

УДК 621.37

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЗВУКА С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ LoRa

А. А. Бондарь, И. А. Гневушев

Рассматривается метод прямой трансляции звука маломощными излучателями, работающими по технологии линейно-частотной модуляции сети передачи информации с малой мощностью LoRa. Указанная технология позволяет без больших энергозатрат передавать данные на расстояние до 10-ти км. Разработана система сжатия и преобразования информации для ее последующей трансляции. Приводится описание, схема и макет приемопередающего устройства. В качестве управляющего системой модуля был взят микроконтроллер ESP32 фирмы Espressif. В качестве радиомодуля был выбран приемопередатчик E220-400T30D. Проведены испытания и получены результаты работы приемопередающего устройства на трех типах местности: в поле, в лесу и в черте города. Установлено, что наименьшая дальность связи – в городе, что обусловлено наличием многочисленных источников помех.

Ключевые слова: система передачи звука, маломощные излучатели LoRa, обработка речи, сжатие речи.

Введение

Мощные радиопередатчики в последние 70 лет получили широкое распространение. С их помощью можно передавать самую разнообразную информацию на огромные расстояния. Однако такие излучатели имеют ряд серьезных недостатков.

Одним из таких недостатков являются большие затраты энергии. Вопрос питания радиоустройств, в том числе и приемопередающих, остро стоит в сфере радиоэлектроники, особенно когда речь идет о трансляции звука и видео. Ведь значительные затраты на питание оборудования влекут за собой и большие финансовые затраты на электроэнергию.

Также мощные сигналы, проходя через нелинейные компоненты, создают помехи, которые мешают работе других радиосистем.

Еще одним серьезным недостатком мощных передатчиков является перегрев. Такие передатчики выделяют много тепла, что может привести к перегреву и повреждению компонентов, если не предусмотрено эффективное охлаждение. Также мощные сигналы могут создавать электромагнитные помехи внутри самого передатчика или приемника, ухудшая их работу.

К тому же большинство стран имеют строгие правила, ограничивающие мощность радиопередатчиков, чтобы предотвратить помехи и обеспечить безопасность. Превышение этих ограничений может привести к штрафам или отключению оборудования. Для использования мощных передатчиков требуется согласование частот с регулирующими органами, чтобы избежать конфликтов с другими пользователями радиочастотного спектра.

Дополнительно ко всему вышеперечисленному длительное нахождение вблизи мощного передатчика может представлять опасность для здоровья из-за воздействия электромагнитного излучения.

Однако при передаче звука возможно использование маломощных передатчиков, например, модулей LoRa (Long Range – «большой радиус действия»), что сильно уменьшает затраты энергии на их пита-

ние, так как их мощность не превышает 30 дБм. Но в связи с малой мощностью возникает следующая проблема: передавать информацию данные модули могут максимум со скоростью 2400 бит/с в том случае, когда речь идет о расстояниях до 10-ти км. Однако в настоящее время существуют способы сжатия информации, в том числе и звуковой, которые в той или иной степени влияют на разборчивость передаваемого звука, в зависимости от конкретного метода сжатия. Но это влияние не настолько критичное, чтобы после сжатия невозможно было бы разобрать передаваемую человеческую речь. Голос в некоторой степени теряет узнаваемость, но тем не менее слова по-прежнему остаются разборчивыми.

К тому же маломощные излучатели не нужно согласовывать с регулирующими органами, и они не подпадают под ограничения мощности радиопередатчиков.

Также данные излучатели не несут вреда для здоровья при длительном нахождении вблизи них.

Таким образом, целью исследования является разработка системы обработки, сжатия и передачи человеческой речи по радиоканалу, реализующему технологию LoRa. В качестве радиотранслирующего и принимающего устройств были взяты передатчики E220-400T30D фирмы Ebyte, работающие по протоколу LoRaWAN [1]. LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) – это протокол беспроводной связи, который используется для создания масштабируемых радиосетей с низким энергопотреблением и большим радиусом действия. В качестве управляющего устройства был выбран микроконтроллер (МК) ESP32 фирмы Espressif [2].

