

СПОСОБ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ О ПОКАЗАНИЯХ МАНЕВРОВЫХ СВЕТОФОРОВ НА ЛОКОМОТИВ С ФОРМИРОВАНИЕМ НАПРАВЛЕННОЙ ЗОНЫ ПРИЕМА СИГНАЛА

МИНАКОВ Виталий Анатольевич, кандидат техн. наук, доцент кафедры «Локомотивы»;

e-mail: vitalya_13@mail.ru

НОСКОВ Виталий Олегович, старший преподаватель кафедры «Локомотивы»;

e-mail: vitalik_noskov@mail.ru

Омский государственный университет путей сообщения, Омск

В статье рассмотрена задача повышения безопасности маневровой работы на железнодорожных станциях, пути которых не оборудованы кодированием рельсовых цепей. В таких условиях локомотивные устройства безопасности не получают информации о показаниях маневровых светофоров, что увеличивает вероятность проезда запрещающих сигналов и возникновения аварийных ситуаций. Целью работы является разработка способа передачи информации о показаниях маневровых сигналов светофоров на локомотив с использованием беспроводного канала связи Bluetooth Low Energy. Отличительной особенностью предлагаемого способа является формирование направленной зоны распространения сигнала за счет применения экранирующих элементов передающего устройства, обеспечивающих пространственное ограничение области. В работе приведены расчеты потерь сигнала в свободном пространстве, выполнена оценка уровня принимаемой мощности и предложен подход к описанию направленных свойств системы передачи данных. Разработан и исследован лабораторный макет устройства на базе микроконтроллера ESP32 с поддержкой технологии Bluetooth Low Energy. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность формирования зоны направленного сигнала по направлению приемного устройства. Полученные результаты свидетельствуют о практической реализуемости предложенного способа и перспективности применения технологий Bluetooth Low Energy для повышения безопасности маневровых передвижений на железнодорожных станциях.

Ключевые слова: маневровая работа, автоматика, локомотив, сигнализация, маневровый светофор, приборы безопасности, беспроводная связь, направленная передача сигнала, экранирование, Bluetooth

DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-03-182-192

▼ Введение

Одной из существенных проблем обеспечения безопасности выполнения маневровой работы на железнодорожных станциях является вероятность проезда запрещающих сигналов на некодированных участках железнодорожного пути. В условиях отсутствия канала передачи сигналов локомотивные устройства безопасности не получают информации о показаниях маневровых светофоров, из-за чего системы локомотивной сигнализации не способны своевременно предупредить локомотивную бригаду о запрещающем показании светофора.

Проезд запрещающего сигнала относится к числу наиболее опасных нарушений безопасности движения и может приводить к столкновениям подвижного состава, сходам

и другим аварийным ситуациям. Причинами проезда запрещающих сигналов могут являться технические неисправности, ошибки локомотивных бригад, а также организационные нарушения [1, 2]. Для выявления основных причин проездов запрещающих сигналов выполнен анализ эксплуатационных инцидентов, результаты которого представлены в виде причинно-следственной диаграммы (рис. 1).

Представленная диаграмма отображает структуру основных причин проезда запрещающих сигналов, позволяя выделить несколько основных групп. Значимая часть инцидентов связана с человеческим фактором, включающим потерю внимания локомотивной бригады в процессе выполнения маневровой работы вследствие усталости и переутомления

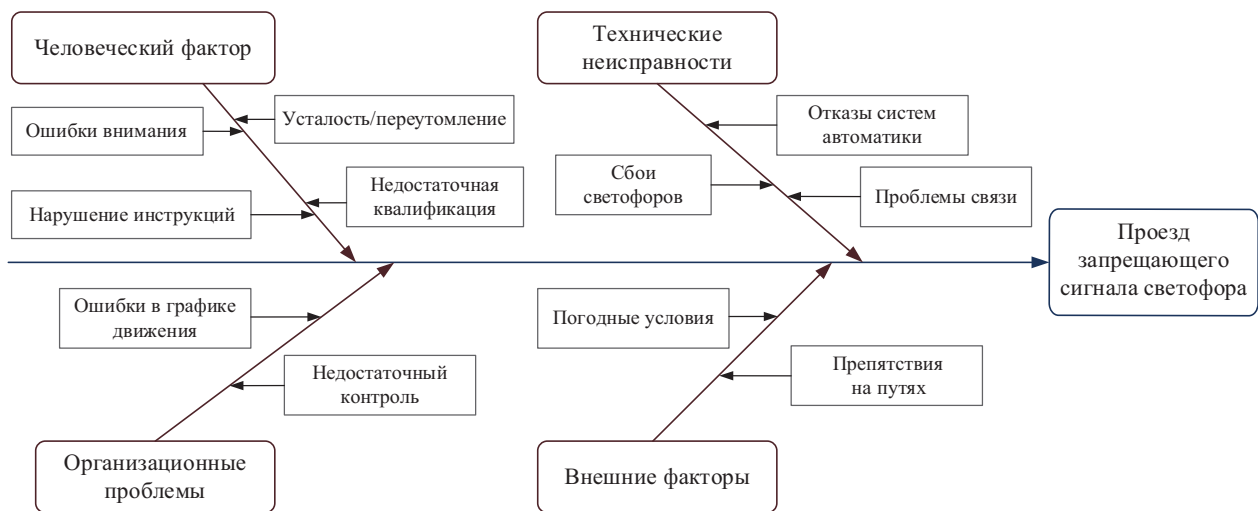


Рис. 1. Причинно-следственная диаграмма проезда запрещающего сигнала светофора

машинистов, нарушения установленных регламентов управления маневровым движением, определенных инструкцией по движению поездов и маневровой работе на железнодорожном транспорте Российской Федерации. Вторую группу составляют технические неисправности, к которым относятся сбои светофорной аппаратуры, отказы систем железнодорожной автоматики и других технических средств. Кроме того, выделяется группа организационно-управленческих причин, связанных с недостатками в системе оперативного контроля и управления маневровыми передвижениями, а также с влиянием внешних факторов, что усложняет работу машинистов [3].

