



УДК 654.937

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ НА РАССТОЯНИЕ, ВРЕМЯ И СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ LORA

Наумов М.А., Карповский А.Ю., Курносков В.Г.

ГУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова»



Информация о статье

Поступила:
15 августа 2024 г.

Рецензирование:
30 октября 2024 г.

Принята к печати:
25 ноября 2024 г.

Ключевые слова:

аппроксимация, коэффициент распространения, передача данных, регрессия, дистанционное управление, радиосвязь, технология LoRa.

Аннотация.

Оснащение горно-шахтного оборудования системами дистанционного управления требует применения новых средств и технологий беспроводной связи. Особенности использования новых устройств в подземных выработках шахт требуют изучения степени влияния специфических факторов среды на основные параметры системы: дальность, скорость передачи, быстродействие, помехоустойчивость, надежность. Поэтому данная статья посвящена актуальной тематике. Целью работы было изучение влияния коэффициента распространения на расстояние, время и скорость передачи данных по беспроводной связи LoRa. В результате установлены зависимости между коэффициентом распространения и расстоянием передачи данных, временем передачи посылки, а также скоростью передачи. 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.

Для цитирования: Наумов М.А., Карповский А.Ю., Курносков В.Г. Изучение влияния коэффициента распространения на расстояние, время и скорость передачи данных по беспроводной связи LoRa // Техника и технология горного дела. – 2024. – № 4(27). – С. 30-46. – DOI: 10.26730/2618-7434-2024-4-30-46

Введение

Организация радиоуправления является классической задачей при проектировании систем управления подвижными машинами и механизмами, в частности дистанционным управлением проходческими и добычными комбайнами для создания высокотехнологичной продукции в соответствии со Стратегией научно-технологического развития [1]. В горно-шахтном оборудовании, в том числе и при автоматизации очистных комбайнов (машин для выемки пластовых полезных ископаемых) подсистема радиоуправления, рассматриваемая в источнике [2], должна обеспечивать выполнение своих функций, как в зоне видимости комбайна, так и за ее пределами. Увеличение дальности радиоуправления является особо важным параметром, который позволяет повысить безопасность ведения работ по выемке угольных масс с учетом минимизации присутствия человека в опасной зоне. В тоже время система должна быть надежной и иметь высокое быстродействие [3]. Новым решением на рынке радиосвязи выступает технология LoRa [4-8].

В ходе проведения исследований был осуществлен эксперимент с использованием стенда [9-10], по результатам которого будем проводить необходимый анализ для изучения влияния коэффициента распространения на качество беспроводной связи LoRa. В Таблице 1 приведены результаты работы модуля LoRa SX1278 [11] в связке с микроконтроллером stm32f103c8t6 [12] при различных отношениях сигнал/шум и коэффициентах расширения спектра.



Таблица 1. Результаты проведения экспериментов
Table 1. Results of the experiments

Коэффициент распространения	Расстояние, м	Время передачи, мс	Скорость, Байт/с	RSSI, dBm	Отношение сигнал/шум, dB
7	300	111	9,01	-113,36	2,64
8	318	202	4,95	-112,79	2,28
9	406	363	2,76	-114,61	4,3
10	583	725	1,38	-104,73	3,52
11	611	1450	0,69	-109,83	3,38
12	993	2573	0,39	-128,06	4,3

На Рис. 1 приведен график зависимости расстояния передачи данных от коэффициента распространения (а), график зависимости времени (в мс) передачи данных от коэффициента распространения (б) и график зависимости скорости (в Байт/с) передачи данных от коэффициента распространения (в).

