

Возможности использования радиотрансиверов компании Semtech

в средствах связи систем мониторинга состояния физических полей

В статье проанализирован вариант применения беспроводной связи в системах мониторинга состояния физических полей, приведены результаты лабораторных и полевых испытаний трансивера SX1272 семейства LoRa компании Semtech, проведенных инженерами Московского научно-исследовательского телевизионного института (ЗАО «МНИТИ»).

Игорь Шаров
Виталий Кондрашов
skb320@mniti.ru

Введение

Значительная часть кризисных ситуаций связана с деятельностью объектов повышенной опасности, подверженных как естественным (стихийные бедствия), так и антропогенным угрозам (диверсии, террористические акты, ошибочные действия персонала и др.). Объектами повышенной опасности могут быть трубопроводы, мосты, портовые сооружения, хранилища запасов топлива и химических веществ, высотные здания, подземные сооружения и пр. Возникновение кризисных ситуаций способно приводить к человеческим жертвам и сопровождаться огромными финансовыми потерями.

Оперативное наблюдение за объектами повышенной опасности выполняют системы мониторинга состояния физических полей, задача таких систем — своевременное информирование о деформациях, сдвигах, вибрациях контролируемых элементов, изменении параметров магнитного поля, акустических колебаний в контролируемой зоне. Оконечными устройствами систем являются датчики физических полей, чье разнообразие и невысокая стоимость позволяет формировать системы для мониторинга различных объектов и охраны территорий.

Наиважнейшее условие качественной работы систем мониторинга — правильное расположение этих датчиков, при установке которых определяющим становится требование полноты записи состояния физических полей, поэтому выбор их местоположения осуществляется вне зависимости от условий размещения.

Сбор информации от датчиков реализуется при кабельном или беспроводном подключении

считывающих устройств. Причем для передачи информации предпочтительно использование радиосвязи, так как сокращается время, а соответственно, и стоимость монтажных работ, повышается надежность системы.

Основные эксплуатационные требования, необходимые для обеспечения качественной работы и активного распространения систем мониторинга на объектах повышенной опасности, предусматривают отсутствие ограничений по расположению датчиков, определяемых условиями радиосвязи. Приемопередатчик, входящий в состав отдельного (автономного) устройства системы, должен поддерживать устойчивую связь, даже если нет прямой видимости между антеннами, в том числе при размещении на уровне земли. А потому применяемые средства радиосвязи должны быть построены на основе энергетически эффективных сигналов, чтобы достичь высоких характеристик чувствительности, избирательности приемника.

Использование для радиосвязи ISM-диапазонов является дополнительным фактором распространения систем на территории Российской Федерации. Наилучшие характеристики радиосвязи для рассматриваемых условий получены в субгигагерцовом ISM-диапазоне.

Приемопередатчик SX1272 компании Semtech

На рынке электронных компонентов широко представлен сегмент трансиверов субгигагерцового ISM-диапазона, предназначенных для построения радиочастотных модулей приемопередатчика. Применительно к использованию в средствах радиосвязи систем мониторинга

следует особо выделить радиотрансиверы линейки LoRa компании Semtech. LoRa (LongRange) — запатентованный способ модуляции, представляющий собой комбинацию линейной частотной манипуляции (ЛЧМ) и наложенной псевдослучайной M-последовательности, длина которой может изменяться от 6 до 12 (для трансивера SX1272). Структура ЛЧМ-сигнала описана в патенте US 8,406,275 В от 26.03.2013 [1]. Данные решения позволяют достигнуть относительно хороших показателей дальности и надежности радиоканала связи.

Рассмотрим особенности приемопередатчика SX1272, работающего в безлицензионном ISM-диапазоне 868 МГц [2].

В общем виде трансивер SX1272 содержит ряд основных узлов (рис. 1):

- приемопередающий радиотракт;
- многофункциональный модулятор-демодулятор;
- интерфейс ввода-вывода с буферной памятью;
- устройство управления;
- подсистему питания.

Этот перечень характерен для большинства однокристальных приемопередатчиков ISM-диапазона.

