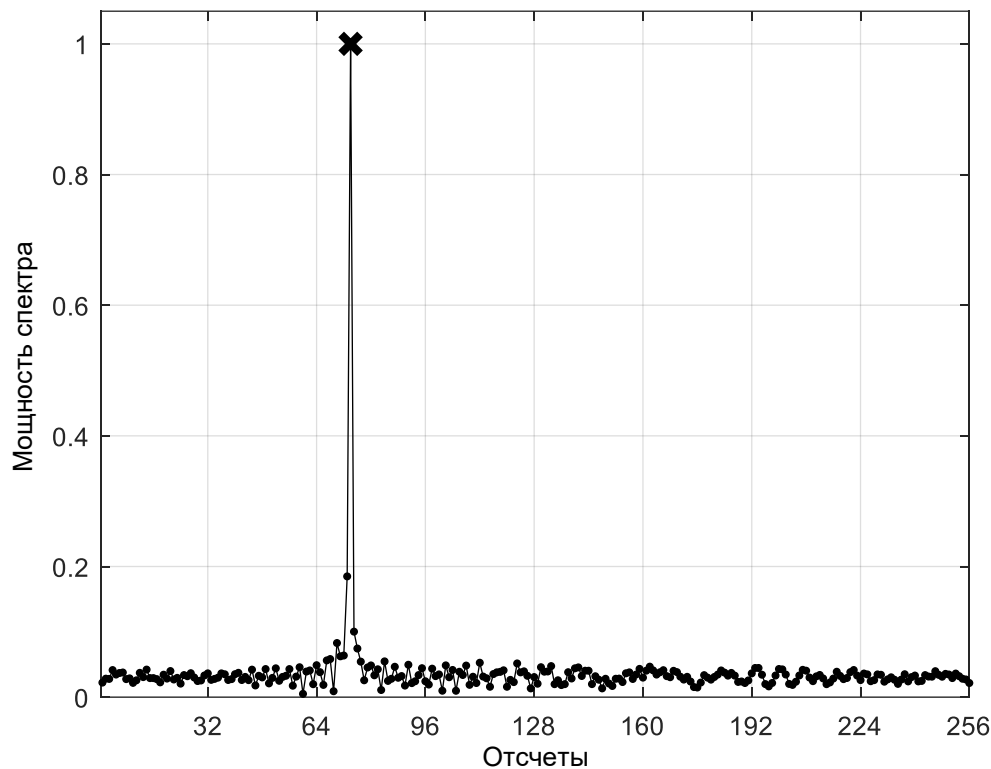


Рис. 12. Пример результата демодуляции LoRa символа

После процедуры демодуляции получаем 8 символьных слов по SF бит каждое. Для заголовка режим пониженной скорости передачи используется всегда, поэтому 2 младших разряда каждого символьного слова отбрасываются. Полученные символьные слова подвергаются прямому преобразованию Грея. В результате формируется битовый блок размером $8 \times (SF - 2)$, который поступает на вход диагонального деперемежителя. С его выхода битовый блок размером $(SF - 2) \times 8$ делится в общем случае на два подблока. Первый подблок длиной 40 бит поступает на вход декодера Хэмминга, скорость кодирования $CR = 4/8$. Второй подблок длиной $8 \times (SF - 7)$ является частью сообщения и используется при его приеме. В случае $SF = 7$ второй подблок отсутствует. На выходе декодера получаем 20 бит заголовка информационного блока.

По первым 15 битам формируются 5 проверочных бит в соответствии с известным полиномом. Сформированные и принятые биты сравниваются. Если все соответствующие биты совпадают, принимается решение о наличии заголовка в информационном блоке. В этом случае из первых 15 бит извлекается информация о длине сообщения, скорости кодирования и наличии/отсутствии проверочных бит сообщения.

Если какие-либо соответствующие проверочные биты не совпадают, делается предположение, что заголовок информационного блока отсутствует. В

этом случае прием идентификационных данных выполняется при априорной неопределенности относительно параметров сообщения.

После получения информации о длине сообщения и скорости кодирования осуществляется прием сообщения информационного блока и выделение идентификационных данных. Блок-схема приема приведена на рис. 13.

