

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 654.937

DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-4-956-966

EDN WGGWGJ

Влияние мощности передатчика на расстояние передачи данных по беспроводной связи LoRa

^{1,2}Наумов М.А., ¹Карповский А.Ю., ¹Курносов В.Г., ¹Андрусенко С.Н.

¹Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин
«ГБУ «Автоматгормаш им. В.А. Антилова»

Россия, ДНР, г. Донецк, 283015, пр. Ильича, 93А

²Донецкий национальный технический университет

Россия, ДНР, г. Донецк, 283001, ул. Артема, 58

oagm308@mail.ru

Аннотация. Рассматривается влияние мощности передатчика на расстояние передачи данных в беспроводной сети LoRa. Эксперименты с использованием модуля SX1278 и микроконтроллера STM32F103C8T6 показали зависимость между мощностью сигнала и расстоянием его распространения. Для выявления закономерностей применены различные методы аппроксимации: линейная, квадратичная, кубическая, степенная и другие. Наименьшую ошибку показала степенная регрессия, в то время как экспоненциальные и гиперболические модели оказались наименее точными. Результаты могут быть полезны при проектировании радиоуправляемых систем в условиях ограниченного действия сигнала, например, на горных и подземных объектах.

Ключевые слова: радиосвязь, эксперимент, радиоуправление, анализ, система управления, LoRa, аппроксимация, ошибка

Для цитирования: Наумов М.А., Карповский А.Ю., Курносов В.Г., Андрусенко С.Н. 2025. Влияние мощности передатчика на расстояние передачи данных по беспроводной связи LoRa. *Экономика. Информатика*, 52(4): 956–966. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-4-956-966; EDN WGGWGJ

Effect of the Transmitter Power on the Data Transmission Distance over the LoRa Wireless Connection

^{1,2}Maxim A. Naumov, ¹Artur Yu. Karpovsky,

¹Vyacheslav G. Kurnosov, ¹Sergey N. Andrusenko

¹Scientific Research and Design Institute for Automation of Mining Machinery

“GBU “Automatgormash named after V.A. Antipov”

93A Ilyich Ave., Donetsk 283015, DPR, Russia

²Donetsk National Technical University,

58 Artem St., Donetsk 283001, DPR, Russia

oagm308@mail.ru

Abstract. The work experimentally investigates the effect of transmitter power on the communication range in LoRa wireless networks, which is critically important for the energy-efficient design of IoT systems.

© Наумов М.А., Карповский А.Ю., Курносов В.Г., Андрусенко С.Н., 2025

The experiments were conducted on a hardware stand with the SX1278 module and the STM32F103C8T6 microcontroller. To analyze the resulting dependence, various regression models were tested: linear, quadratic, cubic, power-law, exponential, and hyperbolic. A comparison according to the RMSE and R² criteria showed that the smallest error is provided by a power approximation that most accurately reflects the physics of radio signal attenuation. Exponential and hyperbolic models proved to be the least adequate. The practical value of the results lies in the possibility of optimizing the power of the transmitter to increase the battery life of the devices and reliable coverage in difficult terrain conditions, such as mountainous or underground facilities.

Keywords: radio communication, experiment, radio control, analysis, control system, LoRa, approximation, error

For citation: Naumov M.A., Karpovsky A.Yu., Kurnosov V.G., Andrusenko S.N. 2025. Effect of the Transmitter Power on the Data Transmission Distance over the LoRa Wireless Connection. *Economics. Information technologies*, 52(4): 956–966 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-4-956-966; EDN WGGWGI

Введение

Организация радиоуправления является классической задачей при проектировании систем управления подвижными машинами и механизмами. [Naumov, Karpovsky, 2024] В горно-шахтном оборудовании, в том числе и при автоматизации очистных комбайнов (машин для выемки пластовых полезных ископаемых), подсистема радиоуправления должна обеспечивать выполнение своих функций как в зоне видимости комбайна, так и за её пределами. Увеличение дальности радиоуправления является особо важным, и позволяет повысить безопасность ведения работ по выемке угольных масс путем минимизации присутствия человека в опасной зоне. [Наумов, Карповский, 2024; Наумов, Карповский, Казаков, 2024] Новым решением на рынке радиосвязи выступает технология LoRa. [Sornin et al., 2015, Attia, 2019]

Современные системы автоматизации требуют надёжной и энергоэффективной беспроводной связи, особенно в условиях сложной производственной среды, такой как горные и подземные выработки. Технология LoRa отличается низким энергопотреблением и большой дальностью передачи, что делает её перспективной для применения в горной промышленности. [Обзор технологии LoRa: Межетов, 2021] Однако важным параметром, определяющим эффективность LoRa-связи, является мощность передатчика, от которой зависит дальность передачи и устойчивость сигнала. Изучение этой зависимости позволяет повысить надёжность радиосвязи и оптимизировать энергозатраты системы управления. [IoT Communication Protocols...; SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020...; Performance line, ARM-based...]