Одной из наиболее эффективных систем, обеспечивающих идентификацию сигналов светофоров при движении по некодированным путям, является маневровая автоматическая локомотивная сигнализация (МАЛС) [4]. Вместе с тем стабильность функционирования МАЛС критически зависит от качества цифрового радиоканала, наличия помех при работе локомотивов на станции, а также отказов оборудования, которые могут приводить к потере связи. Для определения местоположения локомотива в систему МАЛС интегрирован приемник спутниковой навигации ГЛОНАСС, обеспечивающий точность определения геопозиции на уровне 5–10 м. Однако с учетом того, что расстояние между осями смежных путей на станции, согласно правилам технической эксплуатации, составляет от 3100 до 4800 мм, существует

вероятность ошибочной идентификации пути, по которому фактически следует локомотив.

Таким образом, снижение вероятности проезда запрещающих сигналов требует разработки новых технических решений, обеспечивающих передачу информации о показаниях маневровых светофоров непосредственно на локомотив при следовании по некодированным участкам железнодорожного пути.

Решением данной задачи является разработка способа передачи информации о показаниях маневровых светофоров на локомотив с использованием технологии Bluetooth Low Energy, обеспечивающей пространственное ограничение зоны распространения радиосигнала для снижения риска приема сигналов от светофоров смежных путей.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- обоснование выбора технологии беспроводной передачи данных для реализации канала связи «светофор — локомотив»;
- разработка структурной схемы передачи и обработки сигнала с использованием экранирующих элементов передающего устройства;
- теоретический расчет потерь сигнала в свободном пространстве и оценка уровня принимаемой мощности;
- экспериментальное исследование лабораторного макета для подтверждения возможности формирования направленной зоны приема.

Способ беспроводной передачи показаний маневровых светофоров на локомотив с формированием направленной зоны приема

Способом решения передачи информации о показаниях маневровых светофоров на локомотив при его движении по некодированным железнодорожным путям является техническое решение, основанное на использовании беспроводного канала связи.

Для организации передачи информации о показаниях маневровых светофоров на локомотив могут быть использованы различные способы беспроводной передачи данных, отличающиеся дальностью действия, энергопотреблением, стоимостью оборудования и особенностями применения. Наиболее распространенными способами являются:

1. Wireless Fidelity (Wi-Fi) — представляет собой технологию беспроводной передачи данных семейства IEEE 802.11, предназначенную для высокоскоростного обмена информацией между устройствами.

2. Radio Frequency IDentification (RFID) — является технологией радиочастотной идентификации объектов посредством специальных меток и считывателей. Технология широко применяется для идентификации подвижного состава, контейнеров и других объектов.

3. Long Range (LoRa) — относится к технологиям передачи данных на большие расстояния при низком энергопотреблении и небольшой скорости передачи данных.

4. Bluetooth Low Energy (BLE) — это беспроводная технология передачи данных на небольшие расстояния, являющаяся подмножеством стандарта Bluetooth. Ключевыми особенностями являются сверхнизкое энергопотребление и помехоустойчивость, а также периодическая передача небольших объемов информации [5, 6].

В табл. 1 приведено сравнение характеристик рассматриваемых технологий беспроводной передачи данных [7].

На основе сравнительного анализа технологий беспроводной передачи данных, представленного в табл. 1, можно сделать вывод, что для решения задачи передачи сигналов маневровых светофоров на локомотив наиболее оптимальным выбором является технология BLE. Данное решение обосновано тем, что BLE обеспечивает достаточную скорость передачи данных с довольно малым временем отклика, что гарантирует оперативное информирование локомотивной бригады об изменении сигнала светофора, а также обладает устойчивым сигналом в диапазоне 2,4 ГГц дальностью до 50 м при низком энергопотреблении, позволяющем

ТАБЛИЦА 1. Сравнение технологий беспроводной передачи данных*

Параметр	BLE	Wi-Fi	RFID	LoRa
Дальность, м	< 50	< 100	< 10	> 1000
Скорость передачи данных	< 2 Мбит/с	< 600 Мбит/с	< 500 кбит/с	< 50 кбит/с
Энергопотребление	низкое	высокое	низкое	низкое
Помехоустойчивость	высокая	средняя	средняя	высокая
Стоимость оборудования	низкая	средняя	низкая	высокая
Сложность построения инфраструктуры	низкая	высокая	средняя	высокая
Время отклика, мс	< 50	10–100	< 10	> 100
Возможность направленного излучения	есть	есть	частично	есть
Диапазон частот	2,4 ГГц	2,4/5 ГГц	865–868 МГц	868 МГц
Стандартизация	IEEE 802.15.1	IEEE 802.11	ISO/IEC 18000	LoRaWAN Spec

* Параметры технологий беспроводной передачи данных приведены согласно BLE — Core Specification Version 5.0 (Bluetooth SIG); Wi-Fi — IEEE Std 802.11™; RFID — ISO/IEC 18000; LoRa — спецификация LoRaWAN™ Specification (LoRa Alliance).