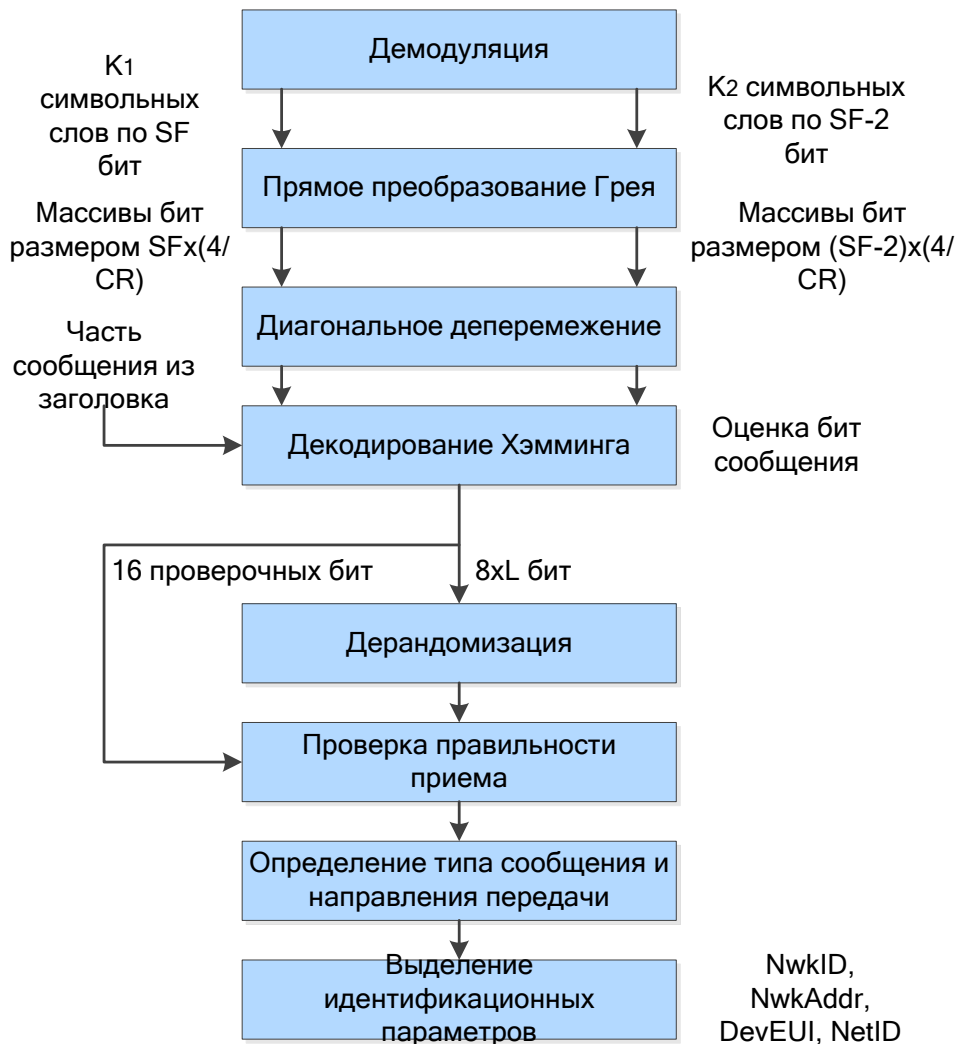


Рис. 13. Блок-схема приема сообщения информационного блока

Прием сообщения всегда осуществляется при априорной неопределенности относительно использования/неиспользования режима пониженной скорости передачи. По длине L и скорости кодирования CR сообщения для этих двух вариантов рассчитывается количество K_1 и K_2 LoRa символов сообщения информационного блока. Демодуляция LoRa символов сообщения выполняется аналогично соответствующей процедуре демодуляции символов заголовка.

После демодуляции получаем K_1 символьных слов размером $(SF - 2)$ бит – для первого варианта и K_2 символьных слов размером SF бит – для второго варианта. Биты каждого символьного слова подвергаются прямому преобразованию Грея. Далее из них формируются массивы бит размером $(4/CR) \times (SF - 2)$ и $(4/CR) \times SF$, свободные битовые поля заполняются нулями.

