

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2023.7.2.006

УДК 621.391.83

## Механизмы обеспечения достоверности и надежности передачи данных по радиоканалу с использованием эстафетной технологии и их реализация на трансиверах с модуляцией LoRa

А. С. Лучинин ✉, И. В. Малыгин, С. И. Стариков,  
В. А. Чечеткин, А. А. Шегал, С. А. Бельков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620002, Россия, г. Екатеринбург, Мира, 32

✉ r303las@mail.ru

### Аннотация

Статья посвящена детальному описанию алгоритмов работы системы эстафетной передачи данных по радиоканалу, обеспечивающих высокую надежность транспортировки результатов наблюдения за работой протяженных объектов на центральный пульт контроля. Особенностью системы является работа на малом уровне мощности передатчиков, экономичность по потреблению электроэнергии, обеспечивающая длительную работу без обслуживания, возможность быстрой замены вышедших из строя элементов без остановки всей системы, мобильность — быстрая установка и запуск системы. Экономичность энергопотребления и работа радиоканала с низким уровнем мощности передатчиков обеспечиваются применением трансиверов SX 1276 (LoRa). Достоверность и надежность передачи данных обеспечивается оригинальными алгоритмами, описание которых приводится в статье. В системе эстафетной передачи данных возможно использование до 255 узлов ретрансляции с установкой их на расстоянии до 4 км друг от друга. Разработаны два варианта построения системы с эстафетной передачей: система с простой эстафетной передачей и система с передачей «через одного». Второй вариант обеспечивает более надежную передачу данных и более высокую вероятность безотказной работы. При числе узлов ретрансляции, равном 50, вероятность безотказной работы простой системы составляет 0,268, а системы с передачей «через одного» — 0,985.

### Ключевые слова

эстафетная передача, ретрансляция, синхронизация, расписание, модуляция LoRa.

### Для цитирования

Лучинин А. С., Малыгин И. В., Стариков С. И., Четкин В. А., Шегал А. А., Бельков С. А. Механизмы обеспечения достоверности и надежности передачи данных по радиоканалу с использованием эстафетной технологии и их реализация на трансиверах с модуляцией LoRa. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(2):191–217. DOI: 10.15826/urej.2023.7.2.006.

## Mechanisms of Ensuring the Accuracy and Reliability of Data Transmission over a Radio Channel Using Relay Technology and their Implementation on Transceivers with LoRa Modulation

**A. S. Luchinin, I. V. Malygin, S. I. Starikov,  
V. A. Chechetkin, A. A. Shegal, S. A. Belkov**

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 19 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

✉ r303las@mail.ru

### Abstract

The article is devoted to a detailed description of the algorithms of the operation of the relay-race data transmission system over a radio channel, which ensure high reliability of transporting the results of monitoring the operation of extended objects to the central control panel. The feature of the system is operation at a low power level of transmitters, energy efficiency, which ensures a long-term operation without maintenance, the ability to replace failed elements quickly without stopping the entire system, mobility — quick installation and start-up of the system. Energy efficiency and operation of the radio channel with a low transmitter power level is ensured by the use of SX 1276 (LoRa) transceivers. The accuracy and reliability of data transmission is ensured by original algorithms, which are described in the paper. In the relay data transmission system, it is possible to use up to 255 relay nodes with their installation at a distance of up to 4 km from each other. Two options of building a system with relay-race transmission have been developed: a system with a simple handover, a system with transmission «Through one». The second option provides more reliable data transfer and higher probability of uptime. With the number of relay nodes equal to 50, the probability of failure-free operation of a simple system is 0.268, and for the system with «Through one» transmission is 0.985.

### Keywords

Handover, relay, synchronization, schedule, LoRa modulation.

## For citation

Luchinin A. S., Malygin I. V., Starikov S. I., Chechetkin V. A., Shegal A. A., Belkov S. A. Mechanisms of ensuring the accuracy and reliability of data transmission over a radio channel using relay technology and their implementation on transceivers with LoRa modulation. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(2):191–217. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2023.7.2.006.

## 1. Общая характеристика системы

Одним из методов передачи данных по радиоканалу на большие расстояния в сложных условиях распространения радиоволн является эстафетная передача с использованием множества ретрансляторов [1–7]. При реализации такой системы необходимо обеспечить надежную передачу данных и выполнить ряд эксплуатационных требований, связанных с разнесением отдельных элементов на значительные расстояния. В различных системах эксплуатационные требования могут быть разными, но можно выделить ряд с большой вероятностью важных для всех:

- удобное электропитание разнесенных на большие расстояния элементов системы и обеспечение работоспособности в течение длительного промежутка времени без обслуживания;
- синхронизация отдельных элементов системы при стационарной работе;
- автоматический вход в режим синхронизации отдельных элементов при несинхронном включении питания во время запуска системы;
- автоматический вход в режим синхронизации после выключения питания отдельных элементов при профилактических работах;
- обеспечение работоспособности системы при выходе из строя отдельных элементов (например, при смене источника питания).

Статья посвящена разработке системы сбора и передачи данных от датчиков, располагаемых на трубопроводе, имеющем протяженность от нескольких десятков до сотен километров.

Основной особенностью разработанной системы является мобильность, обеспечивающая быстроту разворачивания системы сбора и передачу данных с объекта произвольной длины. Система обеспечивает передачу данных по эфиру (радиоканалу) с использованием маломощных передающих устройств (не более 10 мВт) в нелицензируемом частотном диапазоне.

Выполнение эксплуатационных требований обеспечивается путем применения относительно новой элементной базы: транс-

веров фирмы SEMTECH SX 1276 с использованием сигналов с модуляцией LoRa [8, 9].

Надежная передача данных через множество ретрансляторов достигается алгоритмами, которые разработаны в данной работе и свойствами трансиверов SX 1276.

## 2. Обеспечение надежности получения данных с датчиков и их передачи по эстафете на базовую станцию

Структурная схема системы сбора и передачи данных, рассматриваемая в данной работе, изображена на рис. 1.

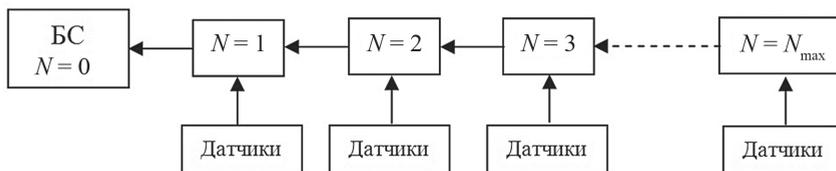
В состав системы входят приемопередающие устройства, выполняющие роль ретрансляторов, и устройства сбора данных с измерительных датчиков. Число узлов ретрансляции в реализованной версии системы может составлять 255.

Каждый узел ретрансляции связан с устройством сбора данных по интерфейсу RS 485. Данные считываются с использованием протокола MODBUS.

В программе считывания данных заложены меры по защите от ошибок предусмотренные протоколом MODBUS, а также возможность повторных запросов на считывание при ошибках чтения данных.

В цепочке эстафетной передачи данных существует опасность искажений или потерь данных. С целью уменьшения такой опасности реализовано несколько мер.