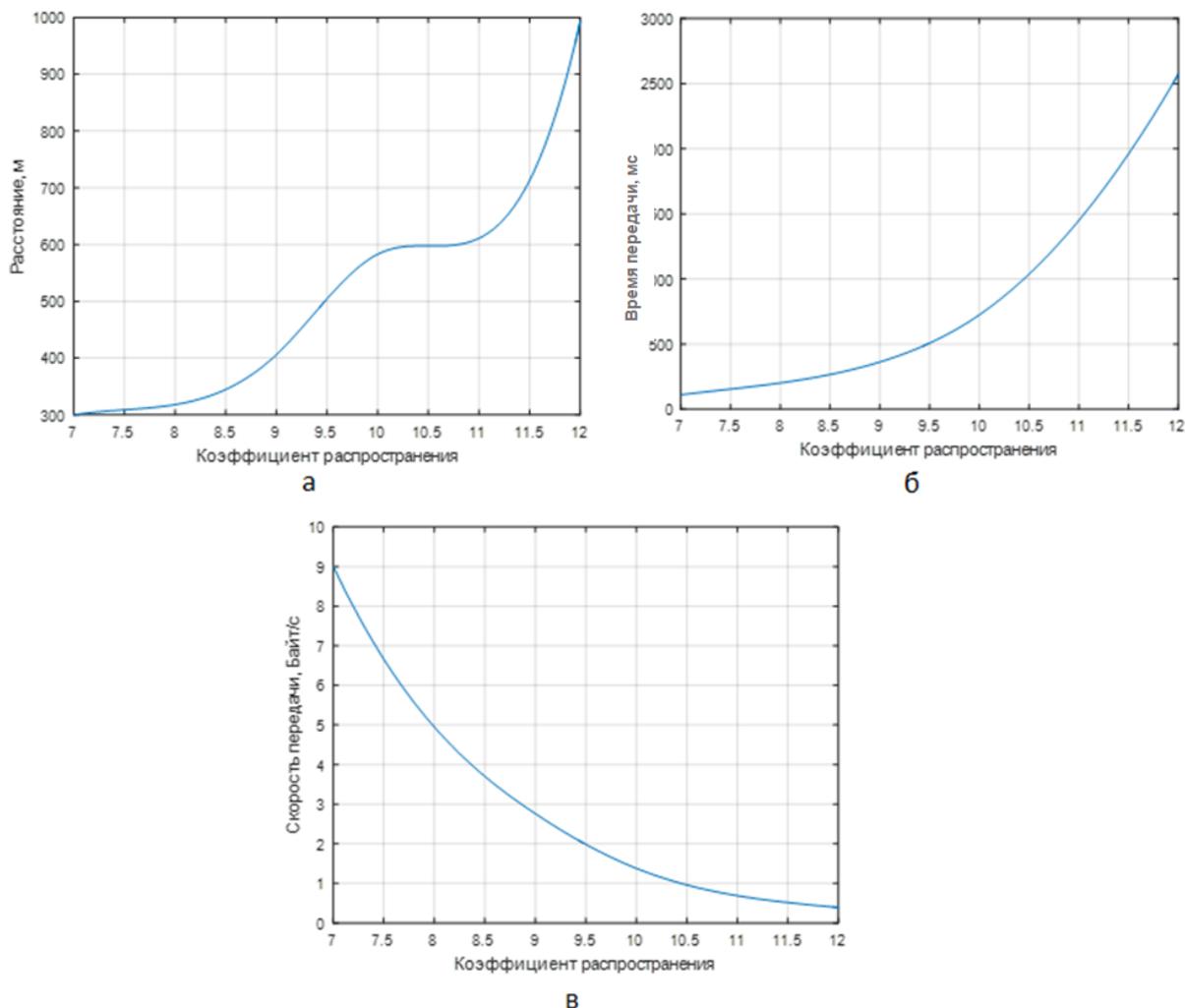


Рис. 1. График зависимости расстояния передачи данных (а), времени передачи данных (б) и скорости (в Байт/с) передачи данных (в) от коэффициента распространения
Fig. 1. Graph of the dependence of the data transmission distance (a), data transmission time (b) and speed (in Bytes/s) of data transmission (c) on the propagation coefficient

Графики, представленные на Рис. 1, построены по табличным экспериментальным значениям. В ходе исследования в открытых источниках информации не было найдено



функциональных зависимостей, описывающих закон, по которым изменяются переменные расстояния, времени и скорости передачи данных по беспроводной связи LoRa. Для выведения функциональных зависимостей из табличных значений воспользуемся аппроксимацией в соответствии с [13-14].

Аппроксимация зависимости расстояния передачи данных от коэффициента распространения.

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1 (а) с помощью линейной регрессии (формула 1).

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

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициент a по формуле 2.

$$a = \frac{\sum x_i * \sum y_i - n * \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n * \sum x_i^2} = \frac{57 * 3211 - 6 * 32765}{57^2 - 6 * 559} = 129,17 \quad (2)$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Найдем коэффициент b по формуле 3.

$$b = \frac{\sum x * \sum x y - \sum x * \sum y}{(\sum x) - n * \sum x} = \frac{53 * 19002 - 639 * 2266}{53 - 6 * 639} = 430,12 \quad (3)$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

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

$$\hat{y} = 129,17 * x - 691,96$$

Среднюю ошибку аппроксимаций будем находить по формуле 4.

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

где \hat{y} – аппроксимированное значение расстояния передачи данных; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (а), с помощью квадратичной регрессии.

Уравнение квадратичной регрессии показано на формуле 5.

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

где x – коэффициент распространения;

y – расстояние передачи данных.

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

$$\begin{cases} a * \sum x_i^2 + b * \sum x_i + n * c = \sum y_i \\ a * \sum x_i^3 + b * \sum x_i^2 + \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a * \sum x_i^4 + b * \sum x_i^3 + \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \end{cases} = \begin{cases} a * 559 + b * 57 + 6 * c = 3211 \\ a * 5643 + b * 559 + c * 57 = 32765 \\ a * 58435 + b * 5643 + c * 559 = 225106 \end{cases} = \begin{cases} a = 28,21 \\ b = 406,9 \\ c = 1772,09 \end{cases}$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.



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

$$\hat{y} = 28.21 * x^2 + 406.9 * x + 1772,09$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (а), с помощью кубической регрессии. Уравнение кубической регрессии показано на формуле 6.

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

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных.