Число массивов равно $\text{ceil}[K_1 \times CR/4]$ и $\text{ceil}[K_2 \times CR/4]$ для первого и второго вариантов соответственно. Каждый массив бит поступает на вход диагонального депережежения, на выходе данной процедуры получаем массивы бит размером $(SF - 2) \times (4/CR)$ и $SF \times (4/CR)$. Для каждого из вариантов использования/неиспользования режима пониженной скорости передачи результаты депережежения массивов объединяются, к ним в начало добавляется часть сообщения из заголовка при ее наличии. Объединенные битовые блоки поступают на вход декодера Хэмминга, скорость кодирования CR . С выхода декодера для обоих вариантов получаем $8L$ информационных и 16 проверочных бит, если они присутствуют. Кроме того, с выхода декодера Хэмминга для обоих вариантов получаем также вектор синдромов ошибок, который содержит информацию о наличии и возможной позиции ошибки в блоке декодированных бит. Решение об использовании/неиспользовании режима пониженной скорости передачи принимается по максимальному количеству нулевых ошибок вектора синдромов. Дальнейшая обработка зависит от того, является ли вектор синдромов нулевым, и от наличия проверочных бит сообщения (из заголовка).

Если проверочные биты в информационном блоке отсутствуют, а вектор синдромов – ненулевой, принимается решение о невозможности достоверного приема сообщения, и дальнейшая обработка прекращается. В противном случае полученный блок $8L$ информационных бит дерандомизируется.

Если вектор синдромов – нулевой, ошибки демодуляции и декодирования сообщения отсутствуют. В этом случае дополнительная проверка правильности приема не требуется, даже при наличии проверочных бит.

Если проверочные биты в информационном блоке присутствуют, а вектор синдромов – ненулевой, правильность приема сообщения верифицируется по проверочным битам. Для этого по дерандомизированным битам формируются 16 проверочных бит в соответствии с известным полиномом. Затем сформированные и принятые проверочные биты сравниваются. Если какие-либо соответствующие проверочные биты не совпадают, то сообщение принято с ошибкой. Если все соответствующие биты совпадают, принимается решение о безошибочном приеме сообщения. В этом случае из него извлекается информация о типе сообщения, направлении передачи, а также идентификационные данные.

При отсутствии заголовка информационного блока выделение идентификационных данных выполняется в условиях априорной неопределенности о параметрах сообщения. В этом случае осуществляется прием только части сообщения, в которой содержатся идентификационные данные. Для каждого из вариантов использования/неиспользования режима пониженной скорости передачи попытка приема ведется для всех возможных скоростей кодирования CR . Достоверность принятых идентификационных данных в этом случае верифицируется только нулевым вектором синдромов.

Разработанные алгоритмы обнаружения и идентификации сигналов источников LoRaWAN были протестированы методом компьютерного моделирования посредством приема сигналов симулятора LoRaWAN. Симулятор был разработан на основе имеющихся данных о физическом уровне и протоколах

LoRaWAN. Он позволяет смоделировать LoRa сигналы с различными значениями спрединг фактора, ширины полосы, скорости кодирования, длины сообщения, частотных и тактовых расстройек, отношения сигнал-шум. Кроме того, тестирование было проведено на реальных сигналах. Так, примеры на рис. 7, рис. 8, рис. 12 получены для успешно принятого эфирного сигнала LoRaWAN, записанного в крупном российском городе.

Результаты тестирования показали, что допустимая частотная расстройка может достигать ± 50 кГц, а нестабильность опорного генератора, определяющая тактовую расстройку, – от 3×10^{-5} до 8×10^{-5} в зависимости от длины LoRa символа. Эти характеристики с запасом удовлетворяют параметрам терминалов LoRaWAN.