Радиоприемный тракт выполнен по схеме с однократным квадратурным преобразованием на низкую промежуточную частоту. Данная схема получила самое широкое распространение в современных однокристальных решениях, поскольку с ее помощью можно реализовать лучшие характеристики радиоприемного устройства в части чувствительности и избирательности по соседнему каналу в сравнении со схемой прямого преобразования. В качестве гетеродина радиоприемного устройства используется синтезатор частоты (СЧ) с дробным коэффициентом деления. Применение дробного СЧ по сравнению с целочисленным позволяет достичь низких значений уровня фазовых шумов и малый шаг перестройки частоты при высокой скорости перестройки. Платой за это является более высокий уровень дискретных внеполосных составляющих в спектре формируемого сигнала, что вполне допустимо для маломощных радиопередающих устройств. Квадратурные сигналы промежуточной частоты усиливаются в тракте промежуточной частоты и поступают на аналого-цифровые преобразователи. Дальнейшая обработка (фильтрация, демодуляция и т. д.) происходит в цифровой форме.

Поддавление зеркального канала осуществляется за счет квадратурного преобразования. Приемопередатчик SX1272 поддерживает следующие виды модуляции: FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK и LoRa.

Основные технические характеристики радиоприемного устройства:

- чувствительность в режиме FSK, полоса 5 кГц, скорость передачи информации 1,2 кбит/с, не хуже: -123 дБм;
- чувствительность в режиме OOK, скорость передачи информации 4,8 кбит/с, не хуже: -117 дБм;
- избирательность по соседнему каналу, не хуже: -50 дБ;
- динамический диапазон по блокированию при отстройке на 1 МГц, не хуже: -73 дБ;

- интермодуляционные искажения 3-го порядка, не менее: $-12,5$ дБм;
- подавление зеркального канала, не менее: -48 дБ.

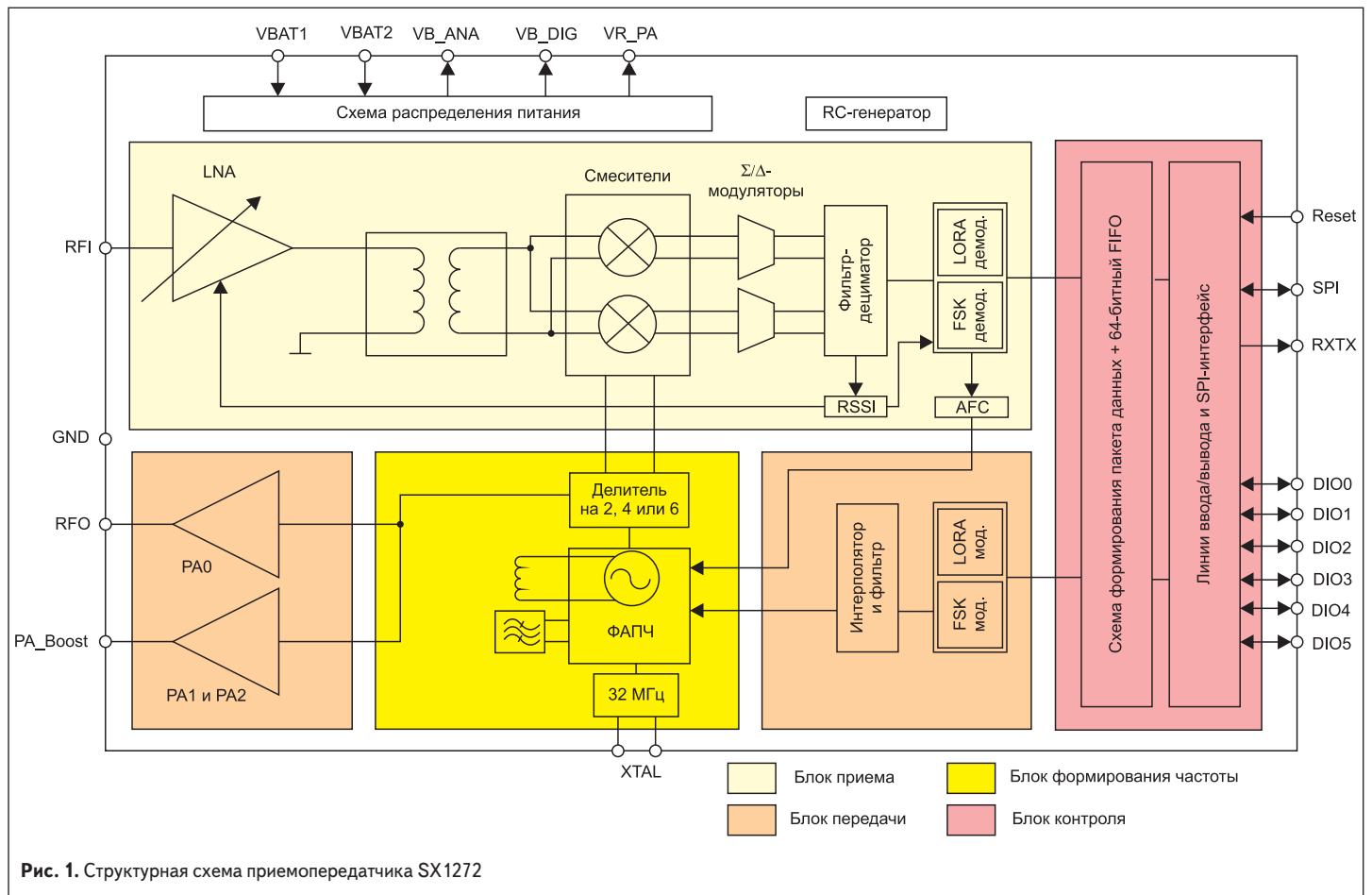
Энергопотребление в режиме приема не превышает 13 мА при напряжении питания 3,3 В. Это выгодно отличает SX1272 от аналогичных решений других производителей.