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

$$\begin{cases} a * \sum x_i^3 + b * \sum x_i^2 + c * \sum x_i + n * d = \sum y_i \\ a * \sum x_i^4 + b * \sum x_i^3 + c * \sum x_i^2 + d * \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a * \sum x_i^5 + b * \sum x_i^4 + c * \sum x_i^3 + d * \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \\ a * \sum x_i^6 + b * \sum x_i^5 + c * \sum x_i^4 + d * \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i \end{cases} = \begin{cases} a * 5643 + b * 559 + c * 57 + 6 * d = 3211 \\ a * 58435 + b * 5643 + c * 559 + d * 57 = 32765 \\ a * 618507 + b * 58435 + c * 5643 + d * 559 = 343161 \\ a * 6668779 + b * 618507 + c * 58435 + d * 5643 = 3673835 \end{cases} =$$

$$\begin{cases} a = 6,54 \\ b = -158,09 \\ c = 1329,99 \\ d = -3518,99 \end{cases}$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

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

$$\hat{y} = 6,54 * x^3 - 158,09 * x^2 + 1329,99 * x - 3518,99$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (а), с помощью степенной регрессии. Уравнение степенной регрессии показано на формуле 7.

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

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициент b :

$$b = \frac{n * \sum (\ln(x_i) * \ln(y_i)) - \sum \ln(x_i) * \sum \ln(y_i)}{n * \sum \ln^2(x_i) - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{6 * 83,47 - 13,41 * 37,16}{6 * 179,78 - 179,78} = 2,17$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Найдем коэффициент a :

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} * \sum \ln(x_i)\right) = \exp\left(\frac{1}{6} * 37,16 - \frac{2,17}{6} * 13,41\right) = 3,82$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

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



$$\hat{y} = 3,82 * x^{2,17}$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (а), с помощью показательной регрессии.

Уравнение показательной регрессии показано на формуле 8.

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

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициент b :

$$b = \exp\left(\frac{n * \sum(x_i * \ln(y_i)) - \sum x_i * \sum \ln(y_i)}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}\right) = \exp\left(\frac{6 * 357,14 - 57 * 37,16}{6 * 559 - 3249}\right) = 1,27$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Найдем коэффициент a :

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{\ln(b)}{n} * \sum x_i\right) = \exp\left(\frac{1}{6} * 37,16 - \frac{0,24}{6} * 57\right) = 51,33$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

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

$$\hat{y} = 51,33 * 1,27^x$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (а), с помощью гиперболической регрессии.

Уравнение гиперболической регрессии показано на формуле 9.

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

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициент b по формуле 10.

$$b = \frac{n * \sum \frac{y_i}{x_i} - \sum \frac{1}{x_i} * \sum y_i}{n * \sum \frac{1}{x_i^2} - (\sum \frac{1}{x_i})^2} = \frac{6 * 324,31 - 0,65 * 3211}{6 * 0,07 - 0,42} = -10212,51 \quad (10)$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Найдем коэффициент a по формуле 11.

$$a = \frac{1}{n} * \sum y_i - \frac{b}{n} * \sum \frac{1}{x_i} = \frac{1}{6} * 3211 + \frac{10212,51}{6} * 0,65 = 1646,99 \quad (11)$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

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



$$\hat{y} = 1646,99 - \frac{10212,51}{x}$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (а), с помощью логарифмической регрессии.

Уравнение логарифмической регрессии показано на формуле 12.

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

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициент b :

$$b = \frac{n * \sum(y_i * \ln(x_i)) - \sum \ln(x_i) * \sum y_i}{n * \sum \ln^2(x_i) - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{6 * 7412,1 - 13,41 * 3211}{6 * 179,83 - 179,83} = 1167,17$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Найдем коэффициент a по формуле 13.

$$a = \frac{1}{n} * \sum y_i - \frac{b}{n} * \sum \ln(x_i) = \frac{1}{6} * 3211 - \frac{1167,17}{6} * 13,41 = -2073,05 \quad (13)$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

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

$$\hat{y} = -2073,05 + 1167,17 * \ln(x)$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (а), с помощью экспоненциальной регрессии.

Уравнение экспоненциальной регрессии показано на формуле 14.

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

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициент b по формуле 15.

$$b = \frac{n * \sum(x_i * \ln(y_i)) - \sum \ln(y_i) * \sum x_i}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{6 * 357,14 - 37,16 * 57}{6 * 559 - 3249} = 0,24 \quad (15)$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Найдем коэффициент a по формуле 16.

$$a = \frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} * \sum x_i = \frac{1}{6} * 37,16 - \frac{0,24}{6} * 57 = 6,2 - 2,28 = 3,94 \quad (16)$$

где x – коэффициент распространения; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Тогда уравнение (20) экспоненциальной регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от расстояния передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = e^{3,94+0,24*x}$$



В Таблице 2 приведены средние ошибки аппроксимаций в процентном соотношении в соответствии с [15]. На Рис. 2 приведены график исходной функции и функциональных зависимостей, полученных различными методами аппроксимации.