Разработанный алгоритм оценки частотной расстройки продемонстрировал высокую точность. Например, при $SF = 12$, $BW = 125$ кГц, отношении сигнал-шум -14 дБ, частотной расстройке $F = 50$ кГц, тактовой расстройке $\delta = 0,66$ с вероятностью $0,95$ ошибка частотной расстройки не превышает $0,2$ Гц. Диапазон рабочих значений отношения сигнал-шум в зависимости от спрединг фактора составляет от -5 дБ до -14 дБ. Небольшая потеря потенциала LoRa модуляции обусловлена необходимостью дополнительных процедур, в частности, определения параметров передачи, частотно-временной и тактовой синхронизации. Эти процедуры дополнительно снижают интегральную помехоустойчивость алгоритмического комплекса, так как для некоторых из них были выбраны быстродействующие и не самые помехоустойчивые алгоритмы.

Заключение

В статье представлен помехоустойчивый быстродействующий алгоритмический комплекс обнаружения и идентификации источников сетей LoRaWAN. Алгоритмический комплекс успешно протестирован как методом компьютерного моделирования, так и на реальных сигналах. Он показал высокую эффективность в условиях низких отношений сигнал-шум, а также значительных частотных и тактовых расстройек.

Представленный комплекс реализован в российском портативном анализаторе сигналов радиосетей АРСЕНАЛ-И производства АО «ИРКОС» [25]. Анализатор применяется для планирования систем сотовой и транковой радиосвязи, включая системы IoT, на этапах развертывания и ввода в эксплуатацию, анализа зон покрытия, а также радиоконтроля существующих сетей с целью проверки параметров передатчиков и их соответствия частотно-территориальному плану.

Литература

1. TS001-1.0.4. LoRaWAN Link Layer Specification version 1.0.4. – LoRa Alliance Technical Committee, 2020. – 90 с.
2. TS002-1.1.0. LoRaWAN Backend Interfaces Specification version 1.1.0. – LoRa Alliance Technical Committee, 2020. – 85 с.

3. RP002-1.0.4. LoRaWAN Regional Parameters 2 version 1.0.4. – LoRa Alliance Technical Committee, 2022. – 101 с.

4. ГОСТ Р 71168–2023. Информационные технологии. Интернет вещей. Спецификация LoRaWAN RU. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 53 с.

5. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / под ред. А. М. Рембовского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 640 с.

6. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты / под ред. А. М. Рембовского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2022. – 488 с.

7. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A., Smolskiy S. M. Radio Monitoring Automated Systems and Their Components. – Springer, 2018. – 467 p.

8. Ашихмин А. В., Каюков И. В., Козьмин В. А., Манелис В. Б. Анализатор базовых станций GSM сетей на базе панорамного измерительного приемника АРГАМАК-ИМ // Специальная техника. 2008. № 1. С. 31–39.

9. Ашихмин А. В., Каюков И. В., Козьмин В. А., Манелис В. Б. Анализатор базовых станций CDMA сетей // Специальная техника. 2008. № 3–4. С. 16–26.

10. Алексеев П. А., Ашихмин А. В., Каюков И. В., Козьмин В. А., Манелис В. Б. Анализатор сигналов базовых станций UMTS сетей // Спецтехника и связь. 2012. № 5–6. С. 57–68.

11. Алексеев П. А., Ашихмин А. В., Беспалов О. В., Каюков И. В., Козьмин В. А., Манелис В. Б. Анализатор сигналов базовых станций GSM, UMTS, LTE сетей сотовой связи // Спецтехника и связь. 2016. № 4. С. 50–59.

12. Манелис В. Б., Козьмин В. А., Сладких В. А. Обнаружение и идентификация базовых станций сетей сотовой связи 5G // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 3. С. 152–178. doi: 10.24412/2410-9916-2021-3-152-178.

13. Алексеев П. А., Козьмин В. А., Крыжко И. Б., Сладких В. А. Определение параметров сетей и точек доступа Wi-Fi // Спецтехника и связь. 2016. № 4. С. 29–36.

14. Беспалов О. В., Бочаров Д. Н., Каюков И. В., Козьмин В. А., Манелис В. Б. Анализатор сигналов радиостанций DMR // Спецтехника и связь. 2016. № 4. С. 106–110.