1. Используются все предоставляемые трансивером SX 1276 (LoRa) способы защиты: использование кодирования с исправлением ошибок; передача контрольной суммы (CRC); увеличение длительности синхропреамбулы.



**Рис. 1.** Структурная схема информационной системы с линейной архитектурой расположения элементов

**Fig. 1.** Structural diagram of the information system with a linear architecture of the arrangement of elements

2. Характеристики помехоустойчивости радиоканала с использованием сигнала LoRa проверены экспериментально. Результаты исследования, выполненные авторами этой статьи, описаны в работе [10]. При этом основные характеристики помехоустойчивости, приведенные в Data Sheet на микросхему SX 1276, под-

тверждены. В частности, при  $SF = 12$  наблюдается ошибка приема пакетов (PER) не более 1 % при отношении сигнал/шум на входе приемника SX 1276:  $SNR = -17$  дБ.

На основании исследования свойств радиоканала с модуляцией LoRa выбрана для передачи относительно небольшая длина пакета данных — 64 байт. Полный пакет данных передается в три приема. Сокращение длительности пакета до 64 байт по сравнению с максимальной длиной 256 байт (определяемой микросхемой SX 1276) обеспечивает снижение уровня ошибок примерно в 10 раз (при малых отношениях сигнал/шум).

3. При передаче данных от узла  $N$  к узлу  $N - 1$  последний посылает подтверждение успешного приема. Если подтверждения не поступает, производится повторная передача данных от узла  $N$  к узлу  $N - 1$ . Повторных передач может быть несколько. Если передать данные не удастся после повторов, узел  $N - 1$  сообщает об этом на базовую станцию по оставшейся цепи эстафеты.

Избежать потерь данных в реальной системе не удастся. Информация о неправильности передачи позволяет избежать лишних ошибок при обработке данных. Потери данных при передаче по эстафете должны компенсироваться избыточностью при их формировании. Реальные количественные данные о потерях в настоящий момент отсутствуют. Они будут получаться в процессе испытания системы в реальных условиях.

4. С основными данными, получаемыми от датчиков контроля, по эстафете передаются данные о состоянии оборудования узлов (напряжение питания, температура, влажность, ход часов), а также о качестве радиосвязи — отношение «сигнал/шум» при приеме сигнала узлом  $N - 1$  от передатчика узла  $N$ . Названные показатели позволяют наблюдать за состоянием аппаратуры, обеспечивающей передачу данных и выполнять прогнозирование возможных потерь. С учетом результатов этого наблюдения в системе возможна дистанционная коррекция режимов работы как датчиков, так и узлов системы эстафетной передачи данных.

5. Разработано два варианта системы передачи данных:

- простая эстафетная передача (последовательно от одного ретранслятора к другому);
- эстафетная передача данных с возможностью пропуска одной точки (с передачей «через одного»).

Второй вариант обеспечивает передачу данных в случае «пропадания» одного или нескольких ретрансляторов (расположенных не по соседству).

Простой вариант имеет свои достоинства: выше скорость передачи данных, экономия ресурса источника питания, больше расстояние между соседними ретрансляторами.

Описание алгоритмов работы обоих вариантов приведено ниже.

### **3. Обеспечение надежной продолжительной работы системы**

При построении системы передачи данных, распределенной на большом пространстве, серьезным является вопрос питания ее отдельных составных частей. Выпуск фирмой SEMTECH трансиверов SX 1276 позволил весьма успешно решить эту задачу. Разработанные трансиверы сочетают в себе высокую надежность передачи данных и экономичность по энергопотреблению. Эти достоинства, правда, реализуются при невысокой скорости передачи данных. Однако существует много задач, где высокая скорость передачи данных не требуется. Описываемая в статье система предназначена для решения таких задач.

1. Удобное электропитание разнесенных на большие расстояния элементов системы осуществляется с применением литиевых батарей SAFT LSH 20 (емкость 13 А/ч). Такая батарея обеспечивает ресурс работы системы при 50 ретрансляторах более 1,5 лет (при передаче данных 1 раз в сутки).

2. Длительная работоспособность в сложных условиях окружающей среды обеспечена выбором элементной базы и конструктивным оформлением блоков трансиверов. Надежность работы системы проверена наблюдением за ее работоспособностью в течение более 2 лет в лабораторных условиях и нескольких месяцев в реальной обстановке при работе на реальном объекте в осенне-зимний период.

3. При длительной эксплуатации системы не избежать выхода из строя отдельных узлов по разным причинам. Например, требуется замена батареи питания. Выход из строя одного узла в системе, использующей алгоритм «через одного», не приведет к общей остановке системы.

4. Для того чтобы вышедший из строя блок обратно ввести в строй, разработан специальный алгоритм автоматической синхронизации узлов в системе. Этот алгоритм позволяет включать отдельные ретрансляторы в произвольное время суток и в произвольный день. Этот алгоритм описан в работе [11].

5. В процессе эксплуатации системы может возникнуть необходимость изменения конфигурации (параметров) системы. Основные параметры: рабочую частоту, мощность передатчиков ретрансляторов, интервал времени между передачей данных и другие — можно изменить, не останавливая работу системы.

Для этой цели разработан и реализован алгоритм дистанционного изменения конфигурации системы с использованием технологии эстафетной передачи. В данном случае передача производится в обратном направлении от базовой станции до самого удаленного узла.

6. При включении питания каждого блока ретранслятора выполняется контроль его функционирования: контроль взаимодействия с подключенными датчиками (данные которых должны передаваться); проверка правильности установки системных часов (по сигналам системы GPS); проверка правильности присвоения номера ретранслятора; проверка работоспособности антенны и мощности передатчика.

#### 4. Реализация системы

1. В состав системы входит большое количество элементов (до 255), распределенных на большом протяженном пространстве (до сотен километров).

2. Элементы системы (ретрансляторы) синхронизируются от глобальной системы навигации GPS. Разработан алгоритм автоматической установки синхронизации всех распределенных узлов при их несинхронном включении/выключении. Включение узлов может выполняться в любое время и в любой день [11].

3. Расписание работы системы устанавливается при конфигурировании. Возможно задание любого времени начала работы всех узлов и передачи ими данных. Возможно задание широкого диапазона интервалов передачи данных: максимальный интервал равен 24 часа. Минимальный интервал зависит от количества узлов в системе. Минимальный интервал должен превышать длительность передачи всех данных, получаемых во всех точках наблюдения. Вычисление этой длительности описано ниже.

4. Первичное конфигурирование блоков ретрансляторов выполняется дистанционно (с расстояния до нескольких десятков метров) по радиоканалу (LoRa) с использованием специальной программы конфигурации и оборудования (входящего в состав комплекта оборудования системы).

5. В системе предусмотрен (и реализован) специальный режим контроля работоспособности каждого ретранслятора при включении его питания. Контролируется взаимодействие с подключенным к ретранслятору датчиком, номер ретранслятора, правильность установки синхронизации от GPS, работоспособность передатчика с антенной и величина излучаемой мощности. Для выполнения контроля разработан специальный прибор и программное обеспечение.