1. Обработка и сжатие речи

Обработка звука происходит следующим образом: человеческая речь посредством микрофона переводится в аналоговые колебания. Затем они оцифровываются с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), встроенного в микропроцессор. Разрядность АЦП – 16 бит. Частота дискретизации – 8 кГц. После оцифровки каждого значения его разрядность понижается до 8 бит для дальнейшего его воспроизведения на принимающей стороне.

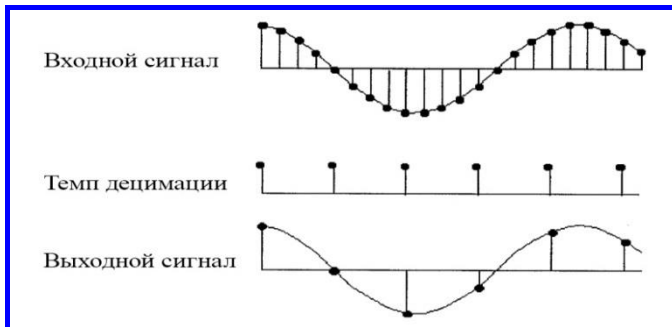


Рис. 1. Пример децимации входного дискретного сигнала

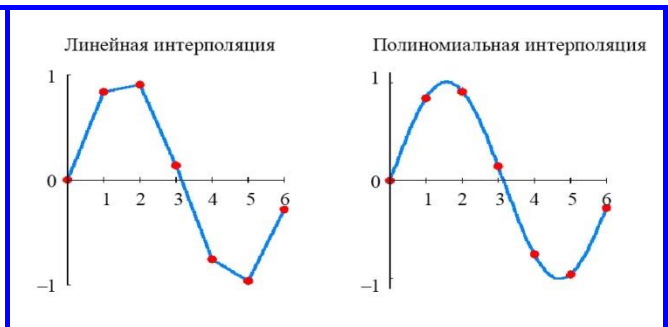


Рис. 2. Примеры интерполяции последовательности одной переменной

Для сжатия речи в данном случае был использован метод децимации с коэффициентом 3 (рис. 1). При этом часть информации о сигнале теряется, однако эта потеря не критично сказывается на разборчивости передаваемой речи.

Децимация – уменьшение частоты дискретизации дискретного во времени сигнала путём прореживания его отсчётов. Отсчёт – численное значение напряжения сигнала в определённый момент времени.

Один из способов децимации – отбрасывание определенных отсчётов сигналов. Из исходной последовательности отсчётов берётся каждый N -й отсчет (N – целое число), остальные отсчёты удаляются.

Ещё один метод децимации – на основе дополнительного стробирования отсчётов АЦП (по серии отсчётов АЦП формируется один суммарный отсчёт, жёстко привязанный к сетке импульсов такта АЦП).

Также существует вариант децимации, связанный с агрегированием нескольких соседних отсчётов в один, например, с помощью вычисления среднего арифметического. В нашем случае используется способ децимации, при котором часть отсчетов отбрасывается.

На приемной же стороне происходит интерполяция принятых значений, коэффициент интерполяции 3. Интерполяция – метод приближенного восстановления последовательности при помощи значений самой последовательности.

Некоторые виды интерполяции (рис. 2):

1. Линейная интерполяция – это способ вычислить промежуточное значение функции по нескольким уже известным её значениям. Она предполагает вычисление промежуточного значения функции по двум точкам, условно проведя прямую между ними.

2. Полиномиальная интерполяция – это интерполяция набора данных полиномом минимально возможной степени, который проходит через точки в наборе данных. Это наиболее известный из методов одномерной интерполяции. Его достоинствами являются простота реализации и хорошее качество получаемых интерполянтов. Воспроизведение происходит при помощи встроенного в микропроцессор цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Разрядность ЦАП – 8 бит. Аналоговые колебания, снимаемые с выхода ЦАП, подаются на динамики для воспроизведения.