В данном кристалле реализован достаточно большой динамический диапазон при относительно низком энергопотреблении радиоприемника. В приемопередатчиках сравнимый динамический диапазон достигается при большем энергопотреблении (например, 18 мА у Si4464 компании SiliconLabs). Сравнимые по энергопотреблению решения имеют существенно меньший динамический диапазон (приемопередатчики семейства SPIRIT компании STM). Следует отметить, что динамический диапазон особенно важен в условиях воздействия случайных или преднамеренных помех.

В радиопередающем тракте сигнал гетеродина модулируется с помощью цифрового модулятора, после чего усиливается. SX1272 содержит два канала усиления, один из которых поддерживает работу в номинальном режиме с выходной мощностью до 20 мВт ($+13$ дБм), второй обеспечивает выходную мощность 100 мВт ($+20$ дБм).

Особенности и преимущества применения модуляции LoRa

Главная отличительная черта SX1272 — возможность применения модуляции LoRa. Данная схема модуляции предполагает использование



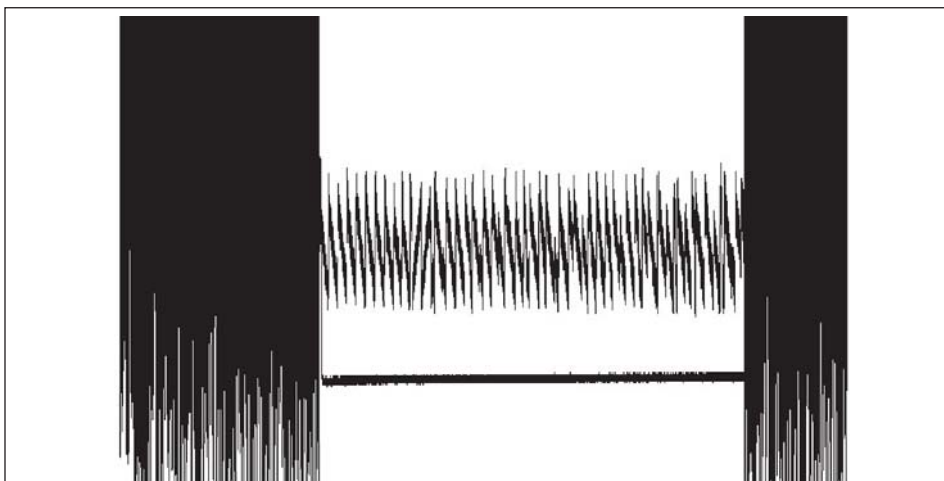


Рис. 2. Осциллограмма протестированного сигнала LoRa

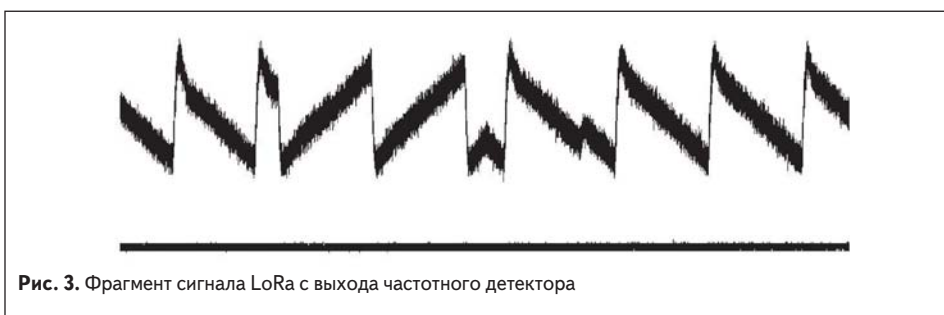


Рис. 3. Фрагмент сигнала LoRa с выхода частотного детектора

технологии расширения спектра и является собственной запатентованной разработкой Semtech Corporation. Поскольку производитель не раскрывает каких-либо подробностей этой технологии, было проведено исследование, направленное на выявление ее особенностей с помощью модулей отладочного комплекта SX1272RF1BAS (SX1272 Evaluation Module 868MHz-version + antenna).

На рис. 2 и 3 представлены осциллограммы протестированного с помощью широкополосного частотного детектора сигнала LoRa с характеристиками:

- Spreading factor SF = 12 (коэффициент расширения, показывающий длину M-последовательности);