Таблица 2. Средняя ошибка различных методов аппроксимации
Table 2. Average error of various approximation methods

Метод аппроксимации	Средняя ошибка, %
Линейная регрессия	14,71
Квадратичная регрессия	6,09
Кубическая регрессия	7,06
Степенная регрессия	10,97
Показательная регрессия	9,22
Гиперболическая регрессия	20,79
Логарифмическая регрессия	17,86
Экспоненциальная регрессия	9,22

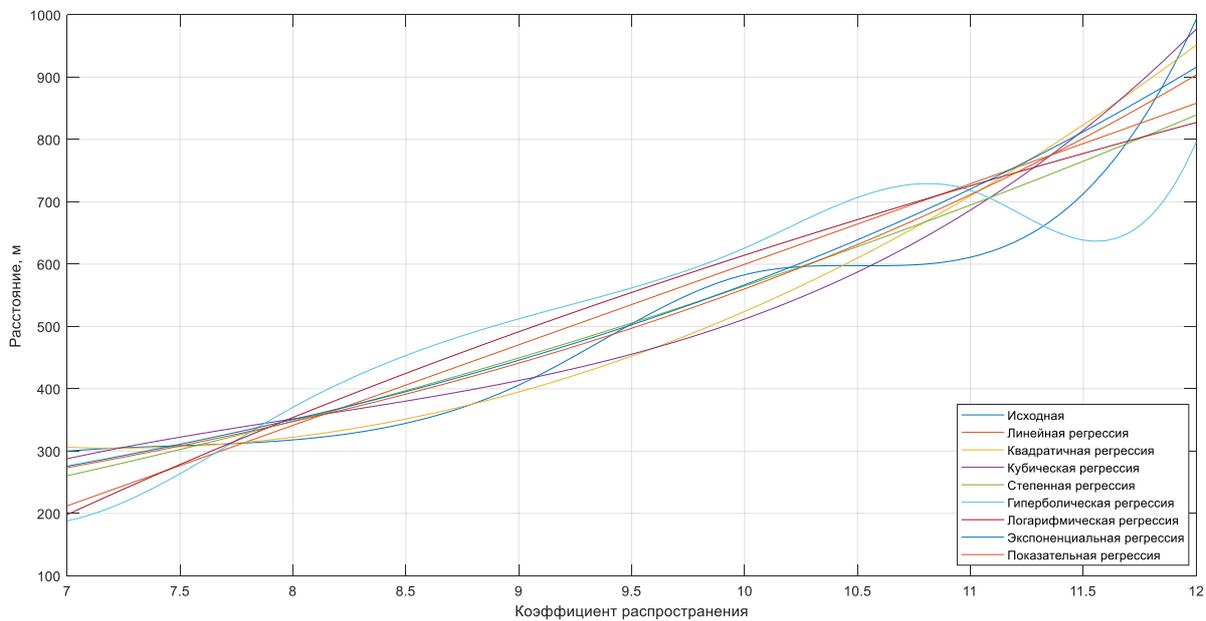


Рис. 2. График табличных экспериментальных значений и графики аппроксимированных функций расстояния в зависимости от коэффициента распространения

Fig. 2. A graph of tabular experimental values and graphs of approximated distance functions depending on the propagation coefficient

Аппроксимация зависимости времени передачи данных от коэффициента распространения. Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (б), с помощью линейной регрессии. Уравнение линейной регрессии показано на формуле 1.

Найдем коэффициент а по формуле 2.

$$a = \frac{\sum x_i * \sum y_i - n * \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n * \sum x_i^2} = \frac{57 * 5424 - 6 * 59736}{57^2 - 6 * 559} = 469,03$$

Найдем коэффициент b по формуле 3:

$$b = \frac{\sum x_i * \sum x_i y_i - \sum x_i^2 * \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n * \sum x_i^2} = \frac{57 * 59736 - 559 * 5424}{57^2 - 6 * 559} = -3551,77$$



Тогда уравнение (1) линейной регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от времени передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 469,03 * x - 3551,77$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (б), с помощью квадратичной регрессии. Уравнение кубической регрессии показано на формуле 5.

Найдем коэффициенты а, b и с с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} a * \sum x_i^2 + b * \sum x_i + n * c = \sum y_i \\ a * \sum x_i^3 + b * \sum x_i^2 + \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a * \sum x_i^4 + b * \sum x_i^3 + \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \end{cases} = \begin{cases} a * 559 + b * 57 + 6 * c = 5424 \\ a * 5643 + b * 559 + c * 57 = 59736 \\ a * 58435 + b * 5643 + c * 559 = 666232 \end{cases} = \begin{cases} a = 132,43 \\ b = -2047,11 \\ c = 8013,66 \end{cases}$$

Тогда уравнение (5) квадратичной регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от времени передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 132,43 * x^2 - 2047,11 * x + 8013,66$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (б), с помощью кубической регрессии. Уравнение кубической регрессии показано на формуле 6.

Найдем коэффициенты а, b, с и d с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} a * \sum x_i^3 + b * \sum x_i^2 + c * \sum x_i + n * d = \sum y_i \\ a * \sum x_i^4 + b * \sum x_i^3 + \sum x_i^2 + \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a * \sum x_i^5 + b * \sum x_i^4 + \sum x_i^3 + \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \\ a * \sum x_i^6 + b * \sum x_i^5 + \sum x_i^4 + \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i \end{cases} = \begin{cases} a * 5643 + b * 559 + c * 57 + 6 * d = 5424 \\ a * 58435 + b * 5643 + c * 559 + d * 57 = 59736 \\ a * 618507 + b * 58435 + c * 5643 + d * 559 = 666232 \\ a * 6668779 + b * 618507 + c * 58435 + d * 5643 = 7507218 \end{cases} = \begin{cases} a = 19,69 \\ b = -428,6 \\ c = 3183,24 \\ d = -7919,53 \end{cases}$$

Тогда уравнение (6) кубической регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от времени передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 19,69 * x^3 - 428,6 * x^2 + 3183,24 * x - 7919,53$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (б), с помощью степенной регрессии. Уравнение степенной регрессии показано на формуле 8.

