

Исследование возможности применения технологии LoRa при проектировании систем позиционирования

Каримова К.Р.

Факультет информатики и робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: kar_karimova@mail.ru

Юмадилова И.Р.

Факультет информатики и робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: iyumadilova@gmail.com

Киреева Ю.М.

Факультет информатики и робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: juliuskireeva@mail.ru

Маснабиева Г.И.

Факультет информатики и робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: guzel-04@gmail.com

Аннотация¹

В статье рассматривается возможность применения технологии беспроводной передачи данных LoRa при проектировании систем локального позиционирования.

Ключевые слова: локальное позиционирование; беспроводная передача данных; LoRa; LoRaWAN; снижение энергозатрат;

1. Введение

В настоящее время для решения задачи определения местоположения объектов и людей разработано множество методов. Все их можно объединить одним термином – системы позиционирования. Системы позиционирования подразделяются на глобальные и локальные (осуществляющие позиционирование в ограниченном пространстве) системы.

Существующие системы глобального позиционирования, такие как GPS и ГЛОНАСС, получили широкое распространение в различных областях производства и сферах общественной жизни. Вышеупомянутые системы показали свою эффективность при определении местоположения объектов вне помещений.

Однако системы глобального позиционирования оказываются несостоятельными, когда возникает необходимость определять местоположения различных мобильных объектов внутри зданий, например, на производственных объектах (в шахтах, ангарах, цехах).

Для решения этой проблемы необходимо использовать системы локального позиционирования, имеющие собственную инфраструктуру, относительно элементов которой и происходит определение местоположения необходимых объектов. Создание гибридных систем позиционирования возможно на базе систем распределенной обработки потоковых данных реального времени [1].

Очевидно, что основополагающими факторами при выборе системы позиционирования являются гарантия высокой точности определения местоположения при минимальном уровне энергозатрат. В реальности, далеко не все системы позиционирования сочетают в себе оба этих фактора.

Таким образом, повышение эффективности локального позиционирования является актуальной научной задачей.

В данной статье рассматривается применение технологии беспроводной передачи данных LoRa для разработки системы локального позиционирования. Построена имитационная модель в среде Simulink, доказана эффективность предлагаемой технологии.

Труды Седьмой всероссийской научной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 28-30 мая, Уфа-Ставрополь, Ханты-Мансийск, Россия, 2019

2. Теоретическая часть

2.1. Технологии локального позиционирования

Система позиционирования в режиме реального времени (Real Time Location Services, RTLS) является автоматизированной системой, которая обеспечивает определение координат контролируемых объектов в пределах территории, охваченной необходимой инфраструктурой. Она способна накапливать, обрабатывать и хранить информацию о местонахождении и перемещении людей, предметов, мобильных механизмов и транспортных средств.

- Существуют системы абсолютного и относительного (локального) позиционирования. Абсолютное позиционирование подразумевает получение каждый раз новых координат вне зависимости от предыдущего местоположения (GPS). Относительное позиционирование предполагает знание начальных координат и вычисление в процессе движения разностных координатных компонент. Системы локального позиционирования обеспечивают большее разрешение, чем система GPS, кроме того, некоторые из них могут работать как снаружи, так и внутри зданий, обеспечивая непрерывное отслеживание передвижения объекта.
- Выделим группы технологий локального позиционирования:
- Радиолокационные технологии (в статье рассмотрим именно эти технологии для дальнейшего сравнения их с предлагаемой технологией LoRa);
- Технологии инерциального позиционирования;
- Технологии, основанные на изменении магнитного поля;
- Оптические технологии;
- Ультразвуковые технологии.
- Радиолокационная технология – это технология, в которой для определения местоположения объектов используются радиосигналы.
- Основные радиолокационные технологии:
- UWB (Ultra-Wide Band, сверхширокая полоса). UWB использует в качестве несущей сверхширокополосные сигналы с крайне низкой спектральной плотностью мощности для беспроводной передачи данных;
- Wi-Fi (от англ. Wireless Fidelity) – технология передачи данных среднего радиуса действия (несколько десятков метров) в локальной сети с устройствами на основе стандартов IEEE 802.11;
- ZigBee – стандарт для набора высокоуровневых протоколов связи, использующих небольшие,