Цель исследования – определение зависимости между мощностью передатчика и расстоянием передачи данных в беспроводной системе связи LoRa, а также выбор наиболее точного метода аппроксимации экспериментальных данных для последующего использования в инженерных расчётах и проектировании.

Экспериментальные исследования проводились с использованием модуля LoRa SX1278 и микроконтроллера. Мощность передатчика варьировалась от 0 до 17 dBm, а для каждого значения фиксировались расстояние передачи сигнала и уровень принимаемого сигнала (RSSI). [Шестакович, 2012; Baruffa G. et al. 2020] Эксперименты проводились в полевых условиях при различных коэффициентах расширения спектра и уровнях соотношения сигнал/шум.

Определялась функциональная зависимость между мощностью передатчика и расстоянием распространения сигнала. Для этого была произведена аппроксимация экспериментальных данных с использованием различных типов регрессий: линейной, квадратичной, кубической, степенной, показательной, гиперболической, логарифмической и экспоненциальной. Для каждой модели рассчитывалась средняя ошибка аппроксимации, что позволило оценить точность и выбрать наилучшую математическую модель – ею оказалась степенная регрессия, показавшая минимальную погрешность (9,25 %). Для описания зависимости между мощностью передатчика и расстоянием передачи данных были

использованы модели различных классов: линейная, полиномиальные (второго и третьего порядка), степенная, показательная, логарифмическая, гиперболическая и экспоненциальная. Такой выбор обусловлен необходимостью выявления наилучшей аппроксимации экспериментальных данных с учётом возможных типов функциональной связи.

Линейная модель применяется в качестве базового подхода, отражающего предположение о пропорциональности между переменными. Полиномиальные модели (квадратичная и кубическая) позволяют учитывать более сложные формы зависимости, включая экстремумы и участки с переменной скоростью изменения. Степенная и показательная модели часто применяются для описания процессов ослабления или усиления сигнала в радиосвязи, где наблюдается нелинейная динамика. Логарифмическая и гиперболическая модели используются при наличии насыщения эффекта или асимптотического поведения. Использование широкого набора моделей обосновано отсутствием априорной информации о характере зависимости, а также стремлением к объективному выбору наилучшей модели на основе сравнительного анализа ошибок аппроксимации. Это позволяет получить не только качественное, но и количественно надёжное описание взаимосвязи исследуемых параметров.

В табл. 1 приведены результаты работы модуля LoRa SX1278 в связке с микроконтроллером при различных отношениях мощности передатчика и расстояния передаваемого сигнала. В ходе исследования в открытых источниках информации не было найдено функциональных зависимостей, описывающих законы, по которым изменяются переменные расстояния передачи данных по беспроводной связи LoRa. Для выведения функциональных зависимостей из табличных значений воспользуемся аппроксимацией.

Таблица 1
 Table 1

Результаты проведения экспериментов
 Experimental results

Расстояние от приемника до передатчика, м	Уровень принимаемого сигнала (RSSI), dBm	Мощность, dBm	Мощность, мВт
102	-114,34	0	1
162	-117,63	1	1,30
170	-116,86	5	3,2
197	-116,03	10	10
272	-113,03	15	32
338	-115,87	17	50

Аппроксимация зависимости расстояния передачи данных от мощности передатчика

Аппроксимируем [Пономарев, Пикулева, 2014; Малышева, 2016] значения, представленные в табл. 1, с помощью линейной регрессии (формула 1):

$$\hat{y} = a \cdot x + b, \quad (1)$$

где x – мощность передатчика; y – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициент a по формуле 2:

$$a = \frac{\sum x_i \cdot \sum y_i - n \cdot \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \cdot \sum x_i^2} = \frac{192,5 \cdot 1608 - 7 \cdot 65131}{192,5^2 - 7 \cdot 13637} = 2,45, \quad (2)$$

n – количество проведенных опытов.

Найдем коэффициент b по формуле 3:

$$b = \frac{\sum x_i \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \cdot \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n \cdot \sum x_i^2} = \frac{197,5 \cdot 65131 - 13637 \cdot 1608}{197,5^2 - 7 \cdot 13637} = 160,58. \quad (3)$$

Тогда уравнение (1) линейной регрессии, описывающее зависимость мощности передатчика от расстояния передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 2,45 \cdot x + 160,58.$$

Среднюю ошибку аппроксимаций будем находить по формуле 4:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\%, \quad (4)$$

где \hat{y} – аппроксимированное значение расстояния передачи данных.