Найдем коэффициент b:

$$b = \frac{n * \sum (\ln(x_i) * \ln(y_i)) - \sum \ln(x_i) * \sum \ln(y_i)}{n * \sum \ln^2(x_i) - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{6 * 85,29 - 13,41 * 37,63}{6 * 30,17 - 179,78} = 5,9$$

Найдем коэффициент а:

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} * \sum \ln(x_i)\right) = \exp\left(\frac{1}{6} * 37,63 - \frac{5,9}{6} * 13,41\right) = 0,0001$$

Тогда уравнение (7) степенной регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от времени передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 0,0001 * x^{5,9}$$



Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (б), с помощью показательной регрессии. Уравнение показательной регрессии показано на формуле 8.

Найдем коэффициент b :

$$b = \exp\left(\frac{n * \sum(x_i * \ln(y_i)) - \sum x_i * \sum \ln(y_i)}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}\right) = \exp\left(\frac{6 * 368,65 - 57 * 37,63}{6 * 559 - 3249}\right) = 1,89$$

Найдем коэффициент a :

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{\ln(b)}{n} * \sum x_i\right) = \exp\left(\frac{1}{6} * 37,63 - \frac{0,64}{6} * 57\right) = 1,24$$

Тогда уравнение (8) показательной регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от времени передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 1,24 * 1,89^x$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (б), с помощью гиперболической регрессии. Уравнение гиперболической регрессии показано на формуле 9.

Найдем коэффициент b по формуле 10.

$$b = \frac{n * \sum \frac{y_i}{x_i} - \sum \frac{1}{x_i} * \sum y_i}{n * \sum \frac{1}{x_i^2} - (\sum \frac{1}{x_i})^2} = \frac{6 * 500,18 - 0,65 * 5424}{6 * 0,07 - 0,42} = -36514,73$$

Найдем коэффициент a по формуле 11.

$$a = \frac{1}{n} * \sum y_i - \frac{b}{n} * \sum \frac{1}{x_i} = \frac{1}{6} * 5424 + \frac{36514,73}{6} * 0,65 = 4879,3$$

Тогда уравнение (9) гиперболической регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от времени передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 4879,3 - \frac{36514,73}{x}$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (б), с помощью логарифмической регрессии. Уравнение логарифмической регрессии показано на формуле 12.

Найдем коэффициент b :

$$b = \frac{n * \sum(y_i * \ln(x_i)) - \sum \ln(x_i) * \sum y_i}{n * \sum \ln^2(x_i) - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{6 * 12974 - 31,41 * 5424}{6 * 179,83 - 179,83} = 4206,21$$

Найдем коэффициент a по формуле 13.

$$a = \frac{1}{n} * \sum y_i - \frac{b}{n} * \sum \ln(x_i) = \frac{1}{6} * 5424 - \frac{4206,21}{6} * 13,41 = -8495,45$$

Тогда уравнение (12) логарифмической регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от времени передачи данных, будет выглядеть следующим образом:



$$\hat{y} = 8495,45 + 4206,21 * \ln(x)$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (б), с помощью экспоненциальной регрессии. Уравнение экспоненциальной регрессии показано на формуле 14.

Найдем коэффициент b по формуле 15.

$$b = \frac{n * \sum(x_i * \ln(y_i)) - \sum \ln(y_i) * \sum x_i}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{6 * 368,65 - 37,63 * 57}{6 * 559 - 3243} = 0,64$$

Найдем коэффициент a по формуле 16.

$$a = \frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} * \sum x_i = \frac{1}{6} * 37,63 - \frac{0,64}{6} * 57 = 0,21$$

Тогда уравнение (14) экспоненциальной регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от времени передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = e^{0,19+0,64*x}$$

В Таблице 3 приведены средние ошибки аппроксимаций в процентном соотношении. На Рис. 3 приведены график исходной функции и функциональных зависимостей, полученных различными методами аппроксимации.