маломощные цифровые трансиверы, основанный на стандарте IEEE 802.15.4 для беспроводных персональных сетей;

- Bluetooth – спецификация беспроводных персональных сетей (WPAN) ближнего радиуса действия. Несущая частота сигнала меняется 1600 раз в секунду псевдослучайным образом, что позволяет избежать проблем при функционировании группы устройств в непосредственной близости и повысить безопасность передачи данных.
- Большинство из вышеперечисленных методов (исключая Bluetooth) используют для точного определения местоположения объектов один и тот же метод – разностно-дальномерный, так как он имеет оптимальное соотношение между точностью и простотой реализации.
- При рассмотрении технологии беспроводной передачи данных LoRa применительно к проектированию систем локального позиционирования, предлагается так же использовать разностно-дальномерный метод (РДМ) определения координат объекта.

2.2. Разностно-дальномерный метод

Разностно-дальномерный метод основан на измерении разностей времени прихода сигнала от источника радиоизлучения (ИРИ) до пункта приема (ПП). Для определения разности дальностей необходимо измерить временные задержки между моментами прихода сигналов ИРИ каждым ПП. В общем случае, для определения координат ИРИ на плоскости требуется 3 ПП, а в пространстве не менее 4 ПП.

Местоположение ИРИ (рис. 1) определяется как точка пересечения двух линий положения (гипербол) на плоскости и точка пересечения трех гиперболоидов вращения с фокусами в точках расположения ПП в трехмерном пространстве.

Оценка РДМ является задержкой, которая соответствует максимуму функции взаимной корреляции. Таким образом, зная местоположение каждого приемника, можно найти оценку местоположения источника излучения при условии, что все приемники синхронизированы по времени.

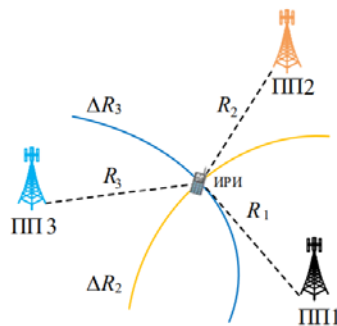


Рис. 1. Принцип реализации РДМ

Определение местоположения ИРИ РДМ основано на формировании системы уравнений [2, 3], связывающих координаты ИРИ с координатами приемников многопозиционной системы и временными задержками распространения сигналов:

$$\begin{cases} \Delta R_{ij} = R_{iM} - R_{jM} = c(\tau_{iM} - \tau_{jM}) = c\Delta\tau_{ij}, \\ R_{iM} = \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2 + (z_i - z_M)^2}, \\ R_{jM} = \sqrt{(x_j - x_M)^2 + (y_j - y_M)^2 + (z_j - z_M)^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где ΔR_{ij} – разности расстояний между ИРИ (x_M, y_M, z_M) и несколькими точками приема сигнала (x_i, y_i, z_i), определяемые через измерения взаимных временных задержек распространения сигналов τ_{ij} ; c – скорость света.

Для решения систем нелинейных уравнений наиболее часто применяют итерационный метод наименьших квадратов или методы многомерной оптимизации, сводящие задачу к оптимизации функционала суммы квадратов ошибок:

$$F(x, y, z) = \sum_{i=2}^N (R_1(x, y, z) - R_i(x, y, z) - c\Delta\tau_{1i})^2 \quad (2)$$

где $R_i(x, y, z) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$ – расстояние от i -го приемника до источника излучения.

