

**Демин Владимир Николаевич**  
заместитель начальника  
Федерального казенного учреждения  
«Научно-исследовательский центр «Охрана»  
Федеральной службы войск национальной гвардии РФ  
г. Москва, Россия

**Янгиров Илдар Мухаматович**  
научный сотрудник  
Федерального казенного учреждения  
«Научно-исследовательский центр «Охрана»  
Федеральной службы войск национальной гвардии РФ  
г. Москва, Россия

**Анализ технологий: Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee и Lora применительно к средствам обнаружения для охраны помещений, хранилищ ценностей, территорий и акваторий объектов в неблагоприятных условиях**

**Аннотация.** В статье проводится тщательное сравнение четырех известных технологий передачи данных, подходящих для применения в охранных извещателях, работающих в сложных условиях.

Исследование направлено на определение оптимального решения для связи извещателей в неблагоприятных условиях. Отмечая такие ключевые факторы, как мощность сигнала, устойчивость к помехам и эффективность передачи данных между извещателями охранными и приборами приема – контрольными охранно – пожарными (далее – ППКОП), обеспечивающими контроль состояния извещателей и шлейфов сигнализации, формирования извещений о тревоге, пожаре, нарушении на индикаторы, релейные выходы, в цифровые интерфейсы.

В исследовании рассмотрены показатели индикации мощности принимаемого сигнала (RSSI – Reseiyng Signal Strength Indicator) и отношения мощности передаваемого сигнала к мощности шума (сигнал-шум) (S/N – Signal / Noise Ratio), скорости передачи данных (Data rate), а также отличительные черты и компромиссы между технологиями передачи данных посредством Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee и LoRa.

Полученные результаты исследования позволяют использовать их при выборе технологий передачи данных для средств обнаружения, применяемых в охране помещений и хранилищ ценностей, а также для охраны территорий объектов и прилегающих акваторий в сложных условиях.

Это исследование закладывает основу для будущих разработок в сфере развития средств обнаружения, подчеркивая решающую роль выбора правильных средств передачи данных в неблагоприятных условиях.

**Ключевые слова:** Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRa, (RSSI), Reseiyng Signal Strength Indicator, сигнал-шум, S/N – Signal / Noise Ratio, скорость передачи данных, Data rate, мощность сигнала, устойчивость к помехам, извещатель охранной, прибор приема – контрольный охранно – пожарный (ППКОП).

**Demin Vladimir Nikolaevich**

Deputy Head of the  
Federal State Institution «Research Center «Okhrana»  
Federal Service of the National Guard Troops  
of the Russian Federation  
Moscow, Russia

**Yangirov Ildar Mukhamatovich**

Research fellow  
Federal State Institution "Research Center "Okhrana"  
Federal Service of the National Guard Troops  
of the Russian Federation  
Moscow, Russia

**Analysis of technologies: Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee and lora as applied to detection means for protecting premises, storage of values, territories and water areas of facilities in harsh conditions.**

**Abstract.** The article provides a thorough comparison of four known data transmission technologies suitable for use in security detectors operating in difficult conditions.

The study is aimed at determining the optimal solution for detector communication in adverse conditions. Noting such key factors as signal power,

resistance to interference and efficiency of data transmission between security detectors and fire alarm control panels (hereinafter referred to as FCCP), which monitor the status of detectors and alarm loops, generate alarm, fire, and violation notifications to indicators, relay outputs, and digital interfaces.

The study examines the indicators of the received signal strength indication (RSSI - Receiving Signal Strength Indicator) and the ratio of the transmitted signal power to the noise power (signal-to-noise) (S/N - Signal / Noise Ratio), data transfer rate (Data rate), as well as the distinctive features and trade-offs between data transmission technologies via Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and LoRa. The results of the study can be used to select data transmission technologies for detection equipment used in the protection of premises and storage facilities, as well as for the protection of the territory of objects and adjacent water areas in difficult conditions. This study lays the foundation for future developments in the field of detection equipment development, emphasizing the crucial role of choosing the right data transmission equipment in adverse conditions.