при необходимости реализовать автономное питание передатчика на светофоре.

Необходимо отметить, что применение технологии BLE не требует развернутой сетевой инфраструктуры, что существенно упрощает внедрение и снижает эксплуатационные затраты.

Принцип применения технологии BLE при передаче показаний маневровых светофоров на локомотив заключается во взаимодействии стационарного передающего оборудования, размещаемого на маневровых светофорах, и бортового приемного оборудования локомотива. Передача данных осуществляется при нахождении локомотива в зоне действия передатчика, что обеспечивает идентификацию показаний светофора непосредственно на борту локомотива.

Способ передачи показаний маневровых светофоров на локомотив с направленной передачей сигналов представлен на рис. 2.

Предлагаемый способ относится к классу дублирующих устройств безопасности

маневровой работы и имеет двухуровневую распределенную архитектуру, включающую стационарную часть (размещаемую у маневрового светофора) и бортовую часть (устанавливаемую на локомотиве). Структурная схема передачи и обработки сигнала представлена на рис. 3.

Схема представлена в виде двухуровневой архитектуры системы. Она включает стационарное передающее устройство на маневровом светофоре и бортовое приемное оборудование локомотива. Передающая часть содержит модуль считывания показаний светофора и BLE-передатчик с экранирующими элементами для формирования направленной зоны излучения. Приемная часть обеспечивает детектирование сигнала с помощью BLE-приемника, обработку информации и передачу данных о показании светофора в систему оповещения. Примененная архитектура обеспечивает прием сигнала только от светофора, соответствующего пути следования локомотива, и исключает влияние сигналов смежных путей.

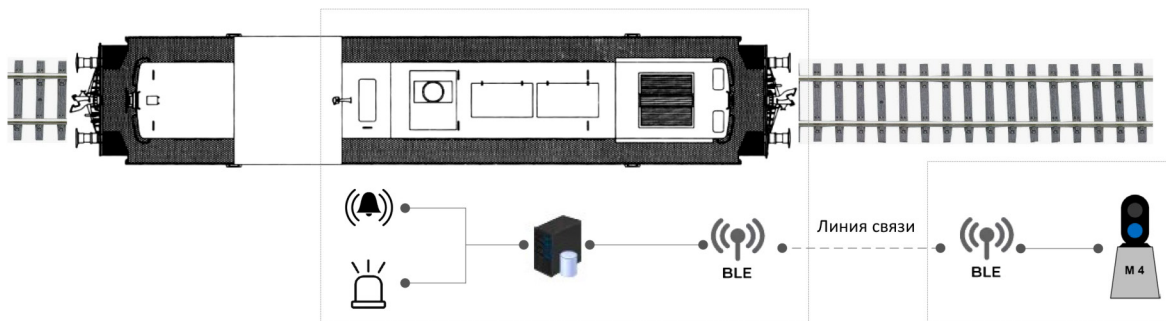


Рис. 2. Способ передачи показаний маневровых светофоров на локомотив с направленной передачей сигналов

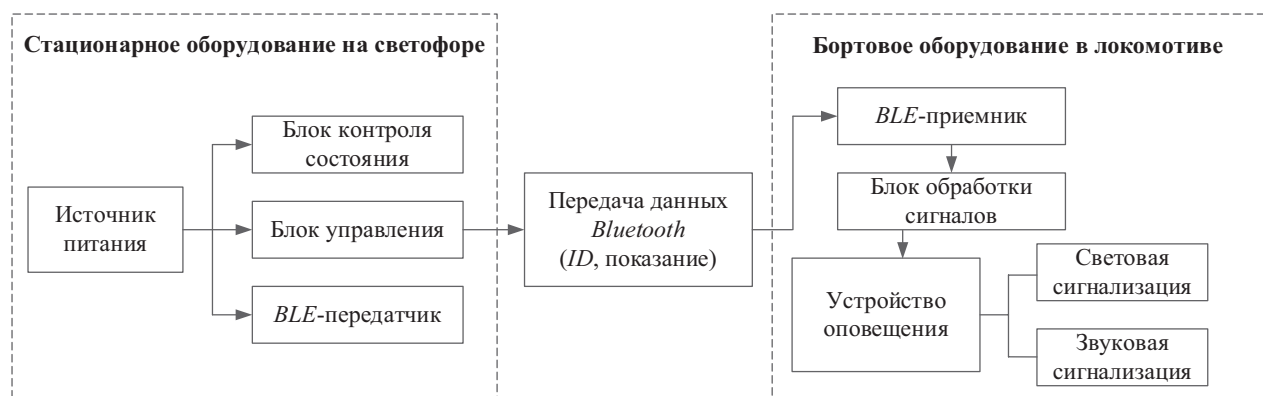


Рис. 3. Структурная схема передачи и обработки сигнала

Расчет показателей передачи направленного сигнала

Применяемое BLE-устройство представляет собой низкоэнергетический передатчик, выполненный в пылевлагозащищенном корпусе класса IP67 дальностью передачи до 50 м, диапазоне рабочих температур в пределах от -40 до $+50$ °C, временем отклика не более 50 мс.

При построении технических систем с применением технологии BLE необходимо учитывать затухание сигнала при распространении в свободном пространстве (Free-Space Path Loss, FSPL), что определяется как дБ [8, 9]:

$$FSPL = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right), \quad (1)$$

где d — расстояние между передатчиком и приемником, м;

f — частота сигнала, Гц;

c — скорость света, м/с.