15. Фаустов И. С., Манелис В. Б., Токарев А. Б., Козьмин В. А., Сладких В. А. Анализатор сигналов ZigBee // Вестник Воронежского государственного университета. 2021. Т. 17. № 4. С. 65–70.

16. Степанов Н. В. Систематизированный обзор особенностей реализации физического уровня протокола LoRa // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 11. С. 11–26. doi: 10.36724/2072-8735-2023-17-11-11-26.

17. Tapparel J., Burg A. Design and Implementation of LoRa Physical Layer in GNU Radio // Proceeding of the 14th GNU Radio Conference. – Lausanne, 2024. – 9 p.

18. Леушин А. В. LoRa как новый вид модуляции. Принцип работы, основные параметры, помехоустойчивость // Техника радиосвязи. 2022. Выпуск 2(53). С. 28–42.
19. Tapparel J. Complete Reverse Engineering of LoRa PHY // Technical Report of Telecommunications Circuits Laboratory. 2019. 20 p.
20. De Omena Simas J. P. Software-Defined Radio Implementation of a LoRa Detector and Transceiver: dis. ... student. – Torino: Politecnico di Torino, 2021. – 80 p.
21. Xhonneux M., Afisiadis O., Bol D., Louveaux J. A Low-Complexity LoRa Synchronization Algorithm Robust to Sampling Time Offsets // IEEE Internet of Things Journal. 2021. 14 p.
22. Alabd M. B., Nuss B., de Oliveira L. G., Li Y., Diewald A., Zwick T. Preamble-Based Synchronization for Communication-Assisted Chirp Sequence Radar // Progress In Electromagnetics Research C. Vol. 127. 2022. P. 31–48.
23. Savaux V., Delacourt C., Savelli P. On Time-Frequency Synchronization in LoRa System: From Analysis to Near-Optimal Algorithm. TechRxiv. 2021. 11 p.
24. Каюков И. В., Манелис В. Б. Сравнительный анализ различных методов оценки частоты сигнала // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2006. № 7. С. 42–56.
25. Каталог ИРКОС 2024. Автоматизированные системы и технические средства радиоконтроля [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://www.ircos.ru/zip/cat2024.pdf> (дата обращения 11.03.2025).

References

1. TS001-1.0.4. LoRaWAN Link Layer Specification version 1.0.4. LoRa Alliance Technical Committee, 2020. 90 p.
2. TS002-1.1.0. LoRaWAN Backend Interfaces Specification version 1.1.0. LoRa Alliance Technical Committee, 2020. 85 p.
3. RP002-1.0.4. LoRaWAN Regional Parameters 2 version 1.0.4. LoRa Alliance Technical Committee, 2022. 101 p.
4. State Standard 71168–2023. Information technology. Internet of things. LoRaWAN RU specification. Moscow, Russian Standardization Institute, 2024. 53 p. (in Russian).
5. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A. *Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva* [Radio monitoring – tasks, methods, means]. Moscow, *Hotline-Telecom*, 2015. 640 p. (in Russian).
6. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A. *Avtomatizirovannyye sistemy radiokontrolya i ikh komponenty* [Automated radio monitoring systems and their components]. Moscow, *Hotline-Telecom*, 2022. 488 p (in Russian).
7. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A., Smolskiy S. M. *Radio Monitoring Automated Systems and Their Components*. Springer, 2018. 467 p.
8. Ashikhmin A. V., Kayukov I. V., Kozmin V. A., Manelis V. B. Analizator bazovykh stantsiy GSM setey na baze panoramnogo izmeritel'nogo priyemnika ARGAMAK-IM [Analyzer of base stations of GSM networks based on panoramic

measuring receiver ARGAMAK-IM]. *Spetsial'naiia Tekhnika*, 2008, no. 1, pp. 31–39 (in Russian).

9. Ashikhmin A. V., Kayukov I. V., Kozmin V. A., Manelis V. B. Analizator bazovykh stantsiy CDMA setey [Analyzer of CDMA base stations networks]. *Spetsial'naiia Tekhnika*, 2008, no. 3–4, pp. 16–26 (in Russian).