**Key words:** Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRa, (RSSI), Receiving Signal Strength Indicator, signal-to-noise ratio, S/N – Signal / Noise Ratio, data transfer rate, Data rate, signal power, interference resistance, security alarm, fire alarm control panel (FACP).

Беспроводная передача данных в неблагоприятных условиях, таких как: промышленные объекты с высокой концентрацией застройки и технологического оборудования, объекты с агрессивными средами, протяженные территории и акватории, требует инновационных решений с целью минимизации всех возможных рисков и исключения потерь [2].

Для обеспечения связи между охраняемыми извещателями и ППКОП жизнеспособными видятся ряд беспроводных технологий, включая Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth и LoRa. Зачастую эти решения не лишены определенных недостатков. Например: несмотря широкое распространение Wi-Fi, в данной

технологии сохраняются такие проблемы, как размер антенны и управление полосой пропускания в условиях ограниченных ресурсов [7].

В данной статье представлен сравнительный анализ передачи данных по Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee и LoRa технологии в контексте коммуникации между несколькими охранными извещателями и ППКОП.

Данное исследование направлено на изучение силы сигнала, устойчивость к помехам, эффективность передачи данных и выявления оптимального решения для охранных систем, работающих в сложных условиях.

Проведенный системный сравнительный анализ передачи данных по различным технологиям закладывает основу для будущих разработок и способствует сфере развития средств обнаружения в части выбора оптимальных средств передачи данных в неблагоприятных условиях.

В целях системного сравнительного анализа передачи данных по различным технологиям были обработаны данные, полученные в ходе разработок в сфере децентрализованных коллаборативных роботов (коботов), высокоуниверсальных роботов, опубликованные в иностранных периодических изданиях [3], [4], [5], [6], [8]. Проведен анализ данных технологий: LoRa, Wi-Fi, Bluetooth и ZigBee в сценариях, где надежность, дальность и устойчивость к помехе являются критическими факторами. Использовался метод отбора необходимых целевых данных из локальных баз данных от экспериментальных устройств, роботов и коботов. Полученные данные сигналов от каждого устройства рассматривались применительно к охранному извещателю и ППКОП.

Учитывая ключевые факторы эффективности передачи данных между извещателями охранными и ППКОП, такие как мощность сигнала, устойчивость к помехам при обеспечении контроля состояния извещателей и шлейфов сигнализации, формирования извещений о тревоге, пожаре, нарушении, результаты, полученные от экспериментальных устройств, роботов и коботов фильтровались по отношению к реалистичной среде,

включающей такие препятствия, как стены, вода, металл и живые организмы. Экспериментальный подход направлен на обеспечение прочной основы для оптимального выбора технологии передачи данных в реальных и неблагоприятных условиях. Сравнительные характеристики технологий: Wi-Fi, Bluetooth, LoRa и ZigBee, приведены в (табл. 1).

**Таблица 1. Сравнительные характеристики технологий передачи данных**

Критерий	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee	LoRa
Диапазон частот	2,4 ГГц, 5 ГГц	2.4 ГГц (2400-2483,5 МГц)	2,4 ГГц (Россия), 868 МГц (Европа), 915 МГц (США), 915 МГц (Китай)	433,05-434,79; 868,7-869,2; 2400-2483,5; 5725-5850 МГц (Россия) 868 МГц (Европа), 915 МГц (США), 433 МГц (Азия)
Каналы	До 14 (2,4 ГГц),	79 (2,4 ГГц), 40 (LE)	16 (2,4 ГГц), 10 (868 МГц), 10 (915 МГц)	Переменная, (64 канала в LoRaWAN)
Модуляция, тип	OFDM, с (FHSS)	GFSK, (DQPSK), 8DPSK, FHSS	Двоичный PSK (BPSK), Квадратурная PSK (QPSK)	Расширенный спектр ЛЧМ сигнала, LoRa, частотный сдвиг ключа (FSK).
Скорость передачи данных	Высокая 600 Мбит/с - 7 Гбит/с	Средняя 1 Мбит/с - 3 Мбит/с	От низкого до среднего 20-250 кбит/с	От низкого до среднего 0,3 - 50 кбит/с
Энергопотребление при приеме / передаче	Высокое	Среднее	Низкое	Минимальное
Чувствительность	От умеренного до высокого	Умеренная	Высокая	Высокая
Сеть топология	Многоточечная, специальная инфраструктура	Многоточечная, Пикосеть	Многоточечная, Mesh сеть	Точка-точка, Mesh, Mesh Star сеть.
Диапазон действия	Короткий и средний (30-100 м)	Короткий (10-20 м, до 100 м с BLE 5.x)	Короткий и средний (10-75 м)	Большой радиус (до нескольких сотен м)
Безопасность	Защищенный доступ Wi-Fi 3 (WPA3), WPA2, (WEP)	Расширенное шифрование (AES)	AEC-128, AEC-256, безопасность канального уровня	AES-128, безопасный ключ.