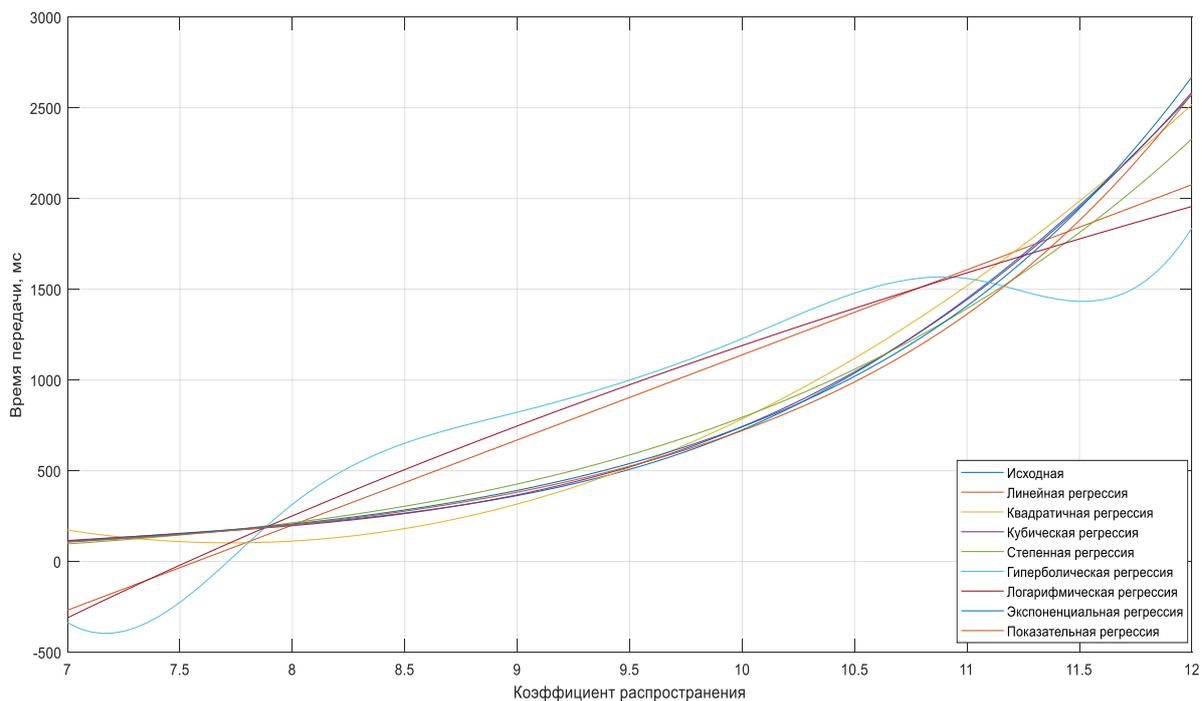


Рис. 3. График табличных экспериментальных значений и графики аппроксимированных функций времени передачи в зависимости от коэффициента распространения

Fig. 3. A graph of tabular experimental values and graphs of approximated transmission time functions depending on the expansion coefficient



Таблица 3. Средняя ошибка различных методов аппроксимации
Table 3. Average error of various approximation methods

Метод аппроксимации	Средняя ошибка, %
Линейная регрессия	85,72
Квадратичная регрессия	21,38
Кубическая регрессия	1,52
Степенная регрессия	9,72
Показательная регрессия	2,77
Гиперболическая регрессия	115,27
Логарифмическая регрессия	101,25
Экспоненциальная регрессия	2,77

Аппроксимация зависимости скорости передачи данных от коэффициента распространения.

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (в), с помощью линейной регрессии. Уравнение линейной регрессии показано на формуле 1.

Найдем коэффициент а по формуле 2.

$$a = \frac{\sum x_i * \sum y_i - n * \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n * \sum x_i^2} = \frac{57 * 19,18 - 6 * 153,58}{57^2 - 6 * 559} = -1,64$$

Найдем коэффициент b по формуле 3.

$$b = \frac{\sum x_i * \sum x_i y_i - \sum x_i^2 * \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n * \sum x_i^2} = \frac{57 * 153,58 - 559 * 19,18}{57^2 - 6 * 559} = 18,74$$

Тогда уравнение (1) линейной регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от скорости передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = -1,64 * x + 18,74$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (в), с помощью квадратичной регрессии. Уравнение квадратичной регрессии показано на формуле 5.

Найдем коэффициенты а, b и с с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} a * \sum x_i^2 + b * \sum x_i + n * c = \sum y_i \\ a * \sum x_i^3 + b * \sum x_i^2 + \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a * \sum x_i^4 + b * \sum x_i^3 + \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \end{cases} = \begin{cases} a * 559 + b * 57 + 6 * c = 19,18 \\ a * 5643 + b * 559 + c * 57 = 153,58 \\ a * 58435 + b * 5643 + c * 559 = 1259,5 \end{cases} = \begin{cases} a = 0,44 \\ b = -10,05 \\ c = 57,42 \end{cases}$$

Тогда уравнение (5) квадратичной регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от скорости передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 0,44 * x^2 - 10,05 * x + 57,42$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (в), с помощью кубической регрессии. Уравнение кубической регрессии показано на формуле 6.