Путем введения дополнительного уравнения систему уравнений (1) можно представить в виде:

$$\begin{cases} (x_1 - x_M)^2 + (y_1 - y_M)^2 + (z_1 - z_M)^2 = R^2, \\ (x_2 - x_M)^2 + (y_2 - y_M)^2 + (z_2 - z_M)^2 = (R + \Delta r_{12})^2, \\ (x_3 - x_M)^2 + (y_3 - y_M)^2 + (z_3 - z_M)^2 = (R + \Delta r_{13})^2, \\ (x_4 - x_M)^2 + (y_4 - y_M)^2 + (z_4 - z_M)^2 = (R + \Delta r_{14})^2, \\ (x_5 - x_M)^2 + (y_5 - y_M)^2 + (z_5 - z_M)^2 = (R + \Delta r_{15})^2, \end{cases}$$

где R – расстояние от ИРИ до ПП; $\Delta r_{ij} = (r_i - r_j)$ – разность расстояний от ИРИ до i -го и j -го приемника.

Путем соответствующих преобразований система может быть сведена к линейной. Представим ее в матричном виде:

$$2 \begin{pmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 & -c\Delta t_{12} \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 & z_1 - z_3 & -c\Delta t_{13} \\ x_1 - x_4 & y_1 - y_4 & z_1 - z_4 & -c\Delta t_{14} \\ x_1 - x_5 & y_1 - y_5 & z_1 - z_5 & -c\Delta t_{15} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \\ R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1^2 - r_2^2 + (c\Delta t_{12})^2 \\ r_1^2 - r_3^2 + (c\Delta t_{13})^2 \\ r_1^2 - r_4^2 + (c\Delta t_{14})^2 \\ r_1^2 - r_5^2 + (c\Delta t_{15})^2 \end{pmatrix}$$

где $r_i(x, y, z) = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$ – расстояние от i -го приемника до начала координат ДСК; $\Delta t_{ij} = \Delta r_{ij}/c$ – временные задержки распространения сигналов.

Данный метод не требует информации о точной структуре сигнала, достаточно использовать область спектра, в которой сосредоточена основная энергия сигнала.

3. Обзор технологии LoRa

Технология LoRa является современной технологией беспроводной передачи данных, разработанной компанией Semtech. LoRa объединяет в себе одноименный метод модуляции (запатентован компанией Semtech) в беспроводных сетях LPWAN и открытый протокол LoRaWAN.

3.1. Метод модуляции LoRa

LoRa (от англ. Long Range) представляет собой метод модуляции, который позволяет передавать маленькие пакеты данных и обеспечивать большую дальность связи.

Данный метод основан на технике расширения спектра (spread spectrum modulation) и вариации линейно-частотной модуляции (ЛЧМ, chirp spread spectrum), при которой данные кодируются широкополосными импульсами с частотой, увеличивающейся или уменьшающейся на некотором временном интервале.

Математически ЛЧМ сигнал представляется в виде выражения [4]:

$$x(t) = A_0 \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right), \quad (3)$$

где $-\frac{T_c}{2} \leq t < \frac{T_c}{2}$ и описывается следующими параметрами:

- $f_0 = \frac{f_H + f_B}{2} = \frac{\omega_0}{2\pi}$ – центральная (несущая) частота радиосигнала;
- $f_H = f_0 - BW/2$ – нижняя частота радиосигнала;
- $f_B = f_0 + BW/2$ – верхняя частота радиосигнала;
- BW – ширина спектра радиосигнала;
- $T_c = \frac{2^{SF}}{BW}$ – длительность радиосигнала;
- SF – коэффициент расширения спектра;
- $\mu = \frac{BW}{T_c}$ – скорость изменения частоты радиосигнала;
- Основная суть модуляции заключается в том, что каждый бит данных кодируется несколькими элементами сигнала или чипами (от англ. chip). Соотношение между скоростью передачи данных R_b и чиповой скоростью R_c (скоростью передачи элементов сигнала) для модуляции LoRa задается следующей формулой:

$$R_c = 2^{SF} \cdot R_b \quad (4)$$

Благодаря своей высокой чувствительности (-148 dbm), LoRa идеально подходит к устройствам с требованиями низкого потребления электроэнергии и высокой устойчивости связи на больших расстояниях [5].