6. Режим потребления энергии на платах ретрансляторов оптимизирован таким образом, что значительное потребление происходит только во время приема и передачи данных и во время работы датчика. В остальное время потребление минимизировано и не превышает 200 мкА. Это обеспечивает продолжительность работы системы в составе 50 ретрансляторов не менее 1,5 лет при использовании батарей SAFT LSH 20 (емкость 13 А/ч).

7. Разработан и реализован алгоритм дистанционной переконфигурации ретрансляторов, входящих в состав системы эстафетной передачи данных. Переконфигурация производится также по эстафетной технологии.

Данные для переконфигурации задаются с базовой станции, заводятся в ретранслятор № 0 по интерфейсу UART с использованием протокола MODBUS. Назначается время проведения переконфигурации.

В назначенный час введенные конфигурационные данные передаются по эстафете всем ретрансляторам.

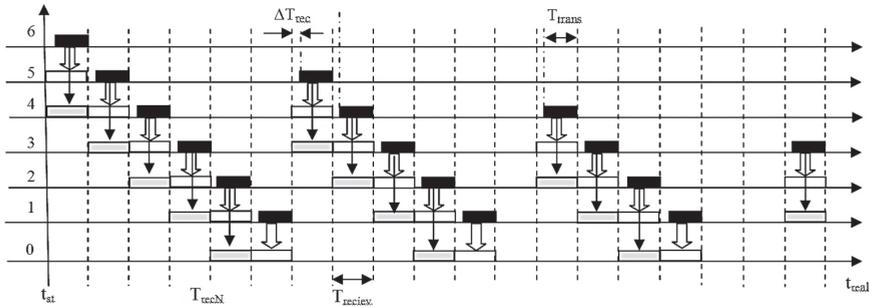
В назначенное новое время начинается новый цикл сбора и передачи данных.

С целью сохранения работоспособности системы в случае сбоя передачи конфигурационных данных по эстафете, прежняя конфигурация сохраняется. Новая конфигурация будет работать наряду со старой. При этом предполагается, что в старой конфигурации был выбран максимальный интервал следования циклов передачи данных. Новая конфигурация интервалов передачи выбирается, если необходимо уменьшить интервал. В новой конфигурации можно изменять кроме временных интервалов и другие параметры: рабочую частоту системы, мощность передатчиков ретрансляторов, другие рабочие параметры.

#### **4.1. Алгоритмы простой эстафетной передачи данных и с возможностью пропуска одной точки ретрансляции (с передачей «через одного»)**

Разработанная процедура простой эстафетной передачи подробно описана в статьях [11, 12]. Процедура строится таким образом, что данные от удаленной точки контроля (с номером  $N$ ) последовательно передаются более близкими к базовой станции приемопередающими узлами. При этом сначала приемник соседней точки, расположенной со стороны базовой станции (с номером  $N - 1$ ), принимает данные от удаленного узла с номером  $N$ . Затем передатчик узла  $N - 1$  передает данные следующей ретранслирующей точке (с номером  $N - 2$ ). Так продолжается до тех пор, пока данные не достигнут базовой станции. После этого передаются в такой же последовательности данные с узла с номером  $N - 1$ .

С целью повышения надежности передачи данных разработан еще один алгоритм, алгоритм передачи данных в случае «пропадания» одного или нескольких ретрансляторов (расположенных не по соседству). Временная диаграмма передачи данных на начальной стадии работы системы показана на рис. 2.



**Рис. 2.** Распределение временных интервалов работы отдельных элементов в системе, реализующей алгоритм «через одного» при  $N_{\max} = 6$

**Fig. 2.** Distribution of time intervals of the operation of individual elements in a system that implements the «Through one» algorithm for  $N_{\max} = 6$

Основная процедура эстафетной передачи данных в алгоритме «через одного» повторяет процедуру в простом алгоритме.

Отличие заключается в том, что передаваемый сигнал от удаленного ретранслятора с номером  $N$  принимается одновременно двумя приемниками узлов  $N - 1$  и  $N - 2$ . На рис. 2 черным обозначены интервалы времени передачи данных. Белым и серым отмечены интервалы приема данных. При этом подтверждение о приеме данных передает только ближайший узел (обозначенный белым).

Успешность приема данных в принимающих узлах ретрансляции отмечается флагами ошибки приема: прием состоялся, флаг = 0; не состоялся, флаг = 1. Если приемник с номером  $N - 2$  успешно принял данные от узла с номером  $N$ , то на следующем интервале времени, при приеме сигнала от узла  $N - 1$ , его данные обновлены не будут. Если же от узла  $N$  данные приняты не были (флаг ошибки = 1), то при приеме данных от узла с номером  $N - 1$ , данные будут исправлены (при условии отсутствия ошибки приема в этом интервале).

Если узел  $N - 1$  отсутствует (вышел из строя), то данные, принятые приемником узла  $N - 2$  от передатчика  $N$ , будут переданы дальше в соответствующий интервал времени передатчиком узла ретрансляции с номером  $N - 2$ .

Описанное правило выполняется при передаче всех трех подпакетов данных. Флаги ошибки приема устанавливаются для каждого подпакета.

На рис. 2 изображено распределение интервалов времени работы узлов ретрансляции, обеспечивающее отсутствие одновременной передачи данных несколькими узлами. При увеличении числа точек ретрансляции при показанном на рис. 2 распределении интервалов несколько ретрансляторов будут одновременно работать на передачу. При  $N = 7$  одновременно будут передавать данные узел № 6 и узел № 1. Приемники № 5 и № 4 будут одновременно принимать сигналы от этих передатчиков.

При недостаточном удалении передатчика № 1 от принимающих узлов № 5 и № 4 могут возникнуть ошибки приема основного сигнала от узла № 6.

На временной диаграмме, подобной рис. 2, при  $N = 7$ , расстояние между передающим узлом № 6 и приемным узлом № 4 составляет два пролета размещения узлов ретрансляции. Расстояние между передающим узлом № 1 и приемным узлом № 4 — три пролета. Из-за малого различия расстояний велика вероятность мешающего действия.

Чтобы ослабить мешающее действие второго передатчика, интервалы между активной работой узлов требуется увеличить. С увеличением числа узлов требуется увеличивать интервалы пауз между активной работой узлов. Допустимым является такое увеличение интервалов, при котором одновременная работа двух передатчиков будет иметь место лишь при  $N_{\text{sys}} > 8$ . При этом второй передатчик будет удален от приемника на 5 пролетов.

Чтобы не слишком сильно увеличивать продолжительность передачи всех данных в системе с передачей «через одного», выбор интервалов между включениями узлов сделан более сложным образом, чем в системе с простой эстафетной передачей, описанной в [12]. Алгоритм установки интервалов иллюстрируется рис. 3.