Аппроксимируем значения, представленные в табл. 1, с помощью квадратичной регрессии.

Уравнение квадратичной регрессии показано на формуле 5:

$$\hat{y} = a \cdot x^2 + b \cdot x + c. \quad (5)$$

Найдем коэффициенты a , b и c с помощью системы уравнений:

$$\begin{aligned} & \begin{cases} a \cdot \sum x_i^2 + b \cdot \sum x_i + n \cdot c = \sum y_i \\ a \cdot \sum x_i^3 + b \cdot \sum x_i^2 + \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a \cdot \sum x_i^4 + b \cdot \sum x_i^3 + \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \end{cases} = \\ & = \begin{cases} a \cdot 13637 + b \cdot 197,5 + 7 \cdot c = 1608 \\ a \cdot 1158803,97 + b \cdot 13637 + c \cdot 197,5 = 65131 \\ a \cdot 107308684,71 + b \cdot 1158803,97 + c \cdot 13637 = 4815344,58 \end{cases} = \\ & = \begin{cases} a = -0,03 \cdot \\ b = 5,64 \\ c = 135,36 \end{cases} \end{aligned}$$

Тогда уравнение (5) квадратичной регрессии, описывающее зависимость мощности передатчика от расстояния передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = -0,03 \cdot x^2 + 5,64 \cdot x + 135,36.$$

Аппроксимируем значения, представленные в табл. 1, с помощью кубической регрессии. Уравнение кубической регрессии показано на формуле 6:

$$\hat{y} = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d. \quad (6)$$

Найдем коэффициенты a , b , c и d с помощью системы уравнений:

$$\begin{aligned} & \begin{cases} a \cdot \sum x_i^3 + b \cdot \sum x_i^2 + c \cdot \sum x_i + n \cdot d = \sum y_i \\ a \cdot \sum x_i^4 + b \cdot \sum x_i^3 + \sum x_i^2 + \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a \cdot \sum x_i^5 + b \cdot \sum x_i^4 + \sum x_i^3 + \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \\ a \cdot \sum x_i^6 + b \cdot \sum x_i^5 + \sum x_i^4 + \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i \end{cases} = \\ & = \begin{cases} a \approx 0 \\ b = -0,05 \\ c = 6,03 \\ d = 134,16 \end{cases}. \end{aligned}$$

Тогда уравнение (6) кубической регрессии, описывающее зависимость мощности передатчика от расстояния передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = -0,05 \cdot x^2 + 6,03 \cdot x + 134,16.$$

Аппроксимируем значения, представленные в табл. 1, с помощью степенной регрессии. Уравнение степенной регрессии показано на формуле 7:

$$\hat{y} = a \cdot x^b. \quad (7)$$

Найдем коэффициент b :

$$b = \frac{n \cdot \sum(\ln(x_i) \cdot \ln(y_i)) - \sum \ln(x_i) \cdot \sum \ln(y_i)}{n \cdot \sum \ln^2(x_i) - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{7 \cdot 88,88 - 15,71 \cdot 37,47}{7 \cdot 246,8 - 246,8} = 0,24.$$

Найдем коэффициент a :

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} \cdot \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} \cdot \sum \ln(x_i)\right) = \exp\left(\frac{1}{7} \cdot 37,47 + \frac{0,24}{7} \cdot 15,71\right) = 123,29.$$

Тогда уравнение (7) степенной регрессии, описывающее зависимость расстояния передачи данных от мощности передатчика, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 123,29 \cdot x^{0,24}.$$

Аппроксимируем значения, представленные в табл. 1, с помощью показательной регрессии.

Уравнение показательной регрессии показано на формуле 8:

$$\hat{y} = a \cdot b^x. \quad (8)$$

Найдем коэффициент b :

$$b = \exp\left(\frac{n \cdot \sum(x_i \cdot \ln(y_i)) - \sum x_i \cdot \sum \ln(y_i)}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}\right) = \exp\left(\frac{7 \cdot 1141,6 - 197,5 \cdot 37,47}{7 \cdot 13637 - 39006,25}\right) = 1,01.$$

Найдем коэффициент a :

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} \cdot \sum \ln(y_i) - \frac{\ln(b)}{n} \cdot \sum x_i\right) = \exp\left(\frac{1}{7} \cdot 37,47 - \frac{0,01}{7} \cdot 197,5\right) = 157,06.$$

Тогда уравнение (8) показательной регрессии, описывающее зависимость мощности передатчика от расстояния передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 157,06 \cdot 1,01^x.$$

Аппроксимируем значения, представленные в табл. 1, с помощью гиперболической регрессии.