LoRa позволяет демодулировать сигналы на уровне 20 dB ниже уровня шумов, тогда как большинство систем с частотной манипуляцией (frequency shift keying, FSK) могут корректно работать с сигналами на уровне не ниже 8-10 dB над уровнем шумов. Модуляция LoRa определяет физический уровень, который может использоваться в сетях с различной коммуникацией – «звезда», «точка-точка» (рис. 2) и другие.

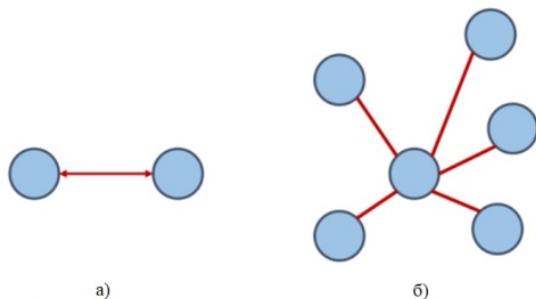


Рис. 2. а) коммуникация «точка-точка»;
б) коммуникация «звезда»

Схема соединения «звезда» является основой сети LoRaWAN.

3.2. LoRaWAN сети

LoRaWAN – это одна из первых полностью виртуализированных сетевых беспроводных технологий, доступных для коммерческого использования.

Архитектура LoRaWAN сетей (рис. 3) обеспечивает гибкость развертывания, контроля и маршрутизации данных между конечными устройствами и приложениями.

Сеть LoRaWAN состоит из следующих ключевых компонентов.

1. Конечные устройства (End Point);
2. Базовые станции/шлюзы (Base Station);
3. Сетевой сервер (Network Server);
4. Приложение конечного пользователя (End User Application).



Рис. 3. Типовая архитектура сетей LoRaWAN

Конечные устройства LoRaWAN сети представляют собой радиомодуль, предназначенный для коммуникации и информационного взаимодействия с прикладными целевыми устройствами.

Базовые станции (БС) обеспечивают информационное взаимодействие конечных

устройств и серверной платформы и выполняют функцию геопозиционирования конечных устройств с требуемой точностью.

Сетевой сервер осуществляет аутентификацию БС в сети, управляет информационным обменом между БС и серверной платформой, рассчитывает наиболее рациональные маршруты передачи сообщений и команд, оптимизирует сетевой трафик.

LoRaWAN поддерживает передачу данных на скорости от 300 бит/с до 5 кбит/с при использовании полосы частотного спектра 125 кГц. Для увеличения срока работы устройства от автономного источника питания и повышения емкости системы, инфраструктура сети LoRaWAN использует адаптивную схему выбора скорости передачи данных (Adaptive Data Rate, ADR) для индивидуального управления скоростью передачи данных и конфигурирования радиоканала для каждого конечного устройства.

Для обмена данными во всем мире предоставляется нелицензируемые (ISM – industrial, scientific, medical) диапазоны радиочастот.

Архитектура LoRaWAN дает наилучшее соотношение между площадью покрытия сети, количеством антенн и сроком работы устройства от батареи. Таким образом, конструктивные решения технологии LoRa позволяют обеспечивать устойчивую связь на расстоянии до 5 км в городских условиях (до 15 км в сельской местности) и автономную работу конечных устройств вплоть до 10 лет от одного аккумулятора (типа AA) [6].

4. Система позиционирования с применением технологии LoRa

LoRa-геолокация позволяет определить координаты устройства, работающего в сети LoRaWAN, без использования GPS-приемника (рис. 4). Как работает LoRa-геолокация:

1. БС определяют временные метки, RSSI (англ. received signal strength indicator, показатель уровня принимаемого сигнала) и SNR (англ. signal-to-noise ratio, отношение сигнал/шум) при получении Uplink-сообщений (восходящее сообщение, отправленное конечным устройством серверу) от конечных устройств;
2. Полученный сигнал от конечных устройств принимается минимум тремя БС и с помощью алгоритма РДМ определяются координаты местоположения объекта (РДМ описан в п. 2.2). Микросхемы шлюзов LoRa Semtech имеют часы, которые записывают время прибытия сигнала с точностью до наносекунд.