Оценка включает в себя расчет индикации уровня принимаемого сигнала RSSI, расчет отношения сигнал/шум S/N и анализ пропускной

способности, что способствует всестороннему пониманию пригодности технологий передачи данных в неблагоприятных условиях:

1) Анализ расчета RSSI на основе расстояния: на каждом predetermined расстоянии проанализированы измерения RSSI для каждой технологии передачи данных. Данный метод дает представление о силе принятого сигнала, что имеет решающее значение для оценки надежности связи в неблагоприятных средах.

2) Анализ расчета S/N на основе расстояния: аналогично (1) проанализированы данные S/N на различном расстоянии. S/N дает представление о качестве сигнала относительно окружающего шума, важный параметр для прогнозирования потенциальных помех.

3) Анализ пропускной способности в зависимости от расстояния Data rate. В целях оценки скорости передачи данных проанализированы данные пропускной способности в зависимости от расстояния для каждой технологии передачи данных, что позволяет понять, как производительность передачи данных меняется в динамических и неблагоприятных средах.

Полученные результаты анализа данных технологий Wi-Fi, Bluetooth, LoRa и ZigBee, отражены в (табл. 2).

**Таблица 2. Результаты анализа данных Wi-Fi, Bluetooth, LoRa и ZigBee.**

Анализ показателей индикации мощности принимаемого сигнала (RSSI)							
WiFi		Bluetooth		LoRa		ZigBee	
дистанция (м)	Значение (дБ/м)	дистанция (м)	Значение (дБ/м)	дистанция (м)	Значение (дБ/м)	дистанция (м)	Значение (дБ/м)
0,5	-33	0,5	-52	0	-35	0,5	-10
2	-35	1	-60	5	-39	3	-37
4	-45	2	-57	10	-40	6	-37
6	-50	3	-64	15	-48	9	-39
8	-53	4	-63	20	-59	12	-50
10	-55	5	-67	50	-90	15	-52
12	-54	6	-68	100	-125	18	-57
14	-58	7	-69	150	-130	21	-65
16	-62	8	-69	200	-134	24	-71
18	-67	9	-73	250	-140	27	-76
						30	-78