Уравнение гиперболической регрессии показано на формуле 9:

$$\hat{y} = a + \frac{b}{x}. \quad (9)$$

Найдем коэффициент b по формуле 10:

$$b = \frac{n \cdot \sum \frac{y_i}{x_i} - \sum \frac{1}{x_i} \sum y_i}{n \cdot \sum \frac{1}{x_i^2} - (\sum \frac{1}{x_i})^2} = \frac{7 \cdot 318,37 - 2,24 \cdot 1608}{7 \cdot 1,7 - 5,02} = -200,46. \quad (10)$$

Найдем коэффициент a по формуле 11:

$$a = \frac{1}{n} \cdot \sum y_i - \frac{b}{n} \cdot \sum \frac{1}{x_i} = \frac{1}{7} \cdot 1608 + \frac{-200,46}{7} \cdot 2,24 = 293,95. \quad (11)$$

Тогда уравнение (9) гиперболической регрессии, описывающее зависимость расстояния передачи данных от мощности передатчика, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 293,95 - \frac{200,46}{x}.$$

Аппроксимируем значения, представленные в табл. 1, с помощью логарифмической регрессии.

Уравнение логарифмической регрессии показано на формуле 12:

$$\hat{y} = a + b \cdot \ln(x). \quad (12)$$

Найдем коэффициент b :

$$b = \frac{n \cdot \sum(y_i \cdot \ln(x_i)) - \sum \ln(x_i) \cdot \sum y_i}{n \cdot \sum \ln^2 x_i - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{7 \cdot 4648,9 - 15,71 \cdot 1608}{7 \cdot 39006,25 - 39006,25} = 52,03.$$

Найдем коэффициент a по формуле 13:

$$a = \frac{1}{n} \cdot \sum y_i - \frac{b}{n} \cdot \sum \ln(x_i) = \frac{1}{7} \cdot 1608 - \frac{52,03}{7} \cdot 15,71 = 112,93. \quad (13)$$

Тогда уравнение (12) логарифмической регрессии, описывающее зависимость расстояния передачи данных от мощности передатчика, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 112,93 + 52,03 \cdot \ln(x).$$

Аппроксимируем значения, представленные в табл. 1, с помощью экспоненциальной регрессии.

Уравнение экспоненциальной регрессии показано на формуле 14:

$$\hat{y} = e^{a+b \cdot x}. \quad (14)$$

Найдем коэффициент b по формуле 15:

$$b = \frac{n \cdot \sum(x_i \cdot \ln(y_i)) - \sum \ln(y_i) \cdot \sum x_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{7 \cdot 1141,6 - 37,47 \cdot 197,5}{7 \cdot 13637 - 39006,25} = 0,01. \quad (15)$$

Найдем коэффициент a по формуле 16:

$$a = \frac{1}{n} \cdot \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} \cdot \sum x_i = \frac{1}{7} \cdot 37,47 - \frac{0,01}{7} \cdot 197,5 = 5,06. \quad (16)$$

Тогда уравнение (14) экспоненциальной регрессии, описывающее зависимость расстояния передачи данных от мощности передатчика, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = e^{5,06+0,01 \cdot x}.$$

Результаты экспериментов

В табл. 2 приведены средние ошибки аппроксимаций в процентном соотношении. На рис. 1 приведены графики исходной функции и функциональных зависимостей, полученных различными методами аппроксимации.

Для проверки адекватности полученных моделей и оценки значимости включённых в них параметров были рассчитаны основные статистические характеристики: коэффициент детерминации (R^2), t-статистики и соответствующие p-значения (p-value). Расчёты проводились с использованием инструмента «Регрессия» в Microsoft Excel на базе метода наименьших квадратов.

Анализ показал, что для линейной модели коэффициент детерминации составил $R^2 \approx 0,85$, что указывает на высокую долю объяснённой дисперсии зависимой переменной (расстояния передачи данных) мощностью передатчика. Для степенной модели, которая продемонстрировала наименьшую ошибку аппроксимации, значение R^2 превышает 0,91, что подтверждает её высокую объяснительную силу.

t-критерии для коэффициентов регрессий продемонстрировали, что все параметры моделей (включая свободные члены и коэффициенты при независимых переменных) являются статистически значимыми на уровне значимости $\alpha = 0,05$. Это означает, что вероятность случайного появления таких коэффициентов при отсутствии зависимости между переменными составляет менее 5 %.