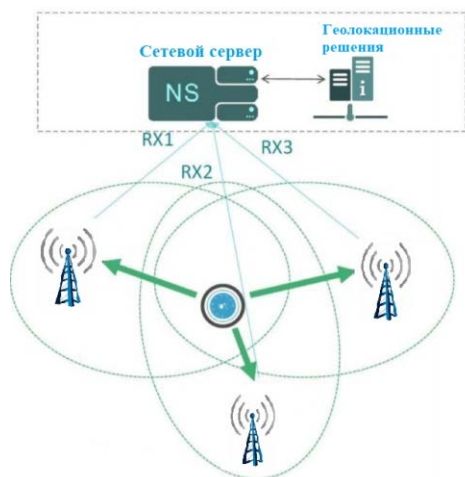


Рис. 4. Архитектура системы позиционирования на основе LoRa и РДМ

В таблице 2 приведено сравнение характеристик LoRa с другими радиолокационными технологиями для определения наиболее эффективной технологии.

Таблица 1. Сравнительные характеристики

	LoRa	UWB	ZigBee	WiFi
Скорость передачи данных	до 5 Кбит/с	до 480 Мбит/с	до 250 Кбит/с	до 6.7 Гбит/с
Энергопотребление	низк.	средн.	низк.	высок.
Зона охвата	до 15 км	до 40 м	до 1600 м	до 150 м
Стоимость	низк.	средн.	низк.	низк.
Надежность	высок	высок.	высок.	средн.
Масштабируемость	до 1 млн.	до 3,5 тыс.	до 65 тыс.	до 254
Точность	средн	высок.	высок.	высок.

Таким образом, исходя из вышеприведенного сравнения, можно сделать вывод о том, что при прочих равных условиях технологию LoRa можно назвать наиболее эффективной.

4.1. Исследование возможностей LoRa

В начале 2016 года компании Lase и AURORA Mobile Technologies провели в г. Пермь опытное развертывание и тестирование системы мониторинга сетей и объектов тепловодоснабжения, созданной на основе технологии LoRaWAN. В ходе проведенных исследований обнаружено, что в условиях городской застройки для установленной на высоте 16 метров БС LoRaWAN устойчивый прием сигнала от датчиков наблюдался на расстояниях до 6 км вне помещений и

с расстояния 1.5 км внутри помещений (при эксперименте – подвал кирпичного здания).

Компания Semtech [7] совместно с Kerlink в 2017 году реализовала на территории Национального парка Мкомази (Танзания) проект по отслеживанию местонахождения особей черного носорога, находящегося на грани вымирания. Semtech совместили данный проект с исследованием эффективности LoRaWAN сети как технологии позиционирования.

Радиус охвата сети составлял 50 км² – пространство обитания животных в Мкомази. Шлюзы Kerlink охватывали данную площадь, находясь на расстоянии от 4 до 10 км друг от друга. В результате исследования была достигнута точность позиционирования около 20 метров и лучше (рис. 5).

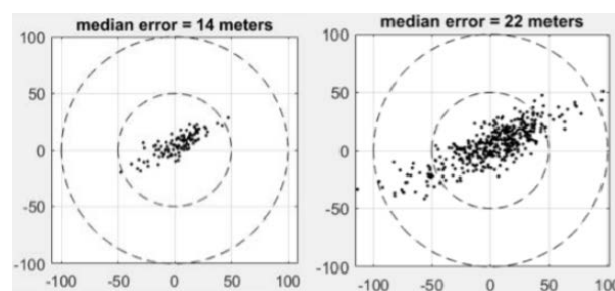


Рис. 5. Результаты эксперимента в Мкомази

Компании Bouygues Telecom и Sagemcom проводили в Париже (2017г.) эксперимент [7] по отслеживанию грузовиков, движущихся по трассе длиной 41,6 км в окрестностях города. Каждый грузовик был оснащен конечным устройством Sicipia™.