Уровень сигнала, мощность, выражается как дБ:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L, \quad (2)$$

где P_t — мощность передатчика, дБм;

G_t , G_r — коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника соответственно, дБи;

L — суммарные потери на трассе, дБ.

Расчет интенсивности сигнала определяет запас мощности сигнала от передатчика к приемнику и заданное расстояние между ними. Результаты расчета позволяют установить, что при чувствительности приемника -95 дБм расчетный уровень сигнала на дальности 50 м составляет $-89,5$ дБм. Следовательно, детектирование сигнала является уверенно устойчивым.

Важно отметить, что приемник BLE, располагаемый на локомотиве, регистрирует сигналы всех светофоров, находящихся в зоне прямой радиовидимости радиусом до 50 м. Таким образом, возникает риск идентификации сигнала светофора, не соответствующего железнодорожному пути, по которому следует локомотив.

Решением является формирование направления излучения сигнала передающего устройства за счет ограничения распространения электромагнитной волны в нежелательных направлениях с помощью отражающих по-

верхностей (экранирование). Конструктивно экранирование реализуется наличием металлических пластин — рефлекторов. Оптимальное расстояние между антенной и экраном составляет $\lambda/4 \approx 3$ (для частоты 2,45 ГГц).

Влияние экрана на передачу сигнала технологией BLE можно представить как:

$$F(\theta) = \begin{cases} F_0, & |\theta| \leq \theta_0 \\ \alpha F_0, & |\theta| > \theta_0 \end{cases}, \quad (3)$$

где θ — угол распространения сигнала;

α — коэффициент подавления сигнала, $0 < \alpha < 1$;

F_0 — мощность сигнала.

Описание пространственного распределения мощности сигнала [10, 11] при экранировании системы передатчика можно описать функцией:

$$F(\theta) = F_0 \cos^n(\theta), \quad (4)$$

где n — коэффициент направленности, зависящий от конструкции;

F_0 — максимальная мощность сигнала, Вт.

Теоретическое описание функции направленности позволяет установить, что применение экранирующих элементов приводит к перераспределению мощности BLE-сигнала и формированию преимущественного направления излучения.

Моделирование процесса передачи информации

Для подтверждения теоретических положений предложенного способа передачи сигналов с использованием BLE-устройств с учетом экранирования передатчика были проведены экспериментальные исследования. Их основной целью являлось подтверждение возможности формирования направленной зоны приема сигнала за счет пространственного ограничения распространения электромагнитной волны.

Задачи экспериментального исследования включали разработку и сборку условного макета, имитирующего стационарное передающее устройство с экранированием, проведение измерений уровня мощности принимаемого сигнала в различных направлениях относительно направления оси передающей антенны, оценку эффективности экранирования путем сравнения уровней сигнала, а также оценку

стабильности измерений по значениям стандартного отклонения и определения коэффициента направленности.

В лабораторных условиях выполнен тестовый образец устройства передачи сигнала на основе BLE-устройства в соответствии со схемой, указанной на рис. 4.

Тестовый образец разработан на базе микропроцессорной платы ESP32 [12], оснащенной встроенным радиомодулем, поддерживающим спецификацию BLE 5.0. Передатчик обладает мощностью 20 дБм (100 мВт) со скоростью передачи сигнала 1 Мбит/с и каналом радиосвязи в диапазоне 2,4 ГГц. Тип модуляции — GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) с индексом модуляции 0,5.

Экранирующий элемент выполнен из алюминиевой фольги толщиной 0,1 мм, размещенной на диэлектрическом основании цилиндрической формы, что обеспечивает высокую электропроводность поверхности (удельное сопротивление порядка $2,65 \cdot 10^{-8}$ Ом·м). Расстояние между активным излучателем и плоскостью экрана выбрано равным $\lambda/4 \approx 3,1$ см. Выбор алюминия в качестве экранирующего элемента обусловлен его доступностью, малым весом, а также высокой отражательной

способностью: коэффициент отражения для алюминия на частоте 2,4 ГГц приближается к 0,95, что позволяет эффективно переизлучать падающую волну в прямом направлении [13].

В качестве приемного устройства использовался многофункциональный программно-аппаратный комплекс, поддерживающий спецификацию BLE 5.0. В качестве измерительного инструмента применялось специализированное приложение nRF Connect (разработка Nordic Semiconductor), позволяющее осуществлять мониторинг параметров BLE-соединения в реальном времени. Приемное устройства обеспечивает детектирование пакетов BLE-передатчика и непрерывную регистрацию уровня принимаемого сигнала (RSSI) с дискретностью 1 дБм в диапазоне от -95 до -20 дБм, что гарантирует уверенный прием тестовых сигналов передатчика мощностью +20 дБм.

Согласно схеме на рис. 2 разработан лабораторный макет для экспериментального исследования возможности формирования направленной зоны приема сигнала, включающий BLE-передатчик и BLE-приемник (рис. 5, 6). Экранирование устройства передачи сигнала выполнено в соответствии с рис. 4.