- скорость кодирования 4/5;
- полоса сигнала 125 кГц.

Представленные осциллограммы подтверждают использование линейной частотной модуляции для расширения спектра. Такое решение, в отличие от технологии прямого расширения спектра, делает приемник устойчивым к отклонениям частоты от номинального значения.

ЛЧМ находит применение и в решениях фирмы Nanotron — NanoLOC и NanoNET. Однако используемая Nanotron технология

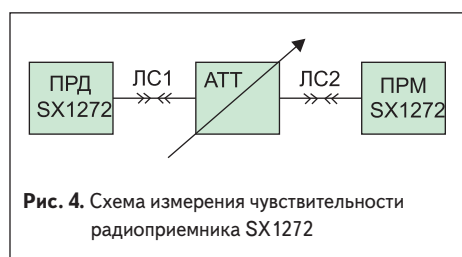


Рис. 4. Схема измерения чувствительности радиоприемника SX1272

способна обеспечить более высокие скорости передачи (до 2 Мбит/с) и требует полосы частот, превышающей 20 МГц. В связи с этим данные приемопередатчики функционируют в ISM-диапазоне 2,4 ГГц.

Применение LoRa позволяет достичь более высокой чувствительности радиоприемника по сравнению с классическими видами модуляции. Ниже приведены значения чувствительности радиоприемника при разных значениях полосы сигнала и коэффициента расширения:

- полоса частот 500 кГц, SF = 6, скорость кодирования 4/5: -116 дБм;
- полоса частот 250 кГц, SF = 6, скорость кодирования 4/5: -119 дБм;
- полоса частот 125 кГц, SF = 6, скорость кодирования 4/5: -122 дБм;
- полоса частот 125 кГц, SF = 12, скорость кодирования 4/5: -137 дБм.

Как следует из представленных данных, выигрыш от применения LoRa достигает 8 дБ по сравнению с FSK при одинаковой скорости передачи данных. Такое преимущество вызвано не только

особенностями применяемой схемы модуляции, но и подавлением внутрикристалльных помех, обусловленных сжатием спектра.

Лабораторные испытания SX1272 в режиме модуляции LoRa

Для проверки заявленных производителем характеристик была произведена оценка чувствительности радиоприемника SX1272, действующего в режиме LoRa. Схема измерения представлена на рис. 4.