<b>Анализ отношения мощности передаваемого сигнала к мощности шума (сигнал-шум) (S/N)</b>							
<b>WiFi</b>		<b>Bluetooth</b>		<b>LoRa</b>		<b>ZigBee</b>	
<b>дистанция (м)</b>	<b>Значение (дБ)</b>	<b>дистанция (м)</b>	<b>Значение (дБ)</b>	<b>дистанция (м)</b>	<b>Значение (дБ)</b>	<b>дистанция (м)</b>	<b>Значение (дБ)</b>
0,5	11	0,5	17,5	0	-7	0,5	3,8
2	10	1	17	5	-8,2	3	3,5
4	10	2	16,8	10	-10	6	3
6	9	3	15,9	15	-11	9	1
8	5	4	13	20	-13	12	0,8
10	3	5	11	50	-16,5	15	-0,1
12	-3	6	11,8	100	-20	18	-0,5
14	-8	7	9	150	-22	21	-3
16	-10	8	8,2	200	-25	24	-4,5
18	-15	9	5	250	-27	27	-6,9
						30	-8,4
<b>Анализ пропускной способности (скорости передачи данных) (Data rate)</b>							
<b>WiFi</b>		<b>Bluetooth</b>		<b>LoRa</b>		<b>ZigBee</b>	
<b>дистанция (м)</b>	<b>Значение (Кбит/с)</b>	<b>дистанция (м)</b>	<b>Значение (Кбит/с)</b>	<b>дистанция (м)</b>	<b>Значение (Кбит/с)</b>	<b>дистанция (м)</b>	<b>Значение (Кбит/с)</b>
0,5	95	0,5	1300	0	72	0,5	425
2	90	1	800	5	78	3	240
4	85	2	600	10	76	6	160
6	60	3	400	15	62	9	150
8	25	4	300	20	67	12	125
10	5	5	200	50	52	15	70
12	4	6	120	100	25	18	45
14	3	7	110	150	18	21	30
16	2	8	100	200	12	24	25
18	1	9	50	250	10	27	20
						30	10

Сравнительный анализ параметров технологий Wi-Fi, Bluetooth, LoRa и ZigBee, приведены в (рис. 1, 2).