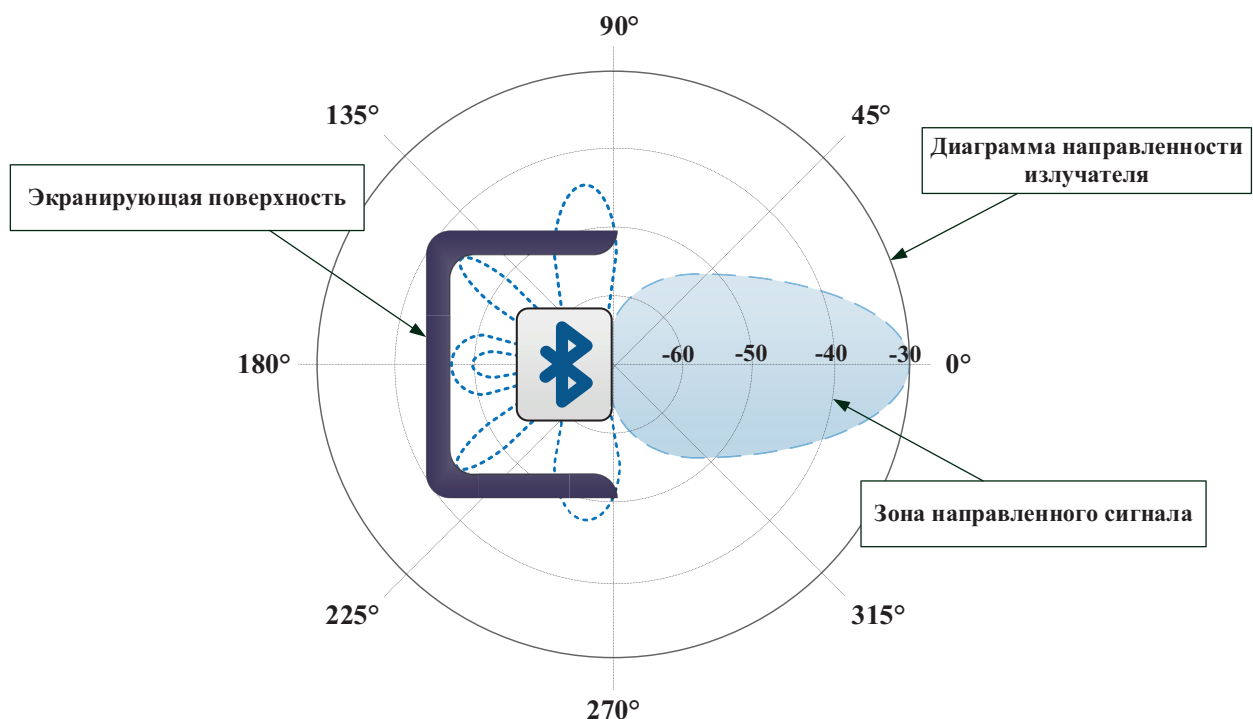


Рис. 4. Схема экранирования устройства передачи сигнала

Экспериментальное исследование направлено на визуализацию и подтверждение возможности пространственного формирования направленной зоны сигнала, достигаемого за счет применения экранирующего элемента.

На рис. 5 представлена схема эксперимента, имитирующая ситуацию, когда BLE-передатчик формирует сигнал относительно приемного устройства, имитирующего локомотив, под углом 90° , что соответствует нахождению на соседнем железнодорожном

пути. В этой конфигурации бортовой приемник регистрирует сигнал светофора с уровнем -48 дБм. Данный случай иллюстрирует риск ложного детектирования, поскольку сигнал, не предназначенный для данного пути, все равно принимается.

На рис. 6 показана ситуация, когда формируется направленная зона распространения сигнала строго в сторону приемного устройства — локомотива. В этом случае уровень зарегистрированного сигнала возрастает до -32 дБм.