Таким образом, полученные модели не только обеспечивают хорошее приближение экспериментальных данных, но и обладают статистической достоверностью. Это позволяет использовать их в инженерных расчётах и прикладных задачах проектирования систем беспроводной связи на базе технологии LoRa.

Для оценки степени связи между мощностью передатчика (факторной переменной) и расстоянием передачи данных (результатирующей переменной) был рассчитан коэффициент детерминации R^2 , который отражает долю дисперсии зависимой переменной, объясняемую моделью.

Для различных моделей значение R^2 варьировалось от 0,78 (экспоненциальная модель) до 0,91 (степенная модель). Наиболее высокий уровень связи был установлен для степенной регрессии, что подтверждает её лучшую аппроксимирующую способность по сравнению с остальными моделями. Значение $R^2 = 0,91$ означает, что 91 % изменчивости расстояния передачи данных объясняется изменениями мощности передатчика, что свидетельствует о высокой существенности взаимосвязи между переменными.

В табл. 2 представлены рассчитанные значения t-статистики для коэффициентов моделей. Они позволяют оценить, являются ли коэффициенты статистически значимыми при стандартном уровне значимости (обычно $\alpha = 0,05$). Значения $|t| > 2$ (приблизительно) свидетельствуют о значимости соответствующего коэффициента. В табл. 2 приведена оценка степени связи между результирующей и факторной переменными на основе коэффициента детерминации (R^2) и F-статистика для оценки значимости каждой регрессионной модели. Все модели показывают F-статистику, превышающую типовые критические значения F при уровне значимости 0,05 (например, $F_{\text{крит}} \approx 7,71$ для $df_1 = 1$, $df_2 = 4$), что указывает на статистическую значимость моделей в целом. Наиболее значимой оказалась степенная модель – $F = 40,44$.

Таблица 2
 Table 2

Статистические показатели качества моделей регрессии
 Statistical indicators of the quality of regression models

Регрессия	Коэффициент детерминации (R^2)	t-статистика	F-статистика
Линейная	0,85	4,57	22,67
Квадратичная	0,89	4,8	12,14
Кубическая	0,89	-3	5,39
Степенная	0,91	6,1	40,44
Показательная	0,78	1,8	14,18
Гиперболическая	0,77	-2,39	13,39
Логарифмическая	0,88	5,89	29,33
Экспоненциальная	0,78	1,9	14,18

Также была проведена проверка значимости связи с использованием F-критерия (F-теста), где нулевая гипотеза предполагает отсутствие связи между переменными. Полученные значения F-критерия оказались существенно выше критического уровня для соответствующей степени свободы, что позволило отвергнуть нулевую гипотезу и подтвердить статистическую значимость зависимости.

Таким образом, можно заключить, что между мощностью передатчика и расстоянием передачи существует статистически значимая и практически существенная связь, что обосновывает возможность использования построенных моделей в инженерной практике.

Таблица 3
 Table 3

Средняя ошибка различных методов аппроксимации
 Average error of various approximation methods

Метод аппроксимации	Средняя ошибка, %
Линейная регрессия	15,26
Квадратичная регрессия	9,89
Кубическая регрессия	9,89
Степенная регрессия	9,25
Показательная регрессия	19,44
Гиперболическая регрессия	19,66
Логарифмическая регрессия	10,12
Экспоненциальная регрессия	19,44