В качестве формирователя сигналов использовался приемопередатчик (ПРД) SX1272 из состава отладочного комплекта, работающий в режиме передачи. Для проведения эксперимента передатчик работал на минимальной мощности, которая составила $P_{\text{ПРД}} = 4$ дБм. Сигнал с передатчика подавался на приемник (ПРМ) через линию связи (ЛС1 и ЛС2) и переменный аттенуатор АТТ. При этом были приняты меры по экранированию передатчика, для минимизации его излучения и исключения возможности связи с приемником по эфиру. Качество связи анализировалось встроенным программным обеспечением (ПО) из состава отладочного комплекта, а чувствительность оценивалась как уровень сигнала, при котором относительное число пакетных ошибок (PER) не превышает 0,1 (10%). Уровень сигнала на входе ПРМ определялся в соответствии с выражением:

$$P_{\text{sens}} = P_{\text{ПРД}} - L,$$

где P_{sens} — мощность сигнала на входе радиоприемника, дБм; $P_{\text{ПРД}}$ — выходная мощность тестового передатчика, дБм; L — затухание в линии связи с учетом переменного аттенуатора, дБ. Результаты измерений представлены в таблице.

Как видно из таблицы 1 оценочные значения чувствительности радиоприемника SX1272 соответствуют заявленным, а отличия можно объяснить различием методик измерения чувствительности, а также погрешностями измерений мощности тестового передатчика и затухания в линии связи.

Помимо повышения чувствительности, применение технологии расширения спектра позволяет повысить помехозащищенность системы радиосвязи. Помехозащищенность приемника SX1272 оценивалась при полосе сигнала 125 кГц и коэффициенте расширения SF = 12. Схема измерений представлена на рис. 5.

ПРД SX1272 формировал тестовые пакеты. Через линию связи и переменный аттенуатор

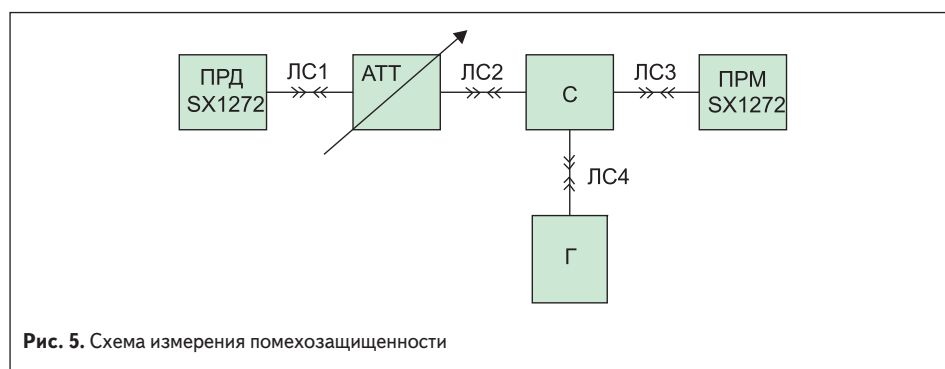


Рис. 5. Схема измерения помехозащищенности

АТТ сигнал подавался на вход сумматора С. На второй вход сумматора направлялся сигнал с высокочастотного генератора Г, настроенного на центральную частоту ПРД (868 МГц). К выходу сумматора подключался приемопередатчик SX1272, работающий в режиме приема (ПРМ). С помощью переменного аттенюатора был установлен уровень сигнала на входе ПРМ, превышающий на 3 дБ измеренную чувствительность приемника (-132 дБм). С генератора Г на вход приемника подавался немодулированный сигнал, имитирующий помеху. Уровень помехового сигнала увеличивался, при этом с помощью встроенного программного обеспечения контролировалось качество приема ПРМ. Уровень помехового сигнала, при котором PER составляло 0,1 (10%), фиксировался. Измерения показали, что в этих условиях помеховый сигнал на 25 дБ превышает полезный. Таким образом, демодулятор LoRa при SF = 12 обеспечивает помехозащищенность 25 дБ по отношению к узкополосной помехе.