Рис. 6. Результаты эксперимента Sagemcom

В целях оценки точности позиционирования, часть грузовиков была оснащена также датчиками GPS-навигации. Как видно из рис. 6, маршрут движения, полученный с помощью РДМ на основе LoRa,

практически совпал с маршрутом, полученным с помощью GPS.

5. Практическая часть

5.1. Имитационная модель

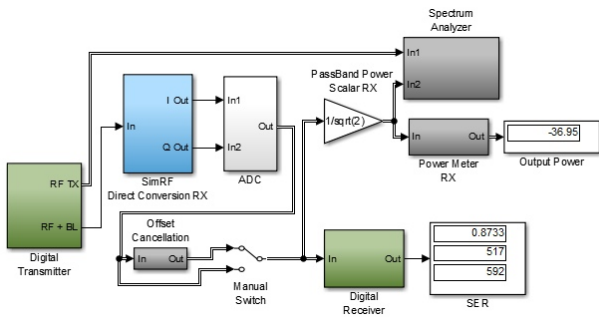


Рис. 7. Имитационная модель

На рис. 7 представлена имитационная модель технологии беспроводной передачи данных LoRa, построенная в среде MATLAB Simulink. Данная модель состоит из цифрового передатчика (Digital Transmitter), цифрового приемника (Digital Receiver), аналого-цифрового преобразователя (ADC), радиоприемника прямого преобразования (SimRF Direct Conversion RX) [8].

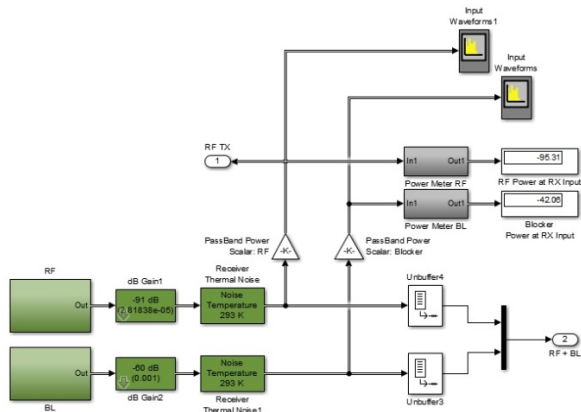


Рис. 8. Цифровой передатчик

На рис. 8 представлен цифровой передатчик. Он состоит из двух ЛЧМ – сигналов: целевого сигнала и мешающего сигнала.

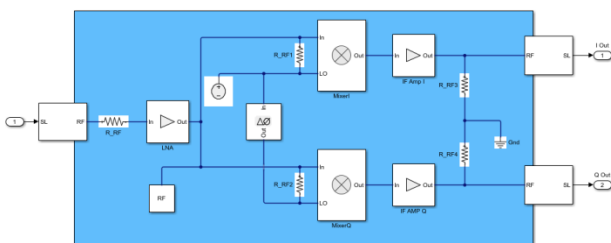


Рис. 9. Приемник прямого преобразования

RF-приемник прямого преобразования (рис. 9) имеет ступень преобразования частоты и две ступени усиления. Резисторы моделируют входное и выходное сопротивление RF-системы, а также

Исследование возможности применения технологии LoRa при проектировании систем позиционирования

изоляция между LO (сигнал гетеродина) и RF-портами (РЧ-сигнал от антенны или малошумящего усилителя) смесителей. Каждый из блоков фиксирует радиочастотные искажения, относящиеся к этой конструкции. Для моделирования минимального уровня теплового шума в среде RF Blockset параметр Temperature в блоке Configuration указывает шумовую температуру 293,0 К.