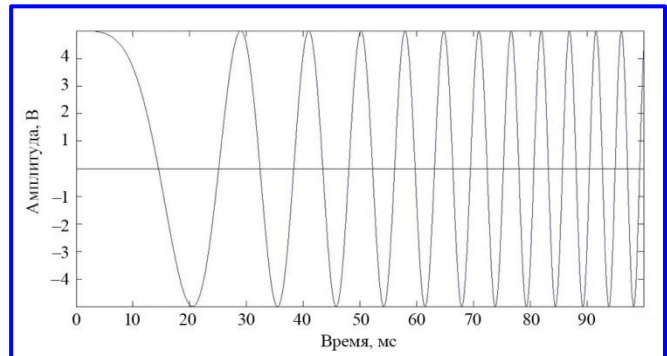


Рис. 3. Вид линейно-частотно-модулированного сигнала

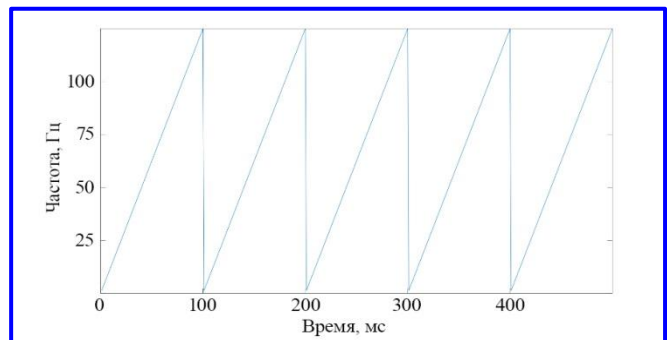


Рис. 4. Зависимость частоты от времени немодулированного сигнала

2. Технология LoRa

Технология LoRa – запатентованная технология линейно-частотной модуляции сети передачи информации с малой мощностью. LoRa использует линейно-частотную модуляцию (ЛЧМ). На рис. 3 приведен вид ЛЧМ-сигнала. При ЛЧМ частота сигнала линейно возрастает в определенной полосе, возрастание происходит циклически (рис. 4). Скорость, с которой возрастает частота в каждом цикле, характеризуется коэффициентом расширения спектра (*Spreading Factor* – SF). Увеличение SF на единицу означает уменьшение скорости изменения частоты в цикле в два раза (рис. 5), то есть чем больше SF, тем медленнее скорость возрастания частоты, следовательно, тем медленнее скорость передачи данных по радиоканалу.

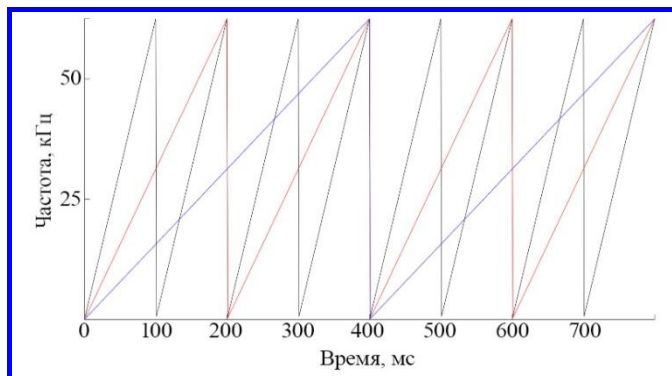


Рис. 5. Зависимость частоты от времени для разных значений коэффициента расширения спектра

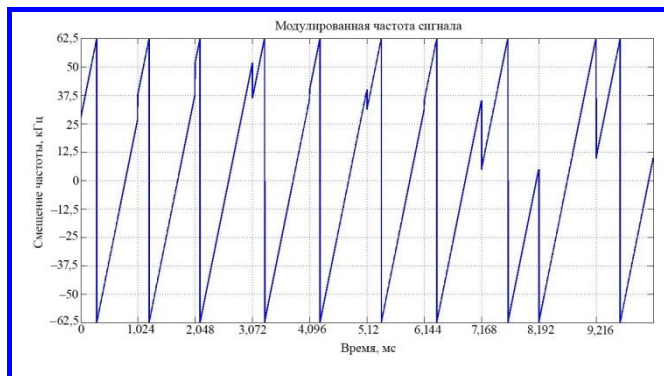


Рис. 6. Зависимость частоты от времени модулированного сигнала

Таблица 1

Скорость передачи полезной информации в бит/с в зависимости от значений коэффициента расширения спектра и скорости кодирования

СК	SF = 7	SF = 8	SF = 9	SF = 10	SF = 11	SF = 12
СК = 4/5	5469	3125	1758	977	537	293
СК = 4/6	4557	2604	1465	814	448	244
СК = 4/7	3906	2232	1256	698	384	209
СК = 4/8	3418	1953	1099	610	336	183

Модулированный ЛЧМ-сигнал представляет собой циклы, в каждом из которых возрастание частоты обрывается и начинается заново (рис. 6). Демодуляция состоит в выделении промежуточной частоты, на которой был закончен цикл (значением этой промежуточной частоты кодируется передаваемая информация).