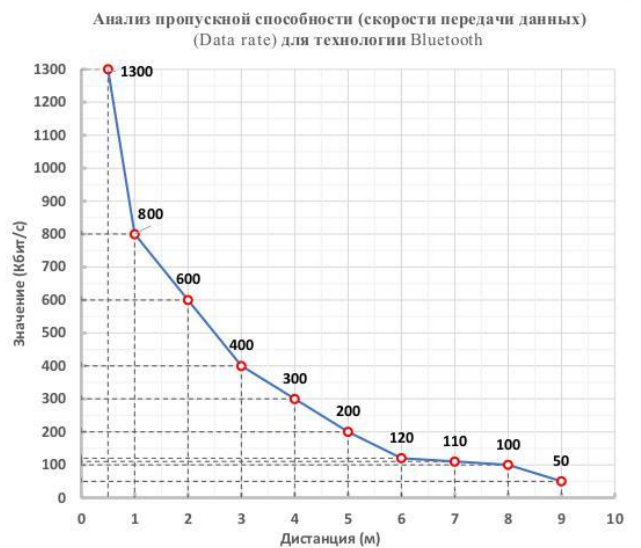
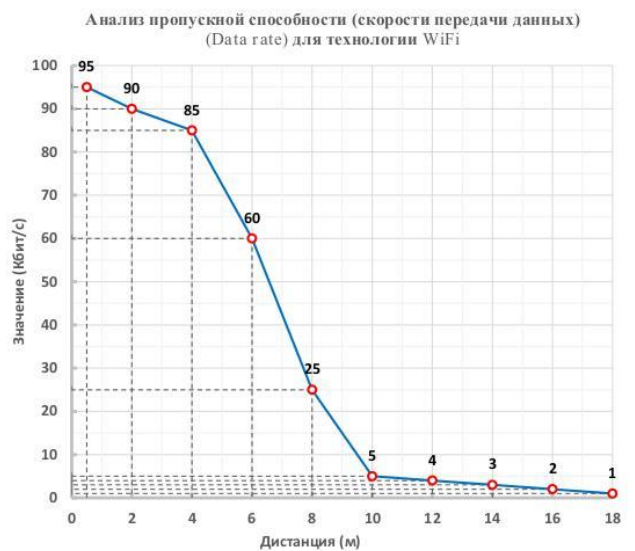
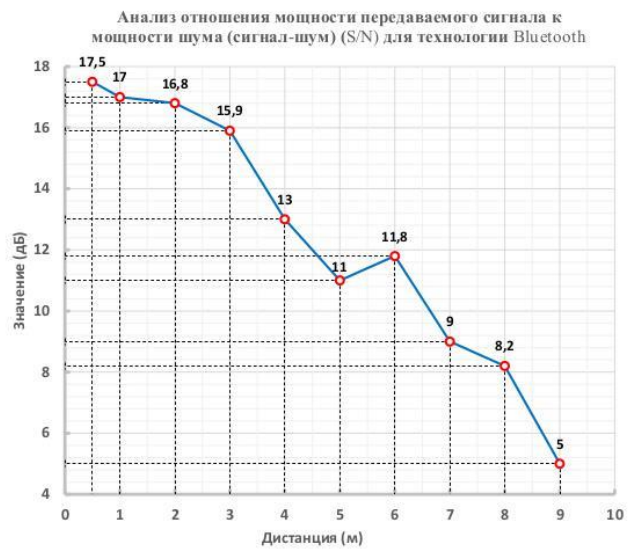
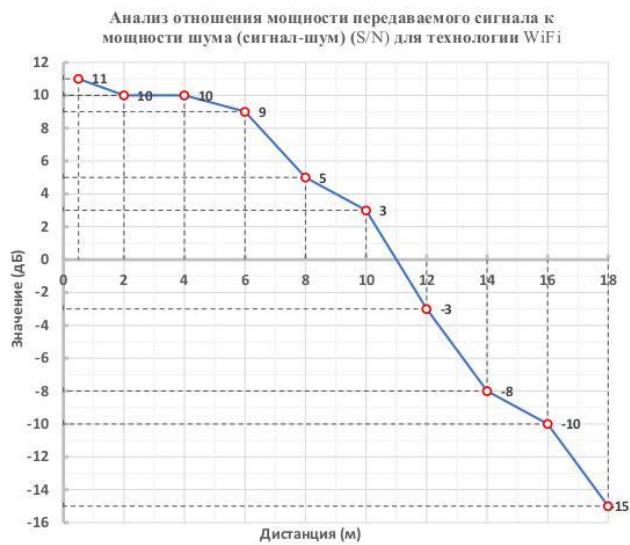
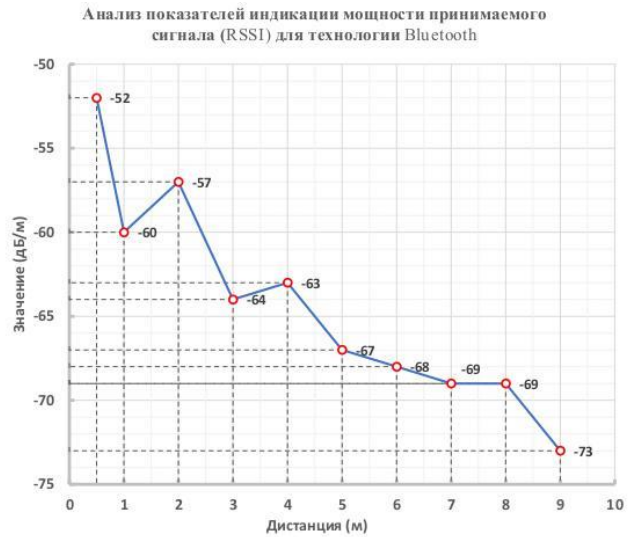
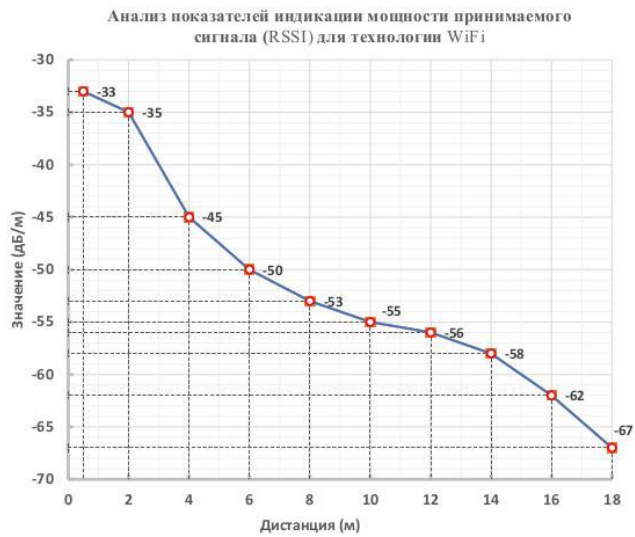