Найдем коэффициенты а, b, с и d с помощью системы уравнений:



$$\begin{cases} a * \sum x_i^3 + b * \sum x_i^2 + c * \sum x_i + n * d = \sum y_i \\ a * \sum x_i^4 + b * \sum x_i^3 + \sum x_i^2 + \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a * \sum x_i^5 + b * \sum x_i^4 + \sum x_i^3 + \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \\ a * \sum x_i^6 + b * \sum x_i^5 + \sum x_i^4 + \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i \end{cases} = \begin{cases} a * 5643 + b * 559 + c * 57 + 6 * d = 19,18 \\ a * 58435 + b * 5643 + c * 559 + d * 57 = 153,58 \\ a * 618507 + b * 58435 + c * 5643 + d * 559 = 1259,5 \\ a * 6668779 + b * 618507 + c * 58435 + d * 5643 = 10609 \end{cases} =$$

$$= \begin{cases} a = -0,07 \\ b = 2,49 \\ c = -29,14 \\ d = 115,57 \end{cases}$$

Тогда уравнение (6) кубической регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от скорости передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = -0,07 * x^3 + 2,49 * x^2 - 29,14 * x + 115,57$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (в), с помощью степенной регрессии. Уравнение степенной регрессии показано на формуле 7.

Найдем коэффициент b:

$$b = \frac{n * \sum (\ln(x_i) * \ln(y_i)) - \sum \ln(x_i) * \sum \ln(y_i)}{n * \sum \ln^2(x_i) - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{6 * 85,29 - 13,41 * 37,63}{6 * 30,17 - 179,78} = 5,9$$

Найдем коэффициент a:

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} * \sum \ln(x_i)\right) = \exp\left(\frac{1}{6} * 37,63 + \frac{5,9}{6} * 13,41\right) = 996270,15$$

Тогда уравнение (7) степенной регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от времени передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 996270,15 * x^{-5,9}$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (в), с помощью показательной регрессии. Уравнение показательной регрессии показано на формуле 8.

Найдем коэффициент b:

$$b = \exp\left(\frac{n * \sum (x_i * \ln(y_i)) - \sum x_i * \sum \ln(y_i)}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}\right) = \exp\left(\frac{6 * 25,16 - 57 * 3,82}{6 * 559 - 3249}\right) = 0,53.$$

Найдем коэффициент a:

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{\ln(b)}{n} * \sum x_i\right) = \exp\left(\frac{1}{6} * 3,82 + \frac{0,64}{6} * 57\right) = 805,18$$

Тогда уравнение (8) показательной регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от скорости передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 805,18 * 0,53^x$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (в), с помощью гиперболической регрессии. Уравнение гиперболической регрессии показана на формуле 9.

Найдем коэффициент b по формуле 10.

$$b = \frac{n * \sum \frac{y_i}{x_i} - \sum \frac{1}{x_i} * \sum y_i}{n * \sum \frac{1}{x_i^2} - (\sum \frac{1}{x_i})^2} = \frac{6 * 2,45 - 0,65 * 19,18}{6 * 0,07 - 0,42} = 144,6$$

Найдем коэффициент a по формуле 11.



$$a = \frac{1}{n} * \sum y_i - \frac{b}{n} * \sum \frac{1}{x_i} = \sum \frac{1}{x_i} = \frac{1}{6} * 19,18 - \frac{144,6}{6} * 0,65 = -12,55$$

Тогда уравнение (9) гиперболической регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от скорости передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = -12,55 + \frac{144,6}{x}$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (в), с помощью логарифмической регрессии. Уравнение логарифмической регрессии показано на формуле 12.

Найдем коэффициент b:

$$b = \frac{n * \sum (y_i * \ln(x_i)) - \sum \ln(x_i) * \sum y_i}{n * \sum \ln^2 x_i - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{6 * 39,69 - 31,41 * 19,18}{6 * 179,83 - 179,83} = -15,63$$

Найдем коэффициент a по формуле 13.

$$a = \frac{1}{n} * \sum y_i - \frac{b}{n} * \sum \ln(x_i) = \frac{1}{6} * 19,18 + \frac{15,63}{6} * 13,41 = 38,13$$

Тогда уравнение (12) логарифмической регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от времени передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 38,13 - 15,63 * \ln(x)$$

Аппроксимируем график, изображенный на Рис. 1 (в), с помощью экспоненциальной регрессии.

Уравнение экспоненциальной регрессии показано на формуле 14.

Найдем коэффициент b по формуле 15.

$$b = \frac{n * \sum (x_i * \ln(y_i)) - \sum \ln(y_i) * \sum x_i}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{6 * 25,16 - 3,62 * 57}{6 * 559 - 3249} = -0,64$$

Найдем коэффициент a по формуле 16.

$$a = \frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} * \sum x_i = \frac{1}{6} * 3,82 + \frac{0,64}{6} * 57 = 6,69$$

Тогда уравнение (14) экспоненциальной регрессии, описывающее зависимость коэффициента распространения от скорости передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = e^{6,69 - 0,64 * x}$$

На Рис. 4 приведены график исходной функции и функциональных зависимостей, полученных различными методами аппроксимации. В Таблице 4 приведены средние ошибки аппроксимаций в процентном соотношении.