Длительность интервалов зависит от числа узлов в системе. Все временные интервалы, показанные на рис. 3, кратны основной единице  $T_{\text{receive}}$  — интервалу времени приема пакета данных приемником узла ретрансляции (рис. 2):

$$\begin{aligned} \text{del}_1 &= k1 \cdot T_{\text{receive}}; \text{del}_2 = k2 \cdot T_{\text{receive}} - \Delta T_{\text{rec}}; \\ \text{del}_3 &= k3 \cdot T_{\text{receive}} - \Delta T_{\text{rec}}; T_{\text{rec}N} = (N_{\text{sys}} - 2) \cdot T_{\text{receive}}. \end{aligned}$$

Интервалы  $\text{del}_2$  и  $\text{del}_3$  укорочены на величину  $\Delta T_{\text{rec}}$  — равную задержке между включениями приемников и передатчиков (рис. 2).



$$T_{\text{cikle}} = (N_{\text{sys}} - 2) \cdot T_{\text{recieve}} + (N_{\text{sys}} - 1) \cdot \text{del}_1 + 2 \cdot T_{\text{recieve}} + T_{\text{measure}} + T_{\text{data0}}. \quad (1)$$

### 4.3. Алгоритм передачи пакета данных

В разработанном и изготовленном макете системы эстафетной передачи за одну посылку передается 150 байт данных, получаемых с датчиков, и еще 42 байта служебной информации, характеризующей состояние и работоспособность оборудования узлов ретрансляции и интерфейса, соединяющего датчики с оборудованием передачи данных. С целью повышения надежности передачи данных, как уже было отмечено, пакет из 192 байт делится на три подпакета по 64 байт. Каждый подпакет передается с контролем достоверности его передачи. При возникновении ошибки передачи производится повторная передача.

Разделение пакета на три составляющие при использовании технологии и модуляции LoRa заметно (примерно в два раза) увеличивает время передачи пакета. Поэтому разработан и реализован также алгоритм передачи данных без разделения на подпакеты. Оба алгоритма совместимы для применяемого оборудования и могут быть выбраны при программировании микроконтроллеров плат ретрансляторов.

На рис. 4 показана временная диаграмма взаимодействия передатчика узла ретрансляции с некоторым номером  $N$  и приемника соседнего ретранслятора с номером  $N - 1$ .

На этой диаграмме цифрой 1 обозначен интервал времени приема пакета данных ( $T_{\text{recieve}}$ ). Пакет разбит на три подпакета. Длительность приема подпакета обозначена цифрой 2 ( $T_{\text{subpackage}}$ ). На прием подпакета выделен интервал 3, вдвое превышающий  $T_{\text{subpackage}}$ , для того, чтобы выполнить повторный прием в случае возникновения ошибки приема подпакета.

При успешном приеме подпакета с первой или второй попытки принимающий узел ретрансляции  $N - 1$  посылает на передающий узел сигнал подтверждения. На передачу и прием (узлом  $N$ ) подтверждения выделяется небольшой промежуток времени 5 (около 1 с).

Передатчик узла  $N$  включается с запаздыванием на величину  $\Delta T_{\text{rec}}$  (интервал 4), для того чтобы приемник узла  $N - 1$  подготовился к приему. В макете интервал  $\Delta T_{\text{rec}} = 3$  с.

Если подпакет принимается с первой попытки, то в течение второй половины интервала 3 платы узлов  $N$  и  $N - 1$  переводятся в «спящий» режим (обеспечивающий малое потребление электроэнергии).

В такой последовательности передаются все три подпакета. После истечения промежутка  $T_{\text{recieve}}$  выполняются действия, показанные на рис. 2 и 3.

Порядок работы приемника узла с номером  $N - 2$  (расположенного через один узел от передатчика) отличается от описанного для узла  $N - 1$  только тем, что приемник не посылает подтверждение о правильном приеме подпакета.

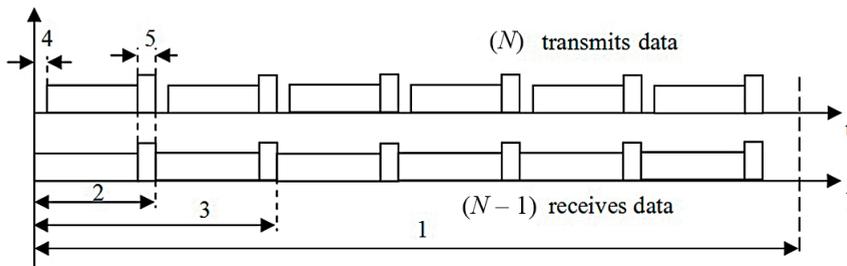


Рис. 4. Временная диаграмма взаимодействия передатчика узла ретрансляции с некоторым номером  $N$  и приемника соседнего ретранслятора с номером  $N - 1$

Fig. 4. Timing diagram of the interaction of the transmitter of the relay node with a certain number  $N$  and the receiver of the neighboring repeater with the number  $N - 1$

Успешно принятые узлами  $N - 1$  и  $N - 2$  подпакеты данных записываются в буферную память микроконтроллеров (в свою область для каждого подпакета). При наступлении очереди передачи этих данных дальше по эстафете, в соответствии с рис. 2 и 3, передаются из этих областей.

Если подпакет принять не удалось, устанавливается флаг ошибки приема. На следующий узел ретрансляции передается информация об ошибке приема подпакета и набор из 64 байт, характеризующий ошибку приема в данном цикле.

Алгоритм передачи данных без разделения на подпакеты похож на описанный. В этом случае на графике рис. 4 следует оставить две области, соответствующие двум попыткам передачи и приема данных. Интервал 1 ( $T_{\text{recieve}}$ ) немного превышает интервал 3. Небольшой запас времени требуется для завершения процедуры передачи и приема, а также для установки удобного значения  $T_{\text{recieve}}$ .

## 5. Количественные характеристики макета системы эстафетной передачи данных

Описанные выше алгоритмы построения и работы системы реализованы в виде макета, использующего радиоканал на основе

LoRa модуляции [8, 9]. Алгоритм реализован на микроконтроллере PIC18LF45k50. В качестве системных часов использована микросхема DS3231, обладающая высокой стабильностью хода часов (не хуже  $\pm 3,5$  ppm в диапазоне температур от  $-40$  до  $+85$  градусов Цельсия). На плате установлен приемник сигналов глобальной системы навигации GPS и «Глонасс» — микросхема SIM68E.

Алгоритм функционирования и синхронизации позволяет строить систему из 255 узлов.

Макет радиоканала, предназначенный для использования в узлах системы (на основе модуля RN 2483 [13]), спроектирован для обеспечения максимальной дальности при ограниченной (не требующей лицензирования) мощности передатчиков (10 мВт). При скорости передачи данных 183 бит/с дальность действия составляет 2–4 км (на основании проведенных экспериментов). Работа макета системы опробована в лабораторных и полевых условиях. Проведены испытания и на реальном объекте.

Внешний вид платы сбора данных с датчиков и передачи их по радиоканалу показан на фотографии рис. 5.



**Рис. 5.** Внешний вид платы сбора данных с датчиков и передачи их по радиоканалу

**Fig. 5.** The exterior of the board for collecting data from sensors and transmitting them over the air

Испытание макетов ретрансляторов проведено на участке прямойлинейной просеки вдоль линии электропередачи. Характер местности иллюстрируется фотографией на рис. 6.