Также в технологии LoRa используется понятие скорость кодирования (СК). СК в LoRa – это параметр, определяющий степень избыточности, то есть соотношения между полезными данными и добавленной избыточностью. В LoRa используются следующие значения СК: 4/5, 4/6, 4/7 и 4/8. Это означает, что каждые 5, 6, 7, 8 бит передаваемых данных содержат только 4 бита полезной информации. От значения СК зависит скорость передачи данных по радиоканалу и дальность связи (табл. 1). Чем оно ниже, тем больше времени требуется для передачи одного и того же объема полезных данных, но тем лучше защита от ошибок, что позволяет увеличить дальность связи, особенно в условиях сильных помех. Более высокий уровень избыточности помогает приемнику восстановить данные даже при слабом или поврежденном сигнале.

3. Описание и схема приемопередающего устройства

Как уже говорилось ранее, в качестве управляющего устройства был выбран МК фирмы *Espressif*. На рис. 7 изображена функциональная схема.

Кнопки S1 и S2 предназначены для ввода команд для МК. S1 – для записи голосового сообщения, S2 – для его отправки. Команда для начала

записи или отправки записанного сообщения подается посредством однократного нажатия на кнопку S1 или S2, соответственно.

Для индикации работы устройства в схеме имеются три светодиода (LED1, LED2, LED3) и символический дисплей (LCD1602).

Динамик (на рис. 7 обозначен как *speaker*) предназначен для воспроизведения сообщения, принятого с другого устройства.

Запись голосового сообщения осуществляется при помощи микрофона (на рис. 7 обозначен как *mic*). В качестве микрофона был выбран высокочувствительный звуковой модуль KY-037.

Передача и прием информации по радиоканалу осуществляется при помощи модуля LoRa (E220-400T30D). Данные передаются пакетами, их размер составляет 200 байт. Также модуль оснащен буфером, размер которого – 400 байт.

Скорость передачи данных – 2400 бит/с [3]. Передача информации от МК к модулю LoRa и обратно осуществляется через интерфейс универсального асинхронного приемопередатчика (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter – UART*). Выходы интерфейса – Rx, Tx. Выход модуля AUX является индикатором занятости передатчика: если на выходе логическая единица, это означает, что или модуль не занят передачей информации, или его буфер загружен не до конца. Если же на выходе контакта логический ноль, то модуль занят и в его буфере нет свободного места.