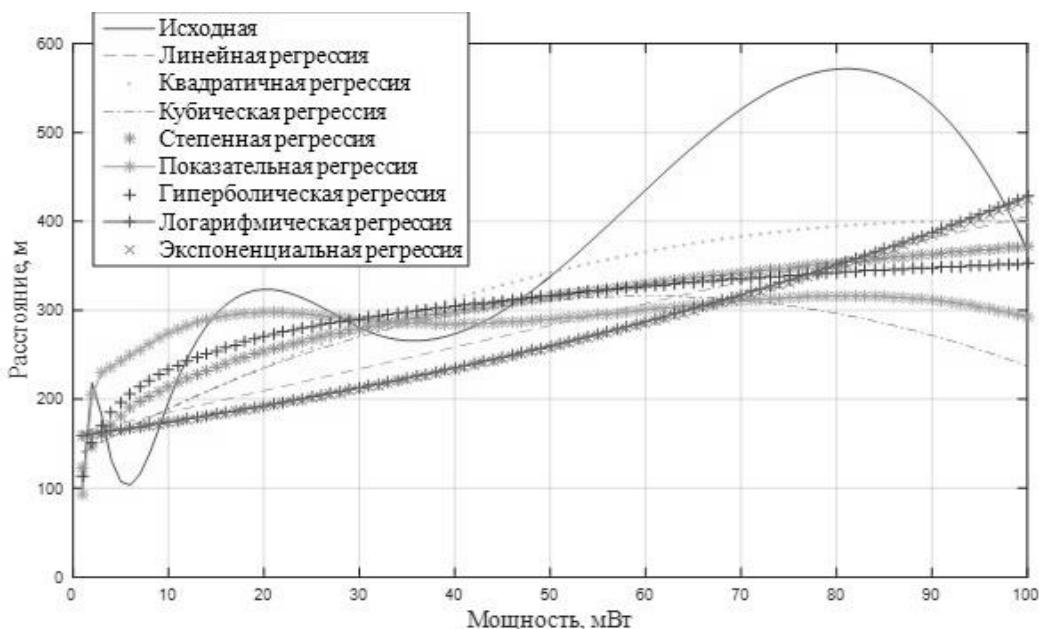


Рис. 1. График табличных экспериментальных значений и графики аппроксимированных функций
Fig. 1. Graph of tabular experimental values and graphs of approximated functions

Содержательный анализ полученных результатов

Полученные зависимости между мощностью передатчика и расстоянием передачи данных позволяют сделать ряд значимых выводов. Прежде всего, выявлена нелинейная природа связи между исследуемыми переменными. Линейная модель оказалась недостаточно точной (средняя ошибка 15,26 %), что указывает на ограниченность её применения при инженерных расчётах для беспроводной связи LoRa.

Наилучшие результаты продемонстрировала степенная модель, показавшая наименьшую ошибку аппроксимации (9,25 %). Это свидетельствует о том, что увеличение мощности передатчика приводит к росту расстояния передачи данных, однако данная зависимость характеризуется убывающей отдачей: на определённом этапе дополнительное увеличение мощности не приводит к существенному приросту расстояния. Данный эффект согласуется с физической природой распространения радиоволн в условиях затухания сигнала и поглощения в среде.

Модели второго и третьего порядка (квадратичная и кубическая) дали схожие результаты по точности, что указывает на возможность описания зависимости полиномами, однако они уступают степенной модели по интерпретируемости и устойчивости при экстраполяции.

Наименее точными оказались гиперболическая, показательная и экспоненциальная регрессии, что может быть связано с тем, что данные модели плохо отражают реальные условия распространения сигнала в сложных промышленных и подземных средах, где присутствуют многолучевость, отражения и затухание.

Результаты аппроксимации согласуются с практическими наблюдениями и техническими характеристиками оборудования LoRa. Выбор адекватной модели важен не только с точки зрения точности, но и для построения инженерных моделей, используемых в системах управления горной техникой, где необходимо заранее рассчитывать зоны надёжной связи при ограничениях по потреблению энергии.

Дополнительно можно отметить, что модели были оценены на небольшом наборе экспериментальных точек. Это требует аккуратного подхода к интерпретации результатов за пределами экспериментального диапазона. Для повышения обобщающей способности моделей в дальнейшем рекомендуется проведение повторных экспериментов в различных средах и условиях, а также использование методов перекрёстной проверки и построение доверительных интервалов для предсказаний.

Заключение

Исходя из табл. 3 и графиков, представленных на рис. 1, можно сделать вывод, что наиболее точным методом аппроксимации зависимости расстояния от мощности передатчика является степенная регрессия.

Основной задачей исследования является установление функциональной зависимости между мощностью передатчика и расстоянием передачи данных на основе экспериментальных точек, полученных в однородных условиях. Следует отметить, что в рамках настоящей статьи не проводился анализ ошибки обобщения, связанной с переносом полученной модели на новые данные или иные условия эксплуатации. Вопросы оценки обобщающей способности модели, включая методы перекрёстной проверки и построение доверительных интервалов, предполагается рассмотреть в дальнейших исследованиях.

Таким образом, в ходе проведения исследований были выявлены зависимости между мощностью передатчика и расстоянием передачи данных. Получены функциональные описания этих зависимостей различными методами аппроксимации экспериментальных данных, вычислены ошибки регрессии в процентном соотношении. Выделены наиболее точные методы аппроксимации данных, полученных в результате эксперимента. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации беспроводных систем управления, особенно в условиях ограниченной видимости и труднодоступных производственных зонах, где критически важны надёжность и дальность связи. В дальнейшем планируется проведение дополнительных исследований в различных средах распространения сигнала для расширения применимости полученных выводов.