Рисунок 1. Сравнительный анализ параметров технологий Wi-Fi, Bluetooth



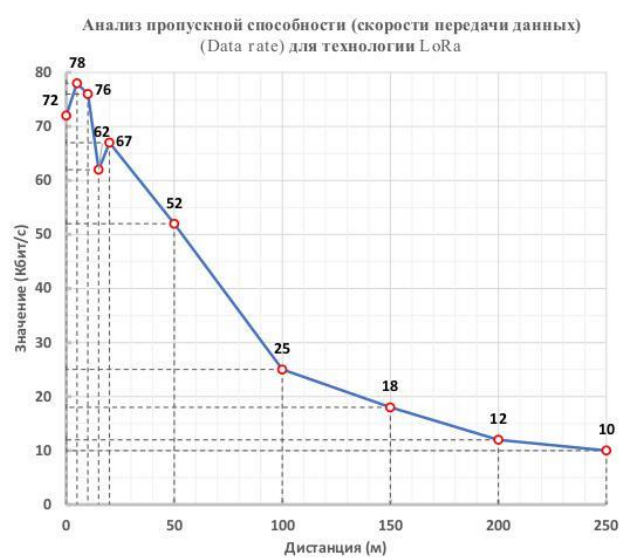
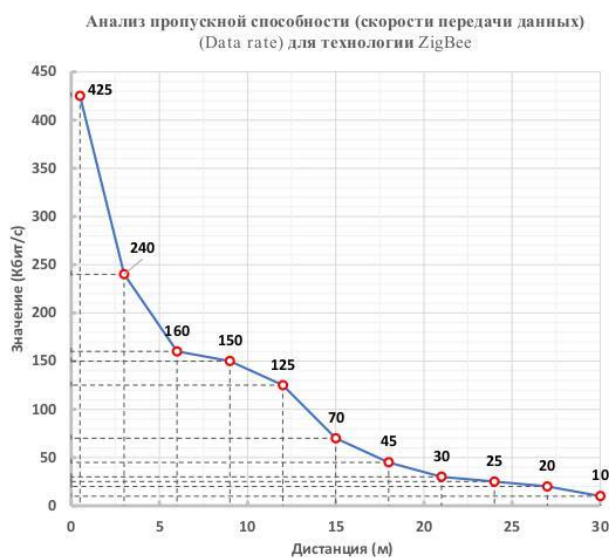
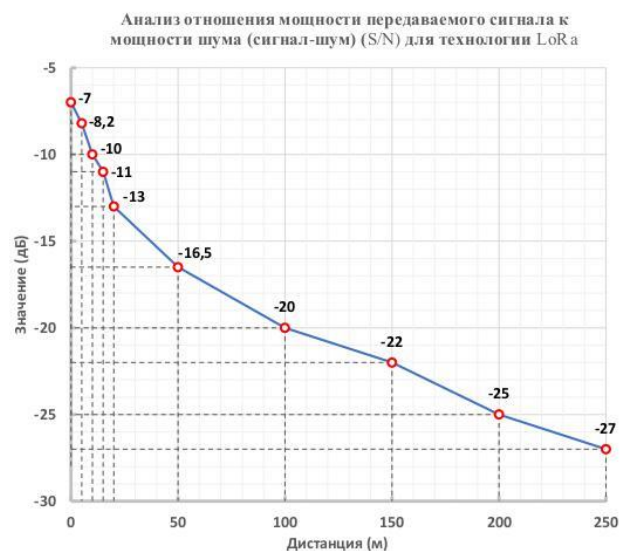
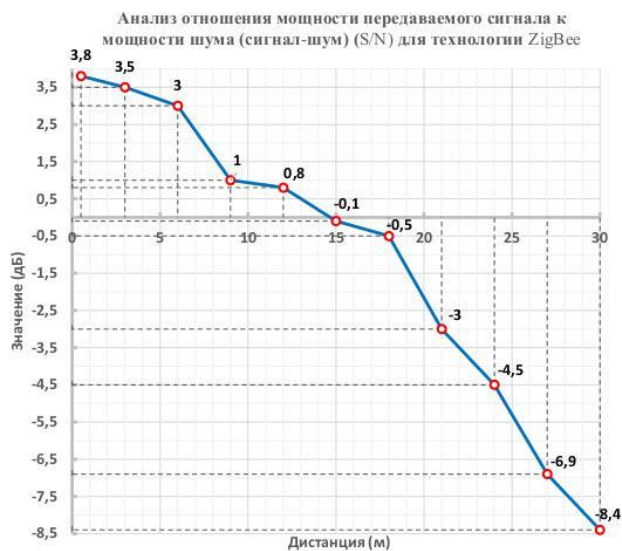
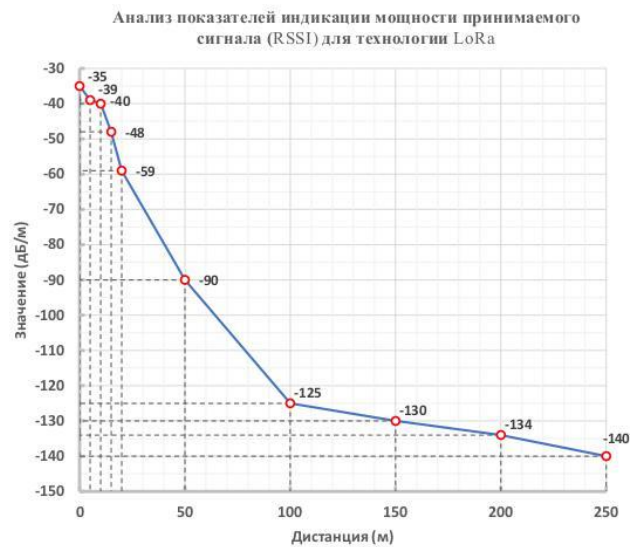