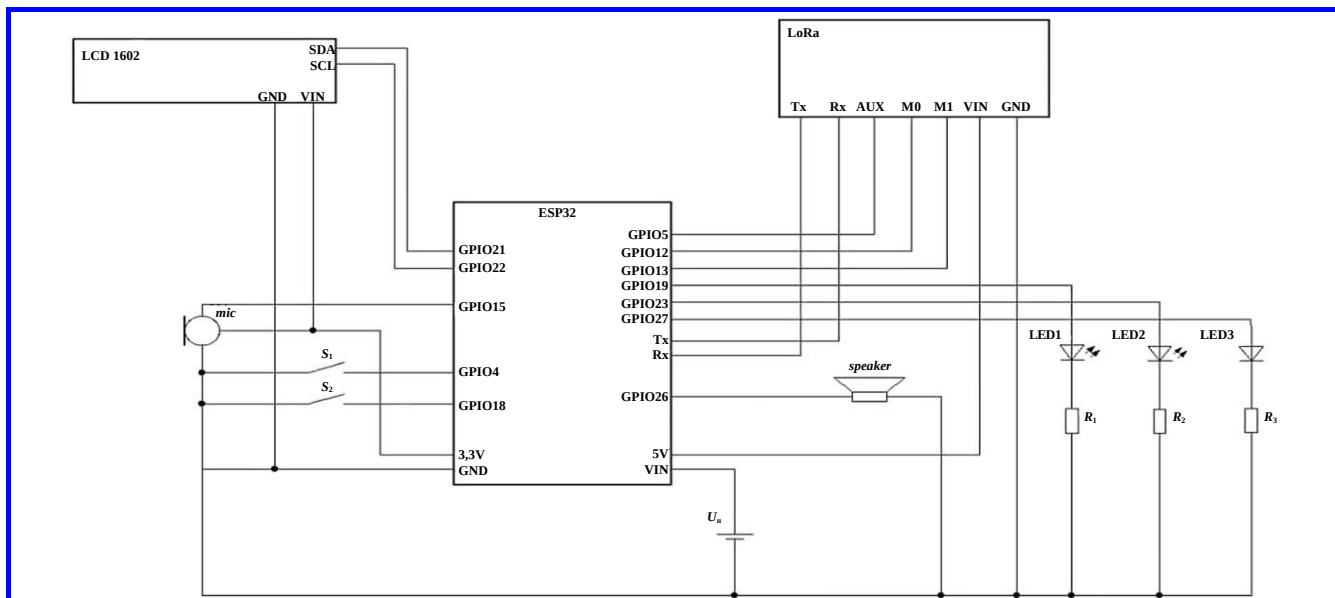


Рис. 7. Функциональная схема приемопередающего устройства

Питание к МК подается от батареи, обозначенной как U_a на рис. 7.

Контакты модуля LoRa M0 и M1 отвечают за режим работы этого модуля (режимы передачи и сна и два вида режима *Wake on Radio* (WOR), режима экономии энергии, когда устройство просыпается либо через определенные временные интервалы, либо при получении данных). Краткое описание режимов приведено в табл. 2.

В данном случае оба передатчика работают в режиме передачи (0). Контакты M1 и M0 подключены на землю.

Светодиоды LED1, LED2 и LED3 служат индикаторами процессов в устройстве. Если горит LED1, значит, в данный момент происходит запись голосового сообщения. LED2 – индикатор передачи записанного сообщения. LED3 – индикатор воспроизведения.

Внешний вид макета приемопередающего устройства приведен на рис. 8.

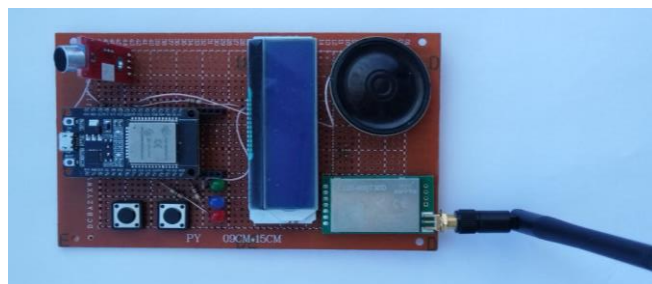


Рис. 8. Готовый макет приемопередающего устройства

Таблица 2

Режимы работы модуля E220-400T30D

Режим (0 – 3)	M1	M0	Описание
Режим передачи (0)	0	0	UART и беспроводной канал открыты, включена прозрачная передача
Режим передачи WOR (1)	0	1	Работает передатчик WOR
Режим приема WOR (2)	1	0	Работает приемник WOR
Режим глубокого сна (3)	1	1	Модуль переходит в режим сна, автоматически просыпается при настройке параметров

Таблица 3

Результаты измерения дальности связи в зависимости от местности, на которой проводились испытания

Тип местности	Дальность связи
Город	1 700 м
Лес	2 500 м
Поле	8 500 м

Таблица 4

Результаты измерения длительности передачи одного сообщения в зависимости от сжатия

Вид сжатия	Длительность передачи сообщения
Без сжатия	4 мин 27 с
Децимация с коэффициентом 2	2 мин 13 с
Децимация с коэффициентом 3	1 мин 29 с

4. Испытания

Испытания проводились на трех типах местностей: в поле, в лесу и в черте города. В ходе испытаний путем передачи голосового сообщения длительностью 10 секунд проводились измерения дальности связи. Также проводились измерения времени передачи одного сообщения в зависимости от сжатия: без сжатия, сжатие в 2 раза (децимация с коэффициентом 2) и сжатие в 3 раза (децимация с коэффициентом 3). В табл. 3 и 4 представлены результаты измерений дальности связи и длительности передачи одного сообщения соответственно.