Список литературы

- Малышева Т.А. 2016. Численные методы и компьютерное моделирование. Лабораторный практикум по аппроксимации функций. Учебно-методическое пособие. СПб.: Университет ИТМО, 33.
- Межетов М.А., Тихова А.И., Вахрушева У.С., Федоров А.В. 2021. Применение технологии LoRa в беспилотных авиационных системах. Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Иркутск, 14–15 октября 2021 года. Том 2. Иркутск: Иркутский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации». 180–185. EDN UZUCLT.
- Наумов М.А., Карповский А.Ю. 2024. Разработка и исследование стенда для проверки беспроводной радиосвязи LoRa. Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием Инженеры настоящего и будущего: практика и перспективы развития партнерства в высшем техническом образовании. Таганрог. Т. 2. 330–336.
- Наумов М.А., Карповский А.Ю., Казаков В.В. 2024. Разработка системы управления машина и механизмами с применением беспроводной технологии связи LoRa. Сборник научных трудов XXIV Международной научно-технической конференции Автоматизация Технологических процессов. Поиск молодых. Донецк. 123–126.
- Обзор технологии LoRa. URL: <https://itechinfo.ru/node/46> (дата обращения: 01.11.2024).
- Пономарев А.Б., Пикулева Э.А. 2014. Методология научных исследований: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 186.
- Шестакович В.П. 2012. Основы численных методов: учеб.-метод. пособие. Минск: БГУИР, 68.
- Attia T., Heusse M., Tourancheau B., Duda A. 2019. Experimental Characterization of LoRaWAN Link Quality. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Dec 2019, Waikoloa, United States. fffhal-02316402. URL: [https://hal.science/hal-02316402/document].
- Baruffa G. et al. 2020. Error probability performance of chirp modulation in uncoded and coded LoRa systems. *Digital Signal Processing*, 106: 102828.
- IoT Communication Protocols–Network Protocols Ignacio de Mendizábal. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/internet-of-communication-communication-protocols-network-protocols/> (дата обращения: 01.11.2024).
- Liando J.C. et al. 2019. Known and unknown facts of LoRa: Experiences from a large-scale measurement study. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 15(2): 1–35.

- Naumov M.A., Karpovsky A.Yu. 2024. Development of a control system for machines and mechanisms using lora wireless communication technology. Сборник материалов научно-практической конференции для преподавателей гуманитарных дисциплин Young scientists' researches and achievements in science. Донецк. 281–289.
- Performance line, ARM-based 32-bit MCU with Flash, USB, CAN, seven 16-bit timers, two ADCs and nine communication interfaces. URL: <http://inverter48.ru/datasheet/mcu/STM32F103C8T6.pdf?ysclid=m2swy5p2eh408905702>
- Robyns P. et al. 2018. A Multi-Channel Software Decoder for the LoRa Modulation Scheme. IoT BDS. 41–51.
- Sornin N., Luis M., Eirich T., Kramp T., Herset O. 2015. LoRaWAN Specification V1.0. URL: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/2015_-_lorawan_specification_1r0_611_1.pdf.
- SX1276/77/78/79 – 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver URL: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/SX1278%20Lora%20Datasheet.pdf
- Tapparel J. 2019. Complete reverse engineering of LoRa PHY. Tech. Rep.
- Tapparel J. et al. 2020. An open-source LoRa physical layer prototype on GNU radio. 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE. 1–5.
- Van den Abeele F. et al. 2017. Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3. IEEE Internet of Things Journal. 4(6): 2186–2198.
- Xu Z. et al. 2023. From Demodulation to Decoding: Toward Complete LoRa PHY Understanding and Implementation. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 18(4): 1–27.