Рисунок 2. Сравнительный анализ параметров технологий ZigBee, LoRa

В ходе анализа RSSI выявлена следующая тенденция: Wi-Fi, Bluetooth и ZigBee демонстрируют более высокий уровень сигнала затухания по сравнению с LoRa, что соответствует ожиданиям, учитывая характерную для LoRa более медленную скорость затухания.

Значительные стандартные отклонения для Bluetooth и Wi-Fi отражают их повышенную чувствительность к окружающему шуму, что приводит к частым сбоям пакетов данных. Bluetooth, в частности, отличается сложностью захвата и расчета параметров сигнала из-за механизмов безопасности. Напротив, Wi-Fi, демонстрирует заметную изменчивость, подчеркивая его уязвимость к помехам.

Результаты S/N демонстрируют общее снижение показателя сигнал / шум с увеличением расстояния.

Однако в Wi-Fi и Bluetooth отмечается высокие показатели S/N на коротких расстояниях, что подчеркивает их способность излучать надежные сигналы в условиях шума. Эта функция, хотя и полезна на коротких расстояниях, сопряжена с высоким потреблением энергии по сравнению с технологиями LoRa и ZigBee, особенно с LoRa.

Кроме того, было выявлено падение качества сигнала Wi-Fi и Bluetooth в тот момент, когда появляется водное препятствие. При этом влияние воды на качество сигнала, наиболее характерно для технологий Wi-Fi и Bluetooth, что подчеркивает чувствительность этих технологий к физическим препятствиям, особенно водным. Напротив, ZigBee и LoRa более устойчивы к этим помехам, что свидетельствует о приспособляемости данных технологий к неблагоприятным средам.