Следует также отметить, что технология расширения спектра обеспечивает работу на частотах с высоким уровнем шума (помех). Например, при использовании коэффициента расширения SF = 12 демодулятор LoRa может работать при соотношении сигнал/шум на входе радиоприемного тракта, равном -20 дБ.

Полевые испытания трансивера SX1272

Оценка дальности связи проведена в процессе полевых испытаний в Измайловском лесопарке города Москвы. Модули отладочного комплекта были подключены к ПЭВМ (№ 1 и № 2 соответственно). Управление модулями и запись показаний состояния приемника (модуля № 2) осуществлялись с помощью встроенных средств ПО «SX1272 Starter Kit A».

В точке 1 (рис. 6) на уровне земли был установлен модуль № 1 комплекта, трансивер которого действовал в качестве стационарного передатчика, антенна располагалась перпендикулярно поверхности земли (рис. 7).

Модуль № 2 комплекта использовался как приемник и перемещался в направлении, указанном стрелкой на рис. 6. Все точки регистрации параметров принимаемых пакетов (на отметках 100–700 метров от точки 1 с шагом 25 метров) находились на одной прямой линии, вдоль пешеходной дорожки (рис. 8). Оценка дальности осуществлялась в направлении прямой видимости между антеннами передатчика и приемника при наличии препятствий: стволы деревьев, кустарники. Состояние флоры — осенний лес (листья на ветках практически нет, поверхность земли покрыта опавшей листвой, почва умеренно сырая).

Основным параметром для оценки дальности связи является значение уровня принимаемого сигнала, рассчитанное ПО «SX1272 Starter Kit A» по каждому принятому пакету.

Эксперименты проводились на рабочей частоте 868,95 МГц при значении выходной мощности передатчика модуля № 1, равной 14 дБм (предельно разрешенный уровень для нелегализуемого ISM-диапазона частот 868,7–869,2 МГц в РФ).

Зависимости значений уровня принимаемого сигнала (U , дБм) от расстояния между пере-

Т а б л и ц а . Результаты измерений

Полоса частот, кГц	Коэффициент расширения SF	Скорость кодирования	Измеренная чувствительность, дБм
125	6	4/5	-121
125	12	4/5	-135
250	12	4/5	-133
500	12	4/5	-129