10. Alexeev P. A., Ashikhmin A. V., Kayukov I. V., Kozmin V. A., Manelis V. B. Analizator signalov bazovykh stantsiy UMTS setey [Signal analyzer of base stations of UMTS networks]. *Specialized Machinery and Communication*, 2012, no. 5–6, pp. 57–68 (in Russian).

11. Alexeev P. A., Ashikhmin A. V., Bepalov O. V., Kayukov I. V., Kozmin V. A., Manelis V. B. Analizator signalov bazovykh stantsiy GSM, UMTS, LTE setey sotovoy svyazi [Signal analyzer of base stations GSM, UMTS, LTE cellular networks]. *Specialized Machinery and Communication*, 2016, no. 4, pp. 50–59 (in Russian).

12. Manelis V. B., Kozmin V. A., Sladkikh V. A. Detection and identification of base stations of 5G cellular networks. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 3, pp. 152–178 (in Russian). doi: 10.24412/2410-9916-2021-3-152-178.

13. Alexeev P. A., Kozmin V. A., Kryzhko I. B., Sladkikh V. A. Opredelenie parametrov setey i tochek dostupa Wi-Fi [Determination of Wi-Fi networks and access points]. *Specialized Machinery and Communication*, 2016, no. 4, pp. 29–36 (in Russian).

14. Bepalov O. V., Bocharov D. N., Kayukov I. V., Kozmin V. A., Manelis V. B. Analizator signalov radiostantsiy DMR [DMR radio station signals analyzer]. *Specialized Machinery and Communication*, 2016, no. 4, pp. 106–110 (in Russian).

15. Faustov I. S., Manelis V. B., Tokarev A. B., Kozmin V. A., Sladkikh V. A. ZigBee signals analyzer. *Bulletin of Voronezh state technical University*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 65–70 (in Russian).

16. Stepanov N. V. A systematic overview of the features of the implementation of the physical layer of the LoRa protocol. *T-Comm*, 2023, vol. 17, no. 11, pp. 11–26 (in Russian). doi: 10.36724/2072-8735-2023-17-11-11-26.

17. Tapparel J., Burg A. Design and Implementation of LoRa Physical Layer in GNU Radio. Proceeding of the 14th GNU Radio Conference. Lausanne, 2024. 9 p.

18. Leushin A. V. LoRa modulation as a new kind of modulation. Principle of operation, basic parameters, noise immunity. *Radio communication technology*. 2022. no. 2 (53), pp. 28–42 (in Russian).

19. Tapparel J. Complete Reverse Engineering of LoRa PHY. *Technical Report of Telecommunications Circuits Laboratory*, 2019, 20 p.

20. De Omena Simas J. P. Software-Defined Radio Implementation of a LoRa Detector and Transceiver: dis. ... student. Torino, Politecnico di Torino, 2021. 80 p.

21. Xhonneux M., Afisiadis O., Bol D., Louveaux J. A Low-Complexity LoRa Synchronization Algorithm Robust to Sampling Time Offsets. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 14 p.

22. Alabd M. B., Nuss B., de Oliveira L. G., Li Y., Diewald A., Zwick T. Preamble-Based Synchronization for Communication-Assisted Chirp Sequence Radar. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2022, vol. 127, pp. 31–48.

23. Savaux V., Delacourt C., Savelli P. On Time-Frequency Synchronization in LoRa System: From Analysis to Near-Optimal Algorithm. *TechRxiv*. 2021. 11 p.

24. Kayukov I. V., Manelis V. B. Comparative analysis of different methods of signal frequency estimation. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika*. 2006. no 7. pp. 42–56.

25. IRCOS JSC Catalog. Automated systems and technical means of radio monitoring. 2024. Available at: <https://www.ircos.ru/zip/cat2024.pdf> (accessed 11.03.2025) (in Russian).

Статья поступила 14 марта 2025 г.