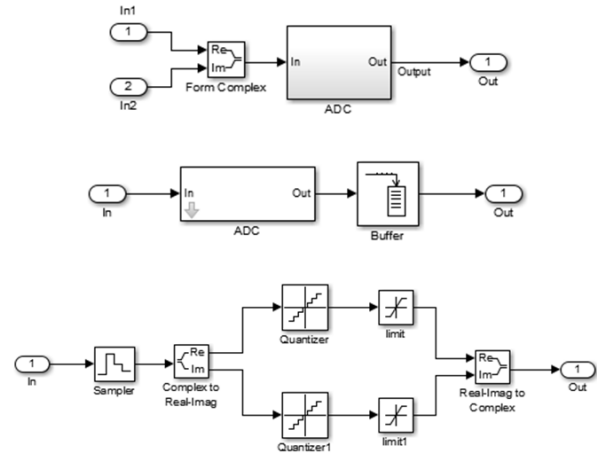


Рис. 10. Аналого-цифровой преобразователь

ADC моделируется с использованием идеального сэмплера и 8-разрядного квантователя, за которым следует блок насыщения для моделирования полного диапазона (рис. 10). Следовательно, ADC правильно моделирует минимальный уровень шума квантования системы и оказывает непосредственное влияние на характеристики приемника.

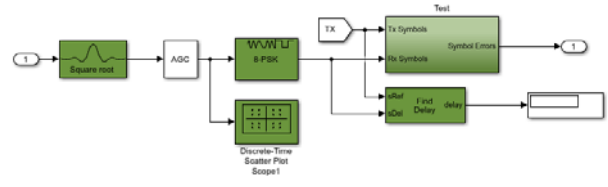


Рис. 11. Цифровой приемник

Цифровой приемник (рис. 11) применяет согласованный фильтр к полученному сигналу, за которым следует функция AGC, и демодулирует сигнал для вычисления частоты ошибок по символам.

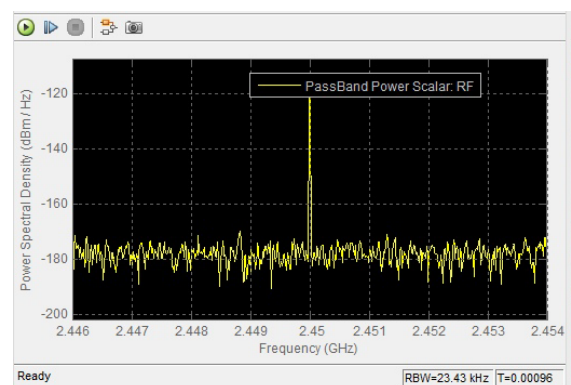


Рис. 12. Спектр полезного сигнала

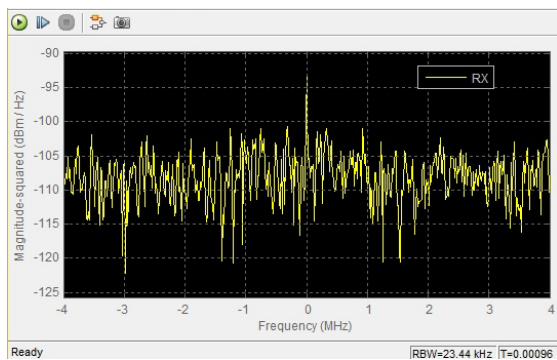


Рис. 13. Спектр сигнала на входе приемника

На рис. 12 показан спектр полезного сигнала, излучаемого цифровым передатчиком. На рис. 13 показан спектр сигнала на входе приемника, включающий полезный сигнал и помехи.

5.2. Реализация РДМ в MATLAB

Для реализации РДМ была разработана имитационная модель на языке MatLab. В качестве входных использованы следующие параметры: координаты пяти БС, координаты ИРИ (7000,2000,300), а также погрешность прихода сигнала. Модель находит оценки координат ИРИ с помощью РДМ. На рис. 14 отображены результаты 500 измерений оценок координат передатчика (в виде маркера «+») и реальные координаты ИРИ (маркер «•»). Модель позволяет оценить разброс полученных значений относительно истинного значения в трехмерной системе координат.