Несмотря на то, что Wi-Fi обеспечивает самую высокую пропускную способность, его эффективность значительно падает, когда S/N становится низким. Bluetooth, из-за его низкой устойчивости к шумам, быстро теряет свою пропускную способность, что, несмотря на обеспечение высокой информационной безопасности, делает Bluetooth иррациональным выбором применительно к средствам обнаружения для охраны помещений и хранилищ

ценностей, а также для охраны территорий объектов и прилегающих акваторий в неблагоприятных условиях.

Устойчивость LoRa к шуму наглядно демонстрируется при анализе потока  $S/N$ , при этом количество трафика остается стабильным, даже если энергия шума больше энергии сигнала ( $S/N < 0$ ), что свидетельствует о его надежной модуляции и, несмотря на низкую пропускную способность, канала позиционирует LoRa как предпочтительный вариант для передачи конфиденциальной информации между средствами обнаружения и ППКОП.

В заключение следует отметить, что технология LoRa является наиболее предпочтительным решением для передачи конфиденциальной информации между средствами обнаружения и ППКОП.

К преимуществам можно отнести устойчивость к неблагоприятным средам, заметную стабильность работы и сниженное потребление энергии. Способность поддерживать стабильную скорость передачи данных даже в шумных условиях, что делает его оптимальным выбором для передачи конфиденциальной информации между средствами обнаружения и ППКОП, где надежность передачи имеет первостепенное значение, а безопасность, обеспечиваемая LoRa Wide Area Network (LoRaWAN) в протоколе управления передачей/межсетевом протоколе (TCP/IP), укрепляет его позицию в выборе технологии для этих целей.

Результаты подчеркивают надежность LoRa в агрессивных условиях, демонстрируя его превосходную производительность в поддержании стабильности связи, даже при столкновении с препятствиями и помехами. Низкое энергопотребление технологии и расширенный диапазон делают ее особенно подходящей для сценариев, требующих связи на больших расстояниях с минимальным потреблением энергии.

Перспективы данного исследования предполагают многообещающее будущее для интеграции LoRa применительно к средствам обнаружения для охраны помещений и хранилищ ценностей, а

также для охраны территорий объектов и прилегающих акваторий в неблагоприятных условиях.

#### **Список источников**

1. Варгаузин В. Сетевая технология ZigBee. Сетевые устройства ZigBee. Создание и расширение сетей // TeleMultiMedia. 2005 С. 29–32.
2. Кучерявый А. Е. Самоорганизующиеся сети и новые услуги // Электросвязь. 2013 № 1 С. 21–24.
3. Al-Obaidi A.S.M. , Al-Qassar A. , Nasser A.R., Alkhayyat A. , Humaidi A.J., Ibraheem I.K. Embedded design and implementation of mobile robot for surveillance applications // Indonesian Journal of Science and Technology, vol. 6, no. 2, pp. 427–440, May 2021, doi: 10.17509/ijost.v6i2.36275.
4. Bellingham J.G., Rajan K. Robotics in remote and hostile environments // Science, vol. 318, № 5853, pp. 1098–1102, Nov. 2007, doi: 10.1126/science.1146230.
- 5 IslamK.Z., Murray D., Diepeveen D., Jones M.G.K., Sohel F. LoRa-based outdoor localization and tracking using unsupervised symbolization // Internet of Things, vol. 25, Art. no. 101016, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.iot.2023.101016.
6. Subramanian K.S.R. , Balaji V., Vivekanandan M. Smart robot for disaster detection using ZigBee technology // International Journal of Applied Engineering Research, vol. 10, pp. 27311–27320, Jan. 2015.
8. Suherman S. WiFi-Friendly building to enable WiFi signal indoor. // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics (BEEI), vol. 7, no. 2, pp. 264–271, Jun. 2018, doi: 10.11591/eei.v7i2.871.
10. Tamali A, Tamali M., Amardjia N. Experimental analysis for comparison of wireless transmission technologies. Int J Elec & Comp Eng, Vol. 14, No. 3, June 2024, ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ieece.v14i3.pp2753-2761.
11. Sikimic M. , Amovic M., VujovicV., Suknovic B., Manjak D. An overview of wireless technologies for IoT network // 2020 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/infoteh48170.2020.9066337.