Горизонтальный профиль просеки не был ровным. Изменение уровня составляло порядка 10 м. Вдоль трассы местами росли не высокие молодые деревья.

Измерение дальности проведено на частоте, несущей 433 МГц, с использованием в качестве антенн четвертьволновых вибраторов с противовесом. Высота установки антенн выбиралась равной 1,5 м.

Мощность передатчика ретранслятора составляла 10 мВт.

Максимальная дальность, при которой отсутствовали ошибки передачи данных, составила 4 км. На расстоянии 6 км наблюдались сбои при передаче данных. Терялось примерно 10 % пакетов.

Дальность, полученная в данном эксперименте, может быть существенно увеличена при более высоком подъеме антенн или выборе более чистой местности. Напротив, в густом лесу дальность сильно уменьшается. Экспериментальное значение составило примерно 500 м.

Дальность радиоканала по расчету для свободного пространства составляет примерно 1000 км на частоте 434 МГц и 500 км на частоте 868 МГц при использовании антенн типа четвертьволновых вибраторов.



**Рис. 6.** Местность, на которой проведены измерения дальности действия приемопередатчика ретрансляторов системы эстафетной передачи данных

**Fig. 6.** The area where the measurements of the range of the transceiver of the relays of the relay data transmission system were carried out

### 5.1. Оценка вероятности безотказной работы системы эстафетной передачи данных состоящей из большого количества узлов ретрансляции

Основные допущения, принимаемые при анализе надежности промежуточного узла и системы эстафетной передачи в целом.

1. Любой элемент системы может находиться только в одном из двух состояний: работоспособном и неработоспособном.

2. Под отказом будем понимать отсутствие сигнала с требуемыми характеристиками на выходе (входе) промежуточного узла связи.

3. Отказы элементов системы происходят независимо друг от друга.

4. Отказ любого элемента, входящего в состав платы узла ретрансляции, приводит к неработоспособному состоянию узла.

5. Интенсивность отказов элементов —  $\lambda(t)$  удовлетворяет свойствам простейшего потока: поток отказов считается стационарным, а  $\lambda = \text{const}$ . В этом случае вероятность безотказной работы элементов за время  $t$  определяется так:

$$P(t) = \exp(-\lambda \cdot t). \quad (2)$$

6. Данные по интенсивностям отказов элементов, размещенных на плате узла ретрансляции, взяты из [14] и являются ориентировочными. Они позволяют рассчитать вероятность безотказной работы узла ретранслятора.

7. Вероятность безотказной работы узла рассчитывается за 1 год (8 760 ч) непрерывной работы узлов и системы в целом.

8. При расчетах предполагается отсутствие внешних форс-мажорных обстоятельств (отказ по общей причине [14]), например влияние молнии.

Исходными данными для расчета надежности (вероятности безотказной работы) системы эстафетной передачи являются:

— количество промежуточных узлов связи —  $N = 10, N = 50, N = 100$ ;

— интенсивность отказа узла ретрансляции —  $\lambda_{\text{экс}}$ .

Согласно принципиальной электрической схеме узла ретрансляции и данным, приведенным в [14], рассчитанное значение интенсивности отказов  $\lambda \approx 1,24 \cdot 10^{-6}$ .

С учетом полевых условий работы вводится поправочный коэффициент [15], равный  $K_{\text{усл}} = 2,4$ .

В итоге:

$$\lambda_{\text{экс}} = \lambda \cdot K_{\text{усл}} = 1,24 \cdot 10^{-6} \cdot 2,4 \approx 2,97 \cdot 10^{-6} \text{ (1/ч)}. \quad (3)$$

Подставив значение (3) в выражение (2), при  $t = 8 760$  часов (1 год), получим вероятность безотказной работы узла ретран-

сляции:  $P_{1\text{раб}} = 0,974$ . Вероятность отказа узла за 1 год равна:  $P_{1\text{отказ}} = 1 - P_{1\text{раб}} = 0,026$ .

Зная вероятности отказов узлов ретрансляции на основании теорем теории вероятности [16], можно рассчитать вероятности безотказной работы или вероятности выхода из строя двух систем эстафетной передачи, описанных выше, при различном числе узлов ретрансляции.

### 1. Простая система эстафетной передачи данных.

Если условием безотказной работы считать передачу данных от всех источников информации на базу (центральный пункт сбора данных), как показано на рис. 1, то выход одного узла ретрансляции прервет эту цепь.

Вероятность безотказной работы системы в такой постановке будет равна произведению вероятностей  $P_{1\text{раб}}$  отдельных узлов [16]:

$$P_{\text{Сист.1-раб}} = (P_{1\text{раб}})^N. \quad (4)$$

При  $N = 10$ ,  $P_{\text{Сист.1-раб}} = 0,768$ .

При  $N = 50$ ,  $P_{\text{Сист.1-раб}} = 0,268$ .

При  $N = 100$ ,  $P_{\text{Сист.1-раб}} = 0,072$ .

Вероятности безотказной работы простой эстафетной системы при большом числе узлов являются очень низкими.

### 2. Система эстафетной передачи данных с передачей «через одного».

В этой системе при выходе из строя одного узла происходит потеря информации, получаемой только в одной точке наблюдения. Все остальные данные передаются, поэтому можно считать, что система остается работоспособной.

Можно считать также, что система остается работоспособной и при выходе из строя двух узлов расположенный не рядом.

Тогда вероятность безотказной работы будет складываться из вероятностей трех несовместных событий:

- 1) все узлы работоспособны;
- 2) вышел из строя один узел, а все остальные работоспособны;
- 3) вышли из строя два узла, расположенных не рядом, а все остальные работоспособны.

Вероятность первого события описывается выражением (4).

Вероятность второго события вычислится по теореме умножения вероятностей, описывающей вероятность одновременно выхода из строя любого одного узла и вероятностей невыхода из строя всех остальных. Событие № 2 является сложным, состоящим из  $N$  несовместных событий, состоящих в выходе из строя

одного из  $N$  узлов с сохранением работоспособности всех остальных. Вероятность события № 2 описывается выражением:

$$P_{\text{Сист.2-раб}} = (P_{\text{1раб}})^{N-1} \cdot (P_{\text{1отказ}}) \cdot N. \quad (5)$$

Третье событие состоит в том, что одновременно выходят из строя два узла и остаются исправными все остальные. При этом два вышедших из строя узла располагаются не рядом.

Это также сложное событие, состоящее из большого числа несовместных событий. Общее число комбинаций выхода из строя двух узлов из  $N$ , содержащихся в системе, определяется известным соотношением числа сочетаний без повторов:

$$C_N^m = \frac{N!}{m! \cdot (N-m)!}. \quad (6)$$

При  $m = 2$ ,  $C_N^2 = \frac{N \cdot (N-1)}{2}$ . Из общего числа сочетаний  $N - 1$  бу-

дут соответствовать расположению двух узлов рядом.