Из рис. 14 видно, что оценки координат передатчика, полученные с помощью РДМ, отличаются от истинных координат ИРИ, но при этом не наблюдаются резкие выбросы.

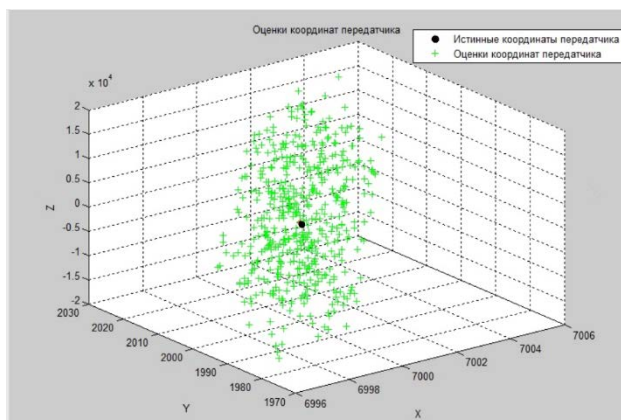


Рис. 14. Оценки координат передатчика

Стоит отметить, что результаты, полученные разными измерениями, не совпадают друг с другом. Это обусловлено присутствием погрешности прихода сигнала, внесенной искусственно для моделирования реальных условий среды.

6. Заключение

В рамках проведенного исследования была рассмотрена задача локального позиционирования и пути ее решения. В статье описан разностно-дальномерный метод, как наиболее точный метод определения координат.

В ходе сравнения LoRa с перечисленными радиолокационными технологиями были выделены следующие преимущества LoRa: широкий радиус действия, низкое энергопотребление, простота реализации, стоимость и надежность. Необходимо заметить, что для передачи Uplink-сообщений, необходимых для определения местоположения объекта, не требуется большая скорость передачи данных. Таким образом, низкая скорость передачи данных LoRa становится преимуществом, обеспечивая длительное время работы аккумулятора.

Опираясь на результаты экспериментов, можно сделать вывод о том, что на точность LoRa-геолокации влияет ряд факторов: площадь покрываемой территории, рельеф местности, расстояние между БС, уровень помех (шумов) в окружающей среде. При оптимальном соотношении данных факторов, можно достигнуть необходимой точности позиционирования.

Технология беспроводной передачи LoRa может эффективно использоваться при создании систем локального позиционирования. Однако потенциал LoRa-позиционирования не раскрыт до конца, что является предпосылкой для дальнейших исследований в этой области.

Список используемых источников

1. Ковтуненко А.С., Тимиров М.А., Валеев С.С. Управление ресурсами системы распределенной обработки потоковых данных на основе многоагентного подхода // Естественные и технические науки. 2018. № 10(124). С. 179-181.
2. Гринь И.В., Ершов Р.А., Морозов О.А., Фидельман В.Р. Оценка координат источника радиоизлучения на основе решения линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 4. С. 71-81.
3. Прыгунова А. А. Оценка достижимых точностей разностно-дальномерного метода определения местоположения источника радиоизлучения с неизвестными координатами: дис. магистра—СПб, 2015. — С. 12-19.
4. Обзор технологии LoRa. Архитектура сетей LoRaWAN. — 2016; URL: <https://itechinfo.ru/node/46> (дата обращения: 15.03.2019).
5. Mohammed Saleh A. Muthanna, Abdukodir Khakimov, Ammar Muthanna. Development of

intelligent street lighting services model based on LoRa technology// Proc. of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2018. P. 90 – 93

6. Гусев О., Эксперимент по созданию системы мониторинга хозяйственных объектов с использованием LoRaWAN// Беспроводные технологии. 2016. № 2. С. 72-76.
7. LoRa Alliance™ Strategy Committee. Geolocation Whitepaper. 2018. P. 7-12.
8. Ashraf A. Taha, Mohamed F. Feteiha, Wadood Abdul. Performance Evaluation for LoRa Transceiver // International Journal of Computer Science and Software Engineering. 2019. Vol.8. № 2. P.25-39.