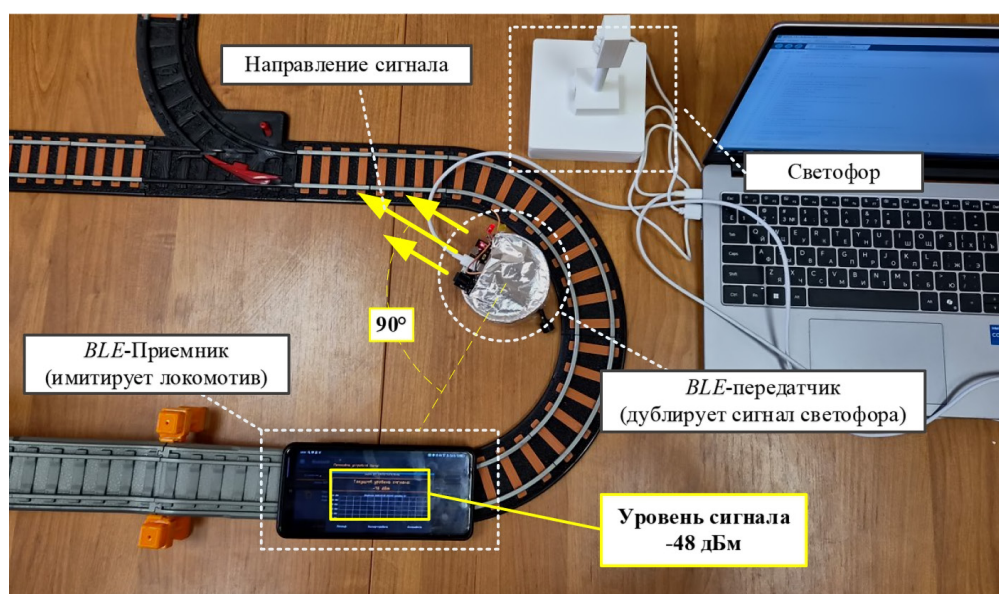


Рис. 5. Формирование направленной зоны сигнала относительно BLE-приемника

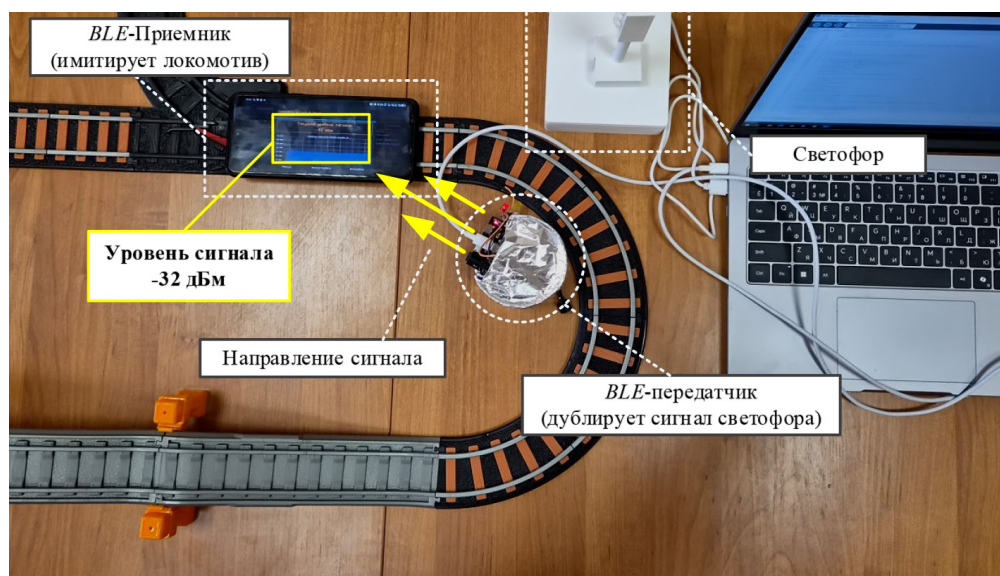


Рис. 6. Формирование направленной зоны сигнала в направлении BLE-приемника

Сопоставление уровней сигнала в двух представленных конфигурациях позволяет сделать вывод, что применение экранирования создает аппаратную основу для пространственного направления сигнала. Разница в уровнях сигнала является критерием, на основе которого бортовое оборудование может уверенно идентифицировать принадлежность сигнала к конкретному железнодорожному пути и тем самым исключить риск ошибочного восприятия показаний светофоров смежных путей.

Результаты данного экспериментального исследования подтверждают работоспособность предлагаемого способа формирования направленной зоны сигнала для передачи показаний светофора на локомотив с применением технологии BLE.

Для оценки устойчивости передачи BLE-сигнала выполнены измерения уровня принимаемой мощности в соответствии с рис. 4, где передатчик размещался в центре координатной сетки, условно разделенной на восемь секторов через 45° (0°, 45°...315°). Измерения проводились последовательно в восьми направлениях как в лабораторных условиях, так и на открытой местности при фиксированном взаимном расположении передающего и приемного устройств на расстоянии 5 м. Для исключения влияния случайных факторов на сигнал и повышения статистической достоверности результатов измерения выполнялись пятикратно в каждом направлении с интервалом

усреднения не менее 5 с. Конечный результат для каждого углового направления принимался как среднее арифметическое полученных значений. Результаты измерений приведены в табл. 2 в соответствии с рис. 4.

Результаты экспериментальных измерений уровня BLE-сигнала полностью подтверждают эффективность предложенного экранирования. Среднее значение мощности сигнала зафиксировано по целевому направлению под углом 0° с показателем мощности –37,2 дБм. Тогда как смещение BLE-приемника от главной оси приводит к резкому падению мощности от ~21 до ~45 %.

Для оценки повторяемости результатов измерения уровня принимаемой мощности сигнала определено среднеквадратическое отклонение измерений в соответствии с уравнением [14, 15]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x)^2}{n - 1}}, \quad (5)$$

где x — среднее значение мощности сигнала;

x_i — результат мощности i -го сигнала, дБм;

n — количество измерений.

По результатам расчета определены значения стандартного отклонения, которые находятся в пределах 0,7–1,0 дБм и составляют менее 3 % от среднего значения. Результаты свидетельствует об устойчивости мощности сигнала ввиду незначительного изменения показателей.

ТАБЛИЦА 2. Результаты показателей уровня сигнала устройства

Направление сигнала	Уровень сигнала, дБм					Среднее значение, дБм
	1	2	3	4	5	
0°	–37	–38	–36	–37	–38	–37,2
45°	–45	–46	–44	–45	–46	–45,2
90°	–51	–52	–50	–51	–51	–51,0
135°	–48	–49	–47	–48	–49	–48,2
180°	–50	–51	–49	–50	–50	–50,0
225°	–49	–50	–48	–49	–50	–49,2
270°	–54	–55	–53	–54	–54	–54,0
315°	–46	–47	–45	–46	–47	–46,2

Оценкой качества экранирования системы служит коэффициент направленности, определяемый как [16]:

$$K = RS_{0^\circ} - RS_{180^\circ}, \quad (6)$$

где RS_{0° , RS_{180° — уровень сигнала в направлении 0° и 180° соответственно.

Разность уровней сигнала составляет 13 дБ, а именно потерю мощности, что подтверждает работоспособность предлагаемого способа экранирования при передаче сигнала на основе BLE-устройства.