Тогда вероятность третьего события определится выражением:

$$P_{\text{Сист.3-раб}} = (P_{\text{1раб}})^{N-2} \cdot (P_{\text{1отказ}})^2 \cdot (C_N^2 - N + 1). \quad (7)$$

Вероятность безотказной работы такой системы равна сумме вероятностей (как несовместных событий):

$$P_{\text{Сист.-раб}} = P_{\text{Сист.1-раб}} + P_{\text{Сист.2-раб}} + P_{\text{Сист.3-раб}}. \quad (8)$$

Значения вероятностей безотказной работы при разном числе узлов будут следующими:

при  $N = 10$ ,  $P_{\text{Сист.-раб}} = 0,992$ ;

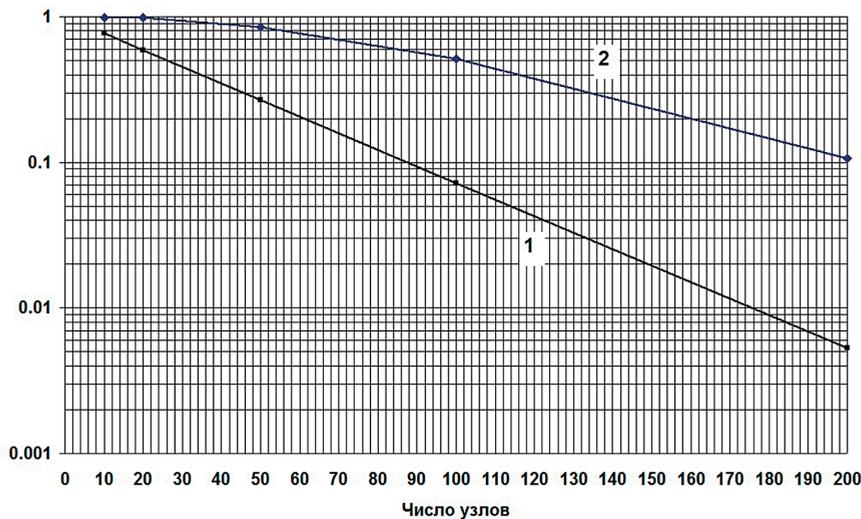
при  $N = 50$ ,  $P_{\text{Сист.-раб}} = 0,985$ ;

при  $N = 100$ ,  $P_{\text{Сист.-раб}} = 0,511$ ;

На рис. 7 изображены графики зависимости вероятностей безотказной работы двух систем.

При числе узлов ретрансляции менее 50 в системе с передачей «через одного» обеспечивается высокая вероятность безотказной работы. Имеется весьма заметный выигрыш по надежности по сравнению с простой системой.

Увеличение числа узлов ретрансляции требует повышения надежности работы узлов или более частого обслуживания, чаще, чем раз в год.



**Рис. 7.** Зависимость вероятности безотказной работы двух систем от числа узлов ретрансляции:

1 — простая система; 2 — система с передачей «через одного»

**Fig. 7.** Dependence of the probability of failure-free operation of two systems on the number of relay nodes.

1 — Simple system; 2 — System with transmission «Through one»

## 5.2. Временные интервалы, характеризующие работу системы

1. Модуль RN2483 в режиме модуляции LoRa формирует сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) с шириной спектра 125 кГц (примерно равной диапазону перестройки частоты ЛЧМ).

2. Скорость изменения частоты ЛЧМ характеризуется параметром расширения спектра (spreading factor —  $SF$ ). В модуле RN2483 его можно выбрать от 7 до 12.

3. Параметр  $SF$  описывает связь периода ЛЧМ и диапазона перестройки частоты. Период ЛЧМ равен:

$$T_{\text{ЛЧМ}} = \frac{2^{SF}}{\Delta f_{\text{ЛЧМ}}}. \quad (9)$$

В исследуемом макете  $SF$  выбран равным 12 из соображений обеспечения максимальной дальности радиосвязи.

При  $SF = 12$ ,  $T_{\text{ЛЧМ}} = 32,8$  мс.

Модуляция LoRa при  $SF = 12$  обеспечивает передачу 12 бит за один период ЛЧМ. Поэтому скорость передачи данных может составлять 366 бит/с.

С целью повышения помехоустойчивости в модуле RN2483 при использовании модуляции LoRa предусмотрено кодирование данных исправляющее ошибки. В исследуемом макете вы-

бран параметр кодирования (error code correction):  $cr = 4/8$ . При этом скорость передачи полезных данных уменьшается вдвое и составляет 183 бит/с.

При работе радиосистемы с модуляцией LoRa для синхронизации приемника и передатчика используется преамбула, представляющая собой несколько периодов ЛЧМ без дополнительной модуляции.

В исследуемом макете длина преамбулы выбрана 16 периодов (на основании проведенных экспериментальных исследований [10]).

В итоге скорость передачи данных определяется тремя параметрами:

- эквивалентная символьная скорость:  $R_s = 183$  бит/с;
- время передачи одного символа:  $T_s = 32,7$  мс;
- длительность преамбулы:  $T_{preamble} = 663$  мс;

Для передачи одного подпакета данных из 64 байт требуется 3,475 с.

При успешном приеме подпакета приемник передает сигнал подтверждения. Сигнал содержит 8 байт служебной информации. Для его передачи требуется 1,023 с.

В разработанном алгоритме работы системы с учетом требования экономичности по потреблению электроэнергии питание модуля RN2483 выключается в период пауз между передачей и приемом сигналов. Включение питания модуля и его инициализация требует времени, порядка 2 с.

При длительной работе системы часы, реализованные на микросхеме DS3231, на отдельных узлах ретрансляции могут расходиться. Поэтому интервалы времени передачи и приема разных узлов необходимо выбрать с запасом, учитывающим это расхождение.

В результате, на основании длительных экспериментов интервал времени приема подпакета был выбран равным:  $T_{subpackage} = 14$  с, при  $SF = 12$ .

Этот интервал включает смещение моментов включения приемника с номером  $N - 1$  и передатчика с номером  $N - \Delta T_{rec} = 3$  с; время на включение модуля RN2483 — около 2 с; передача данных — 3,475 с, прием подтверждения — 1,023 с. Еще 4,5 с требуются для обеспечения устойчивой работы системы в течение длительного промежутка времени (несколько суток) без коррекции часов (DS3231) по данным глобальной системы навигации. Приемник SIM68E потребляет около 50 мА, и его частое включение не желательно.

При выбранном интервале  $T_{subpackage} = 14$  с, время, необходимое для передачи всего пакета данных, в соответствии с диаграммой

(рис. 4), составляет  $6 \cdot T_{\text{subpackage}} = 84$  с. Для удобства расчетов последующих временных промежутков длительность передачи пакета выбрана равной  $T_{\text{recieve}} = 90$  с.

Определив опорные интервалы, можно рассчитать длительность передачи данных  $T_{\text{cikle}}$  от всех датчиков в системе контроля с использованием выражения (1):

— при  $N_{\text{sys}} = 100$ ,  $T_{\text{cikle}} = 90$  с,  $T_{\text{measure}} = 60$  с,  $T_{\text{data0}} = 120$  с.  
 $T_{\text{cikle}} = 19$  ч, 52 мин., 30 с;

— при  $N_{\text{sys}} = 10$ ,  $T_{\text{cikle}} = 90$  с,  $T_{\text{measure}} = 60$  с,  $T_{\text{data0}} = 120$  с.  
 $T_{\text{cikle}} = 1$  ч 52 мин. 30 с.