References

- Malysheva T.A. 2016. Numerical methods and computer modeling. Laboratory workshop on function approximation. Educational and methodical manual. St. Petersburg: ITMO University, 33.
- Mezhetov M.A., Tikhova A.I., Vakhrusheva U.S., Fedorov A.V. 2021. Application of LoRa technology in unmanned aircraft systems. Actual problems and prospects of civil aviation development: proceedings of the X International Scientific and Practical Conference, Irkutsk, October 14–15, 2021. Volume 2. Irkutsk: Irkutsk Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 180–185. EDN UZUCLT.
- Naumov M.A. Karpovsky A.Y. 2024. Development and research of a stand for testing LoRa wireless radio communications. Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and practical conference with international participation Engineers of the present and future: practice and prospects for partnership development in higher technical education. Taganrog. Vol. 2 330–336.
- Naumov M.A., Karpovsky A.Y., Kazakov V.V. 2024. Development of a machine and mechanism control system using LoRa wireless communication technology. Collection of scientific papers of the XXIV International Scientific and Technical Conference Automation of Technological Processes. Search for Young People. Donetsk, 123–126.
- Overview of LoRa technology. URL: <https://itechinfo.ru/node/46> (date access: 11/01/2024).
- Ponomarev A.B., Pikuleva E.A. 2014. Methodology of scientific research: textbook. manual. Perm: Publishing House of the Perm National University. research. Polytechnic University. University, 186.
- Shestakovich V.P. 2012. Fundamentals of numerical methods: textbook. the method. Manual. Minsk: BGUIR, 68.
- Attia T., Heusse M., Tourancheau B., Duda A. 2019. Experimental Characterization of LoRaWAN Link Quality. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Dec 2019, Waikoloa, United States. fffal-02316402. URL: [<https://hal.science/hal-02316402/document>].
- Baruffa G. et al. 2020. Error probability performance of chirp modulation in uncoded and coded LoRa systems. *Digital Signal Processing*, 106: 102828.
- IoT Communication Protocols-Network Protocols Ignacio de Mendizábal. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/internet-of-communication-communication-protocols-network-protocols/> (date access: 11/01/2024).
- Liando J.C. et al. 2019. Known and unknown facts of LoRa: Experiences from a large-scale measurement study. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 15(2): 1–35.
- Naumov M.A., Karpovsky A.Yu. 2024. Development of a control system for machines and mechanisms using lora wireless communication technology. Collection of scientific papers of the XXIV International Scientific and Technical Conference Automation of Technological Processes. Search for Young People. Donetsk. 281–289.
- Performance line, ARM-based 32-bit MCU with Flash, USB, CAN, seven 16-bit timers, two ADCs and nine communication interfaces. URL: <http://inverter48.ru/datasheet/mcu/STM32F103C8T6.pdf?ysclid=m2swy5p2eh408905702>

- Robyns P. et al. 2018. A Multi-Channel Software Decoder for the LoRa Modulation Scheme. IoTBDS. 41–51.
- Sornin N., Luis M., Eirich T., Kramp T., Hersent O. 2015. LoRaWAN Specification V1.0. URL: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/2015_-_lorawan_specification_1r0_611_1.pdf.
- SX1276/77/78/79 – 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver URL: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/SX1278%20Lora%20Datasheet.pdf
- Tapparel J. 2019. Complete reverse engineering of LoRa PHY. Tech. Rep.
- Tapparel J. et al. 2020. An open-source LoRa physical layer prototype on GNU radio. 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE. 1–5.
- Van den Abeele F. et al. 2017. Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3. IEEE Internet of Things Journal. 4(6): 2186–2198.
- Xu Z. et al. 2023. From Demodulation to Decoding: Toward Complete LoRa PHY Understanding and Implementation. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 18(4): 1–27.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 12.09.2025

Received September 12, 2025

Поступила после рецензирования 28.11.2025

Revised November 28, 2025

Принята к публикации 02.12.2025

Accepted December 02, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Наумов Максим Александрович, младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела автоматизации горных машин, ГБУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова»; аспирант кафедры автоматизации и телекоммуникаций, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР, Россия

Карповский Артур Юрьевич, заведующий научно-исследовательским отделом автоматизации горных машин, ГБУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова» г. Донецк, ДНР, Россия

Курносов Вячеслав Григорьевич, доктор технических наук, профессор, первый заместитель директора по научной работе, ГБУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», г. Донецк, ДНР, Россия

Андрусенко Сергей Николаевич, главный конструктор проекта отдела автоматизации горных машин, ГБУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», г. Донецк, ДНР, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maxim A. Naumov, Junior Researcher of the Scientific Research Department of Mining Machinery Automation, “GBU “Automatgormash named after V.A. Antipov”, Postgraduate Student of the Department of Automation and Telecommunications, Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR, Russia

Artur Yu. Karpovsky, Head of the Scientific Research Department of Mining Machinery Automation, “GBU “Automatgormash named after V.A. Antipov”, Donetsk, DPR, Russia

Vyacheslav G. Kurnosov, Doctor of Technical Sciences, Professor, First Deputy Director for Scientific Work, “GBU “Automatgormash named after V.A. Antipov”, Donetsk, DPR, Russia

Sergey N. Andrusenko, Chief Project Designer of the Scientific Research Department of Mining Machinery Automation, “GBU “Automatgormash named after V.A. Antipov”, Donetsk, DPR, Russia