Информация об авторах

Манелис Владимир Борисович – доктор технических наук. Ведущий научный сотрудник. АО «ИРКОС». Область научных интересов: системы связи, радиомониторинг, алгоритмы приема и обработки сигналов. E-mail: vbm@ircos.vrn.ru

Шатилов Данила Владимирович – инженер-программист 3 категории. АО «ИРКОС». Область научных интересов: радиомониторинг, цифровая обработка сигналов. E-mail: shatilovdv@ircos.vrn.ru

Ашихмин Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор. Директор обособленного структурного подразделения. АО «ИРКОС». Область научных интересов: радиомониторинг, антенны, алгоритмы приема и обработки сигналов. E-mail: info@ircos.ru

Сладких Владимир Александрович – кандидат технических наук. Начальник научно-исследовательского сектора. АО «ИРКОС». Область научных интересов: радиомониторинг, цифровая обработка сигналов. E-mail: sladkihva@ircos.vrn.ru

Ермаков Максим Дмитриевич – инженер по обеспечению качества программного обеспечения. АО «ИРКОС». Область научных интересов: радиомониторинг, цифровая обработка сигналов. E-mail: ermakovmd@ircos.vrn.ru

Адрес: 129626, Россия, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21.

Detection and identification of LoRaWAN network signal sources

V. B. Manelis, D. V. Shatilov, A. V. Ashikhmin,
V. A. Sladkikh, M. D. Ermakov

Problem statement: technologies for remote interaction of devices among themselves (“Internet of things”) have been actively developing in recent years. In particular, LoRaWAN wireless data transmission technology has become widespread. Its features are minimal power consumption, relatively low data transfer rate, sufficiently long range, low cost of terminals. To plan and operate these network, verify compliance

with the requirements for transmitter parameters, control the coverage areas, and verify compliance with the frequency-territorial plan, network operators and government radio frequency services need to regularly search and analyze LoRaWAN signals. **The aim of the work** is to develop a fast noise-resistant algorithmic complex for detecting and identifying LoRaWAN signals. **Novelty:** a complete set of LoRaWAN signal detection and processing procedures is presented, including message reception and identification data extraction. The proposed algorithms for detection and evaluating transmission parameters, frequency-time and clock synchronization, which provide a reasonable compromise between speed and noise immunity, have the elements of novelty. **Results:** a set of LoRaWAN signal processing procedures has been developed that allows for the detection and identification of signal sources in conditions of low signal-to-noise ratios and significant frequency and clock shifts. The algorithmic complex has been successfully tested both by computer simulation of LoRaWAN signals using the developed simulator (for various values of the spreading factor, bandwidth, encoding speed, message length, frequency and clock shifts, signal-to-noise ratio), and on-air signals. **Practical relevance:** the presented algorithmic complex of detection and identification LoRaWAN signals is designed for implementation in digital radio monitoring devices. In particular, it is used in the Russian portable radio networks analyzer Arsenal-I. The analyzer is mass-produced and successfully used for planning systems at the stages of deployment and commissioning, analysis of the coverage areas, for radio control of existing networks in order to check the parameters of transmitters and compliance with the frequency-territorial plan.

Keywords: LoRaWAN, algorithmic complex, LoRa modulation, transmission parameters, preamble, information block, identification data.

Information about Authors

Vladimir Borisovich Manelis – holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences. Leading Researcher. JSC «IRCOS». Field of research: communication systems, radiomonitoring, algorithms for receiving and processing signals. E-mail: vbm@ircoc.vrn.ru

Danila Vladimirovich Shatilov – Engineer Programmer of third category. JSC «IRCOS». Field of research: radiomonitoring, digital signal processing. E-mail: shatilovdv@ircoc.vrn.ru

Aleksandr Vladimirovich Ashikhmin – holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Professor. Director. JSC «IRCOS». Field of research: radiomonitoring, antennas, algorithms for receiving and processing signals. E-mail: info@ircos.ru

Vladimir Alexandrovich Sladkikh – Ph.D. of Engineering Sciences. Head of the Research Sector. JSC «IRCOS». Field of research: radiomonitoring, digital signal processing. E-mail: sladkihva@ircoc.vrn.ru

Maksim Dmitrievich Ermakov – Software Quality Assurance Engineer. JSC «IRCOS». Field of research: radiomonitoring, digital signal processing. E-mail: ermakovmd@ircoc.vrn.ru

Address: Russia, 129626, Moscow, Zvezdnyy bulvar, 21.