Здесь принято время, выделенное для проведения измерений,  $T_{\text{measure}} = 60$  с (рис. 3), промежуток времени передачи данных от узла ретрансляции № 0:  $T_{\text{data0}} = 120$  с.

Временные интервалы, описанные в данном разделе, не сложно масштабироваться. При уменьшении SF, время необходимое для передачи подпакетов  $T_{\text{subpackage}}$  уменьшается. Продолжительность передачи данных со всех датчиков может быть пропорционально уменьшена.

Осложняющими факторами при этом являются уменьшение дальности действия радиоканала LoRa и повышение требований к точности хода системных часов.

### 5.3. Потребление тока отдельными элементами и временное распределение потребления тока от батареи

Передачик модуля RN2483 при мощности 10 мВт потребляет 31 мА. Для передачи пакета данных с первой попытки и передачи подтверждения (при приеме данных) передачик включается на 16 с. Расход заряда батареи 0,5 А · с.

Приемник модуля RN2483 потребляет 22 мА. Для приема пакета данных с первой попытки и приема подтверждения (при передаче данных) приемник включается на 21 с. Расход заряда батареи 0,46 А · с.

Перед началом активной работы платы «просыпается» контроллер и плата потребляет 5,5 мА в течение примерно 30 с. Расход заряда батареи 0,17 А · с.

В не активном («спящем») режиме плата потребляет 200 мкА. При передаче данных один раз в сутки расход ресурса батареи составляет 17,3 А · с.

При включенном приемнике GPS плата потребляет 55 мА. На прием сигналов GPS с первого раза выделена 1 минута. Расход ресурса батареи 3,3 А · с.

При подключении устройства сбора данных (его питание и интерфейс RS 485) плата потребляет 100 мА. Расход ресурса батареи за 1 мин. составляет 6 А · с.

Суммарное потребление одной платы при передаче данных один раз в сутки, при однократном включении приемника GPS и устройства сбора данных составляет  $27,73 \text{ А} \cdot \text{с}$

Промежуточные узлы для ретрансляции данных других узлов расходуют по  $1,13 \text{ А} \cdot \text{с}$  за один цикл передачи данных. Количество таких циклов увеличивается с уменьшением номера узла.

При питании плат от батареи SAFT LSH 20 (емкость  $13 \text{ А} \cdot \text{ч}$ ) самый удаленный узел сможет выполнить 1687 циклов — 4,6 года (при периоде циклов 1 сутки).

Промежуточные узлы для ретрансляции смогут выполнить 41 415 циклов.

Если в цепочке 10 узлов + База, самый потребляющий будет узел № 1. В сутки он выполняет 10 циклов приема-передачи. Его потребление равно  $37,9 \text{ А} \cdot \text{с}$ . Ресурс батареи обеспечит 1 234 цикла — 3,3 года.

Если в цепочке 50 узлов + База, ресурс батареи обеспечит работу в течение 563 цикла — 1,54 года.

Используя приведенные данные о потреблении элементов плат ретрансляторов, можно рассчитать продолжительность работы для любой конфигурации системы сбора и передачи данных с любыми временными интервалами передачи.

## 6. Заключение

В настоящей работе выполнено проектирование и испытание двух вариантов системы сбора и передачи данных от датчиков, располагаемых на трубопроводе, имеющем протяженность от нескольких десятков до сотен километров. В состав системы может входить большое количество узлов, разнесенных в пространстве (до 255 узлов).

Разработаны алгоритмы, обеспечивающие последовательную передачу данных на базовую станцию через цепь промежуточных ретрансляторов (эстафетная передача). Приняты меры для минимизации потерь и искажений данных.

С целью повышения надежности системы предложены два варианта: простая эстафетная передача и эстафетная передача, с передачей данных через один узел «через одного». Второй вариант обеспечивает значительно большую вероятность безотказной работы при большом числе узлов ретрансляции. При числе узлов ретрансляции равном 50 вероятность безотказной работы простой системы составляет 0,268, а системы с передачей «через одного» — 0,985.

Реализован и испытан макет системы, использующий радиоканал с модуляцией LoRa; макет построен с использованием модуля RN 2483 (Microchip); алгоритм управления и синхронизации реализован на микроконтроллере PIC18LF45k50.

Макет имеет автономное батарейное питание, обеспечивающее работу системы из 50 узлов в течение более 1,5 лет.

### Список литературы

1. Таненбаум Э., Стеен М. ван. *Распределенные системы. Принципы и парадигмы*. Пер. с англ. СПб: Питер; 2003. 877 с.
2. Azubogu A. C., Idigo V. E., Nnebe S. U., et al. Wireless Sensor Networks for Long Distance Pipeline Monitoring. *World Academy of Science, Engineering and Technology International, Journal of Electronics and Communication Engineering*. 2013;7(3):285–289.
3. Барабанова Е. А., Мальцев Д. Б., Есауленко В. Н., Руденко М. Ф. Распределенная система контроля технологических объектов нефтегазовой промышленности на базе беспроводной сенсорной сети. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2017;(2):98–104.
4. Park S., Park H., Kim E.-J. Distributed Relay-Assisted Retransmission Scheme for Wireless Home Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2014;10(4). DOI:10.1155/2014/683146
5. Piyare R., Murphy A. L., Magno M., Benini L. On-Demand LoRa: Asynchronous TDMA for Energy Efficient and Low Latency Communication in Io T. *Sensors*. 2018;18(11):3718. <https://doi.org/10.3390/s18113718>
6. Petäjäjärvi J, Mikhaylov K, Pettissalo M, Janhunen J, Iinatti J. Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2017;13(3). DOI: 10.1177/1550147717699412
7. Bali Z., Ajib W., Boujemaa H. Distributed relay selection strategy based on source-relay channel. *2010 17th International Conference on Telecommunications*. Doha, Qatar. April 4–7, 2010. IEEE 2010. Pp. 138–142. DOI: 10.1109/ICTEL.2010.5478647
8. Verhulevskij K. LoRa — everything you wanted to know about it. *Components & Technologies*. 2016;(3):110–114.
9. Ma Y., Zhao L., Yang R., Li X., Song Q., Song Z., Zhang Y. Development and Application of an Atmospheric Pollutant Monitoring System Based on LoRa—Part I: Design and Reliability Tests. *Sensors*. 2018;18(11):3891. <https://doi.org/10.3390/s18113891>
10. Starikov S. I., Luchinin A. S., Malygin I. V. Investigation of the Boundary Conditions of a Radio Channel Noise Immunity Using LoRa Modulation. *2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. Ekaterinburg, Russia. April 25–26, 2019. IEEE 2019. Pp. 340–343.
11. Лучинин А. С., Стариков С. И., Малыгин И. В., Марков М. В. Синхронизация элементов системы сбора данных разнесенных на большое

расстояние. *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. 2019;10(2):28–32.