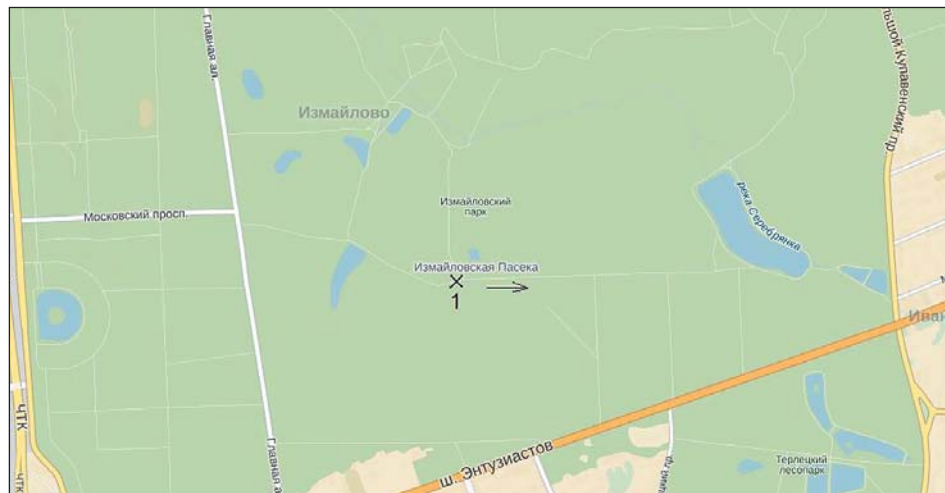


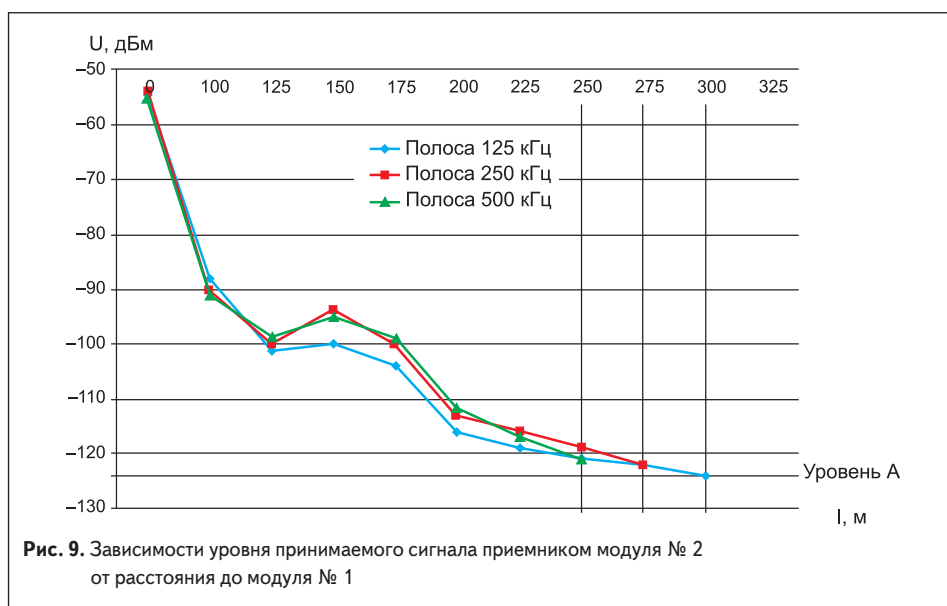
Рис. 6. Расположение просеки Измайловского лесопарка



Рис. 7. Расположение модуля № 1 на уровне земли в точке 1



Рис. 8. Расположение модуля №2 с ПЭВМ на уровне земли на отметке 225 м от точки 1



датчиком и приемником (l , м) в режиме связи «земля-земля» приведены на рис. 9. Показаны три зависимости для различных вариантов полосы спектра радиосигнала LoRa, коэффициент расширения $SF = 7$, скорость кодирования $4/5$. При этом величина уровня принимаемого сигнала является средним арифметическим 50 значений в точке измерения на отметке с устойчивым приемом (не более 2% неверно принятых пакетов). Уровень А — пороговый уровень устойчивого приема.

Полученные данные свидетельствуют о достижении следующих результатов дальности связи: 300 м (полоса 125 кГц), 275 м (полоса 250 кГц)

и 250 м (полоса 500 кГц). При расширении спектра радиосигнала имеет место снижение дальности связи. В случае размещения приемника на высоте 1,5 м от поверхности земли дальность связи существенно увеличивается. Полученные значения уровня принимаемого сигнала подтверждают заявленные параметры микросхемы. Сложная форма зависимостей объясняется особенностями рельефа трассы.

При увеличении коэффициента расширения, одновременном снижении скорости передачи дальность связи увеличивается. Для $SF9$, 125 кГц, $4/5$ в режиме «земля-земля» дальность связи составляет 325 м.

Заключение

В соответствии с проведенными лабораторными и полевыми испытаниями трансивера SX1272 можно сделать следующие выводы:

- Применение модуляции LoRa позволяет достичь высоких значений чувствительности приемника и помехозащищенности радиолинии.
- Благодаря высокой чувствительности можно организовать низкоскоростную радиосвязь в сложных условиях распространения радиоволн, таких как плотная городская застройка, лесной массив, горная и сильно пересеченная местность. Использование технологии LoRa обеспечивает надежную передачу данных при воздействии случайных и преднамеренных помех.
- Сравнительно низкое энергопотребление приемопередатчика SX1272, широкие диапазоны питающего напряжения и рабочих температур способствуют реализации эксплуатационных требований, обеспечивают длительное время автономной работы от источника питания.
- Совокупность достоинств ИС SX1272 из линейки LoRa компании Semtech позволяет использовать ее для построения высокоэффективных средств сбора информации с датчиков в системах мониторинга состояния физических полей. ■

Литература

1. www.patentbuddy.com/pdfdownload?type=pdf&patentNo=840627
2. www.semtech.com/apps/filedown/down.php?file=sx1272.pdf