Заключение

По результатам проведенного исследования предложен способ повышения безопасности движения локомотивов при следовании по некодированным путям железнодорожных станций. Предложенный способ позволяет эффективно дублировать показания маневровых светофоров на локомотив с целью снижения вероятности проезда запрещающих сигналов светофоров.

К основным результатам проведенного исследования можно отнести:

1. Обоснован выбор технологии: на основе сравнительного анализа беспроводных стандартов передачи данных доказана оптимальность использования технологии BLE. Данная технология обеспечивает сверхнизкое энергопотребление, высокое быстродействие и достаточную помехозащищенность.

2. Предложен способ формирования направленной зоны распространения BLE-сигнала за счет пространственного ограничения распространения электромагнитной волны — экранирования. Предложена и теоретически обоснована конструкция передатчика с металлическим рефлектором, что позволило перераспределить мощность сигнала и ограничить зону его распространения.

3. Проведены теоретические расчеты потерь сигнала в свободном пространстве (FSPL), подтвердившие устойчивое детектирование сигнала на расстоянии до 50 м, а также выполнены измерения уровня принимаемой мощности сигнала.

4. Выполнены измерения уровня принимаемой мощности направленного сигнала при применении технологии экранирования.

Получены средние значения мощности сигнала. Установлено, что при смещении BLE-приемника от главной, направленной оси приводит к резкому падению мощности — от ~ 21 до $\sim 45\%$.

5. Разработан лабораторный макет на базе микроконтроллера ESP32 для выполнения экспериментов по формированию направленной зоны сигнала BLE-передатчика относительно BLE-приемника, имитирующих канал связи «светофор — локомотив». Результаты эксперимента подтвердили выраженную направленность распространения сигнала. Разница уровней сигнала в целевом направлении (0°) и в перпендикулярном (90°) составила 16 дБ, что позволяет исключить риск ошибочного восприятия показаний светофоров смежных путей.

Полученные результаты подтверждают техническую реализуемость предложенного способа и имеют прямую практическую ценность для применения на железнодорожных станциях, разъездах, промышленных железнодорожных путях и т. д. Способ передачи показаний маневровых светофоров на локомотив свидетельствует о перспективности применения технологии BLE, потому как обладает практической реализуемостью и может рассматриваться как перспективное направление повышения безопасности маневровой работы на железнодорожных станциях, не оборудованных кодированием рельсовых цепей.

Работа выполнена в рамках государственного задания от 16.01.2026 № 109-03-2026-004 за счет бюджетного финансирования.

Список источников

1. Человеческий фактор в структуре причин нарушения безопасности движения поездов / Н. В. Фролов [и др.] // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11, № 2 (58). С. 202–206. DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0035. EDN ESAFWN
2. Минаков В. А., Фоменко В. К. Технология машинного зрения на локомотивах для идентификации путевых сигналов // Мир транспорта. 2019. № 17 (6). С. 62–72. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-62-72. EDN PKTLNS
3. Актуальные вопросы психофизиологического обеспечения безопасности движения на железнодорожном

- транспорте: сборник научных трудов ОНПЦ ПТ НУЗ «Научный клинический центр ОАО «РЖД»». М.: АО «Т8 Издательские технологии», 2017. 386 с.
4. Система МАЛС как составляющая цифровой железной дороги / М. Ю. Акинин [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 4. С. 26–28.
 5. Patti G., Leonardi L., Bello L. Lo. Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review // *Sensors*. 2018. Vol. 18, iss. 9. Article 2802. DOI: 10.3390/s18092802
 6. Mikhaylov K., Tervonen J. A Survey on Bluetooth Low Energy Technology and Its Applications // *Information*. 2013. Vol. 4., iss. 4. Pp. 528–553. DOI: 10.3390/info4040528
 7. Колыбельников А. И. Обзор технологий беспроводных сетей // Труды Московского физико-технического института (национального исследовательского университета). 2012. Т. 4, № 2 (14). С. 3–29. EDN NLJNNK
 8. Molisch A. K. *Wireless Communications*. 3rd ed. Chichester: Wiley, 2022. 1008 p.
 9. Gomez C., Oller J., Paradells J. Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology // *Sensors*. 2012. Vol. 12, iss. 9. Pp. 11734–11753.
 10. Balanis C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2016. 1104 p.
 11. Stutzman W. L., Thiele G. A. *Antenna Theory and Design*. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2012. 864 p.
 12. Khalifeh A., Al-Rousan M. Internet of Things Using ESP32 // *International Journal of Computer Applications*. 2021. Vol. 174, iss. 24. Pp. 15–20. DOI: 10.5120/ijca2021921614
 13. Никольский В. В., Никольская Т. И. *Электродинамика и распространение радиоволн*. 4-е изд., стер. СПб.: Лань, 2012. 544 с.
 14. Perangin-Angin W. K., Kuhlmann K., Jürgen R. Generalized Efficiency and the Uncertainty of Millimeter Wave Power Standard // *Advances in Radio Science*. 2023. No. 21. Pp. 7–13. DOI: 10.5194/ars-21-7-2023
 15. Montgomery D. C., Runger G. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 7th ed. Hoboken: Wiley, 2018. 768 p.
 16. Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р. Оценка эффективности экранирования корпуса соединителя бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата // *Авиакосмическое приборостроение*. 2013. № 4. С. 37–42. EDN SSXLJ

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2026. Vol. 12, no. 3, pp. 182–192
DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-03-182-192

A Method of Transmitting Shunting Signal Aspect Data to a Locomotive with Formed Directional Signal Reception Zone

Information about authors:

MINAKOV Vitalij Anatol'evich, PhD in Engineering, Associate Professor of the "Locomotives" Department; e-mail: vitalya_13@mail.ru

NOSKOV Vitalij Olegovich, Senior Lecturer of the "Locomotives" Department; e-mail: vitalik_noskov@mail.ru

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk

Abstract: the paper addresses the challenge of improving shunting safety at railway stations with track sections lack track circuit coding. Under such conditions, locomotive onboard safety systems do not receive shunting signal aspect data, which increases the probability of passing restrictive signals and creates hazardous situations. This study aims to develop a method for transmitting shunting signal aspect data to a locomotive using a Bluetooth Low Energy (BLE) wireless communication channel. A distinctive feature of the proposed method is the formation of a directional signal propagation zone through the use of shielding elements in the transmitting device, ensuring spatial restriction of the signal area. The paper presents free-space path loss calculations, evaluates the received power level, and proposes an approach to characterizing the directional properties of the data transmission system. A laboratory prototype based on the ESP32 microcontroller with BLE support was developed and evaluated. Experimental studies confirmed the feasibility of forming a directional signal zone towards the receiving device. The results demonstrate the practical feasibility of the proposed method and the

high potential of implementing BLE technologies to enhance the safety of shunting movements at railway stations.

Keywords: shunting operations, automation, locomotive, signalling, shunting signal, safety devices, wireless communication, directional signal transmission, shielding, Bluetooth

References

1. Frolov N. V., et al. Chelovecheskij faktor v strukture prichin narusheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov [Human Factor in the Structure of Causes of Train Safety Violations], *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus [XXI Century: Results of the Past and Problems of the Present Plus]*, 2022, vol. 11, no. 2 (58), pp. 202–206. DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0035. EDN ESAFWN (In Russian)
2. Minakov V. A., Fomenko V. K. Tekhnologiya mashinnogo zreniya na lokomotivah dlya identifikatsii putevyh signalov [Machine Vision Technology on Locomotives for Track Signal Identification], *Mir transporta [World of Transport]*, 2019, no. 17 (6), pp. 62–72. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-62-72. EDN PKTLNS (In Russian)
3. Aktual'nye voprosy psihofiziologicheskogo obespecheniya bezopasnosti dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte: sbornik nauchnykh trudov ONPC PT NUZ «Nauchnyj klinicheskij centr ОАО «RZhD»» [Current Issues of Psychophysiological Support for Railway Transport Safety: Collection of Scientific Papers of the Specialized Scientific and Practical Center for Psychophysiological Testing of the Non-Commercial Private Institution "Scientific Clinical Center of Russian Railways"], Moscow: AO "T8 Publishing Technologies", 2017, 386 p. (In Russian)
4. Akinin M. Yu., et al. Sistema MALS kak sostavlyayushchaya cifrovoj zheleznoj dorogi [MALS System as a Component of the Digital Railway], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2019, no. 4, pp. 26–28. (In Russian)

5. Patti G., Leonardi L., Bello L. Lo. Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review, *Sensors*, 2018, vol. 18, iss. 9, article 2802. DOI: 10.3390/s18092802
6. Mikhaylov K., Tervonen J. A Survey on Bluetooth Low Energy Technology and Its Applications, *Information*, 2013, vol. 4, iss. 4, pp. 528–553. DOI: 10.3390/info4040528
7. Kolybelnikov A. I. Obzor tekhnologij besprovodnyh setej [Overview of Wireless Network Technologies], *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta (nacional'nogo issledovatel'skogo universiteta) [Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)]*, 2012, vol. 4, no. 2 (14), pp. 3–29. EDN NLJNNK (In Russian)
8. Molisch A. K. Wireless Communications, 3rd ed., Chichester: Wiley, 2022, 1008 p.
9. Gomez C., Oller J., Paradells J. Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: *An Emerging Low Power Wireless Technology*, 2012, vol. 12, iss. 9, pp. 11 734–11 753.
10. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design, 4th ed., Hoboken: Wiley, 2016, 1104 p.
11. Stutzman W. L. Thiele G. A. Antenna Theory and Design, 3rd ed., Hoboken: Wiley, 2012, 864 p.
12. Khalifeh A. Al Rousan M. Internet of Things Using ESP32, *International Journal of Computer Applications*, 2021, vol. 174, iss. 24, pp. 15–20. DOI: 10.5120/ijca2021921614
13. Nikol'skij V. V., Nikol'skaya T. I. Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and Radio Wave Propagation], 4th ed., Saint Petersburg: Lan', 2012, 544 p. (In Russian)
14. Perangin Angin W. K., Kuhlmann K., Jürgen R. Generalized Efficiency and the Uncertainty of Millimeter Wave Power Standard, *Advances in Radio Science*, 2023, no. 21, pp. 7–13. DOI: 10.5194/ars-21-7-2023
15. Montgomery D. C., Runger G. C. Applied Statistics and Probability for Engineers, 7th ed., Hoboken: Wiley, 2018, 768 p.
16. Komnatnov M. E., Gazizov T. R. Ocenka effektivnosti ekranirovaniya korpusa soedinitelya bortovoj radioelektronnoj apparatury kosmicheskogo apparata [Evaluation of Shielding Effectiveness of the Connector Housing for On Board Radioelectronic Equipment of a Spacecraft], *Aviakosmicheskoe priborostroenie [Aerospace Instrumentation]*, 2013, no. 4, pp. 37–42. EDN SSXLUI (In Russian)