12. Luchinin A. S., Malygin I. V., Starikov S. I., Markov M. V., Chechetkin V. A. Wireless Data Collecting System for Long Distances. *2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*. Novosibirsk, Russia. October 21–27, 2019. IEEE 2019. Pp. 0038–0042. DOI: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8957859

13. Microchip RN 2483. Low-Power Long Range LoRa® Technology Transceiver Module. *Microchip Technology Inc.* 2017. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/RN2483-Low-Power-Long-Range-LoRa-Technology-Transceiver-Module-Data-Sheet-DS50002346D.pdf> (дата обращения 08.06.2023)

14. Смит Д. Дж. *Безотказность, ремонтпригодность и риск. Практические методы для инженеров, включая вопросы оптимизации надежности и систем, связанных с безотказностью*. Пер. с англ. М.: ООО «Группа ИДТ»; 2007. 432 с.

15. Боровиков С. М. *Теоретические основы конструирования, технологии и надежности: учебник для инженерно-технических специальностей вузов*. Минск: Дизайн ПРО, 1998. 336 с.

16. Вентцель Е. С. *Теория вероятностей*. М.: Наука; 1964. 576 с.

## References

1. Tanenbaum A., Steen M. van. *Distributed Systems. Principles and Paradigms*. St. Petersburg: Piter, 2003. 877 p. (in Russ.)

2. Azubogu A. C., Idigo V. E., Nnebe S. U., et al. Wireless Sensor Networks for Long Distance Pipeline Monitoring. *World Academy of Science, Engineering and Technology International, Journal of Electronics and Communication Engineering*. 2013;7(3):285–289.

3. Barabanova E. A., Maltsev D. B., Esaulenko V. N., Rudenko M. F. Distributed control system of technological objects oil and gas industry on the basis of wireless sensor network. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2017;(2):98–104. (in Russ.)

4. Park S., Park H., Kim E.-J. Distributed Relay-Assisted Retransmission Scheme for Wireless Home Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2014;10(4). DOI:10.1155/2014/683146

5. Piyare R., Murphy A. L., Magno M., Benini L. On-Demand LoRa: Asynchronous TDMA for Energy Efficient and Low Latency Communication in Io T. *Sensors*. 2018;18(11):3718. <https://doi.org/10.3390/s18113718>

6. Petäjälä J., Mikhaylov K., Pettissalo M., Janhunen J., Iinatti J. Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2017;13(3). DOI:10.1177/1550147717699412

7. Bali Z., Ajib W., Boujemaa H. Distributed relay selection strategy based on source-relay channel. *17th International Conference on Telecommunications*. Doha, Qatar. April 4–7, 2010. IEEE 2010. Pp. 138–142. DOI: 10.1109/ICTEL.2010.5478647

8. Verhulevskij K. LoRa — everything you wanted to know about it. *Components & Technologies*. 2016;(3):110–114.

9. Ma Y., Zhao L., Yang R., Li X., Song Q., Song Z., Zhang Y. Development and Application of an Atmospheric Pollutant Monitoring System Based on LoRa—Part I: Design and Reliability Tests. *Sensors*. 2018;18(11):3891. <https://doi.org/10.3390/s18113891>

10. Starikov S. I., Luchinin A. S., Malygin I. V. Investigation of the Boundary Conditions of a Radio Channel Noise Immunity Using LoRa Modulation. *2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. Ekaterinburg, Russia. April 25–26, 2019. IEEE 2019. Pp. 340–343.

11. Luchinin A. S. Starikov S. I., Malygin I. V. Sinkhronizatsiya elementov sistemy sbora dannykh raznesennykh na bol'shoe rasstoyanie [Synchronization of elements of a data acquisition system spaced over a long distance]. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov* [Systems of synchronization, formation and processing of signals]. 2019;10(2):28–32. (in Russ.)

12. Luchinin A. S., Malygin I. V., Starikov S. I., Markov M. V., Chechetkin V. A. Wireless Data Collecting System for Long Distances. *2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*. Novosibirsk, Russia. October 21–27, 2019. IEEE 2019. Pp. 0038–0042. DOI: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8957859

13. Microchip RN 2483. Low-Power Long Range LoRa Technology Transceiver Module. *Microchip Technology Inc*. 2017. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/RN2483-Low-Power-Long-Range-LoRa-Technology-Transceiver-Module-Data-Sheet-DS50002346D.pdf> (accessed: 08.06.2023)

14. Smith D. J. *Reliability, Maintainability and Risk. Practical Methods for Engineers, Including Issues of Optimizing Reliability and Systems Related to Reliability*. Moscow: OOO «Gruppa IDT»; 2007. 432 p. (in Russ.)

15. Borovikov S. M. *Teoreticheskie osnovy konstruirovaniya, tekhnologii i nadezhnosti* [Theoretical Foundations of Design, Technology and Reliability]. A Textbook for Engineering and Technical Specialities of Universities. Minsk: Dizain PRO; 1998. 336 p. (in Russ.)

16. Wentzel E. S. *Teoriya veroyatnostei* [Probability Theory]. Moscow: Nauka; 1964. 576 p.

### Информация об авторах

Лучинин Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент департамента радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники

и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

**Малыгин Иван Владимирович**, кандидат технических наук, доцент департамента радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

**Стариков Сергей Иванович**, инженер Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ, Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

**Чечеткин Виктор Алексеевич**, старший преподаватель департамента радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

**Шегал Анна Айзиковна**, кандидат технических наук, доцент департамента радиоэлектроники и связи, Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

**Бельков Сергей Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий Института фундаментального образования Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

### Information about the authors

**Alexandr S. Luchinin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Radioelectronics and Communications, Institute of Radioelectronics and Information Technology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (32, Mira St., 620078, Ekaterinburg, Russia); e-mail: a.s.luchinin@urfu.ru.

**Ivan V. Malygin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Radioelectronics and Communications, Institute of Radioelectronics and Information Technology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (32, Mira St., 620078, Ekaterinburg, Russia); e-mail: i.v.malygin@urfu.ru.

**Sergey I. Starikov** Enjener, Department of Radioelectronics and Communications, Institute of Radioelectronics and Information Technology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (32, Mira St., 620078, Ekaterinburg, Russia); e-mail: s.i.starikov@urfu.ru.

**Victor A. Chechetkin**, Senior Lecturer, Department of Radioelectronics and Communications, Institute of Radioelectronics and Information

Technology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (32, Mira St., 620078, Ekaterinburg, Russia); e-mail: v.a.chechetkin@urfu.ru.

**Anna Ih. Shegal**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Radioelectronics and Communications, Institute of Radioelectronics and Information Technology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (32, Mira St., 620078, Ekaterinburg, Russia); e-mail: a.a.shegal@urfu.ru

**Sergey A. Belkov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Intelligent Information Technologies, Institute of Fundamental Education, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (32, Mira St., 620078, Ekaterinburg, Russia); e-mail: s.a.belkov@urfu.ru

Поступила / Received: 04.05.2023

Принята в печать / Accepted: 05.06.2023