Заключение

Таким образом, была разработана система связи с применением технологии LoRa и исследованы ее свойства. В результате исследований установлено, что для быстрой передачи сообщений необходимо использовать алгоритмы сжатия информации с потерями. Также в ходе исследований было выяснено, что наилучший результат по скорости с не критичной потерей качества звука был достигнут с использованием децимации с коэффициентом 3.

Испытания в городе показали, что дальность связи в данном типе местности – наименьшая. Это обусловлено наличием многочисленных источников помех (например, сигнализации автомобилей, радиомодули шлагбаумов, радиостанций, охранников и т. д.). Для уменьшения влияния данных помех можно перейти на другие частоты, которые менее загружены.

Дальнейшее направление развития исследования будет направлено на реализацию передачи описанным способом человеческой речи в режиме реального времени.

Литература

1. E220-400T30D User Manual. 433/470MHz 30dBm LoRa Wireless Module // Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., Ltd. – 2012 – 2020. – URL : <https://voltage.ru/datasheets/ebyte/E220-400T30D.pdf>.
2. ESP32. Technical Reference Manual. Version 5.4 // espressif.com : [сайт]. – 2025. – URL : https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf.
3. Montagny, S. LoRa – LoRaWAN for the Internet of Things: A low power, long range, wireless technology / S. Montagny // Universite Savoie Mont Blanc. – 2022. – URL : <https://www.univ-smb.fr/lorawan/wp-content/uploads/2022/01/Book-LoRa-LoRaWAN-and-Internet-of-Things.pdf>.

Поступила в редакцию 07.05.2025

Александр Александрович Бондарь, старший преподаватель кафедры РЭСК, т. 8 (916) 024-76-56, e-mail: bondar_a@mirea.ru.

Илья Алексеевич Гневусhev, студент кафедры РИТ, т. 8 (958) 821-77-47, e-mail: gnevushev.i.a@edu.mirea.ru.

(МИРЭА – Российский технологический университет).

DEVELOPMENT OF A SOUND TRANSMISSION SYSTEM USING LORA TECHNOLOGY

A. A. Bondar, I. A. Gnevushev

The paper examines a method of direct sound transmission using low-power emitters operating with linear frequency modulation in a low-power information transmission network based on LoRa technology. This technology enables data transmission over distances of up to 10 km without significant energy consumption. A system for compressing and converting information for subsequent transmission has been developed. The description, circuit, and prototype of the transceiver device are provided. The system control module is based on the ESP32 microcontroller by Espressif, while the E220-400T30D transceiver was selected as the radio module. Tests were conducted, and the performance results of the transceiver were obtained for three types of terrain: open field, forest, and urban areas. It was found that the shortest communication range occurs in urban environments due to the presence of numerous interference sources.

Key words: sound transmission system, low-power LoRa emitters, speech processing, speech compression.

References

1. E220-400T30D User Manual. 433/470MHz 30dBm LoRa Wireless Module // Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., Ltd. – 2012 – 2020. – URL : <https://voltage.ru/datasheets/ebyte/E220-400T30D.pdf>.
2. ESP 32. Technical Reference Manual. Version 5.4 // espressif.com : [website]. – 2025. – URL : https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf.
3. Montagny, S. Lora – LoRaWAN for the Internet of Things: wireless technology with low power consumption and long range / S. Montagny // University of Savoy in Mont Blanc. – 2022. – URL : <https://www.univ-smb.fr/lorawan/wp-content/uploads/2022/01/Book-LoRa-LoRaWAN-and-The-Internet-of-Things.pdf>.

Alexander Alexandrovich Bondar, Senior Lecturer at the Department of RISK, т. 8 (916) 024-76-56, e-mail: bondar_a@mirea.ru.

Ilya Alekseevich Gnevushev, student of the Department of the Russian Academy of Sciences, т. 8 (958) 821-77-47, e-mail: gnevushev.i.a@edu.mirea.ru.

(MIREA – Russian University of Technology).