Таблица 4. Средняя ошибка различных методов аппроксимации
Table 4. Average error of various approximation methods

Метод аппроксимации	Средняя ошибка, %
Линейная регрессия	81,3
Квадратичная регрессия	18,57
Кубическая регрессия	3,52
Степенная регрессия	9,68
Показательная регрессия	2,8
Гиперболическая регрессия	54,69
Логарифмическая регрессия	68,27
Экспоненциальная регрессия	2,8

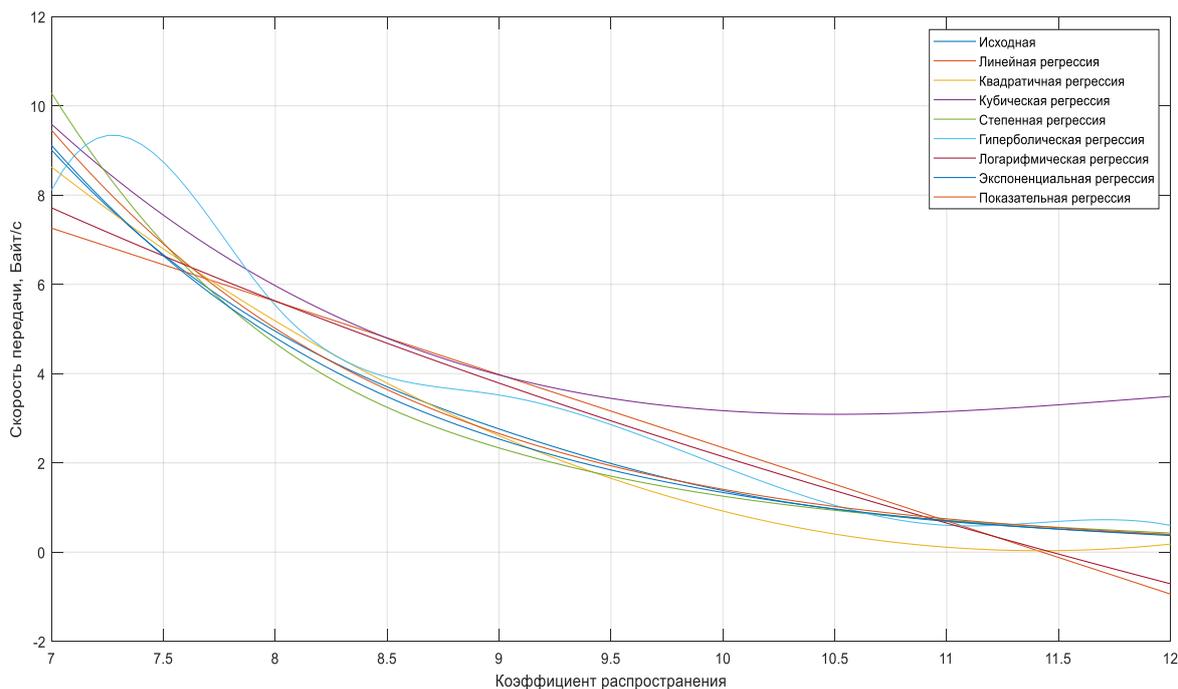


Рис. 4. График табличных экспериментальных значений и графики аппроксимированных функций скорости передачи в зависимости от коэффициента распространения
Fig. 4. A graph of tabular experimental values and graphs of approximated transmission rate functions depending on the distribution coefficient

Выводы

Наиболее точным методом аппроксимации зависимости коэффициента распространения от расстояния является квадратичная регрессия. Не рекомендуется использовать гиперболическую регрессию для аппроксимации зависимости коэффициента распространения от расстояния передачи данных, так как этот метод аппроксимации имеет значительно высокую среднюю ошибку. Наиболее точным методом аппроксимации зависимости коэффициента распространения от скорости передачи данных является показательная и экспоненциальная регрессии. Не рекомендуется использовать линейную регрессию для аппроксимации зависимости коэффициента распространения от времени передачи данных, так как этот метод аппроксимации имеет значительно высокую среднюю ошибку.

В ходе проведения исследований были выявлены зависимости между коэффициентом распространения и расстоянием передачи данных, временем передачи посылки, а также скоростью передачи. 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.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Информация об авторах

Наумов Максим Александрович, младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела автоматизации горных машин
e-mail: maksim-naumov-99@bk.ru



Карповский Артур Юрьевич, заведующий научно-исследовательским отделом автоматизации горных машин
e-mail: oagm308@mail.ru

Курносов Вячеслав Григорьевич, докт. техн. наук, профессор, первый заместитель директора по научной работе
e-mail: avtomatgormash@mail.ru

ГУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, пр. Ильича, 93, 283003.

Список литературы

1. Указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».
2. Наумов М.А., Разработка системы управления машина и механизмами с применением беспроводной технологии связи LoRa [Текст] / М.А. Наумов, А.Ю. Карповский, В.В. Казаков // Сборник научных трудов XXIV Международной научно-технической конференции Автоматизация Технологических процессов. Поиск молодых – Донецк, 2024. – С. 123-126.
3. ГОСТ 31557-2012 Комбайны очистные. Общие технические требования. Методы испытаний: межгосударственный стандарт: дата введения 2014-01-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС) Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 18 с.
4. LoRaWAN Specification, N. Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1.0, 2015 January. Режим доступа [https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/2015_-_lorawan_specification_1r0_611_1.pdf].
5. Experimental Characterization of LoRaWAN Link Quality Takwa Attia, Martin Heusse, Bernard Tourancheau, Andrzej Duda, 15 Oct 2019. Режим доступа [https://hal.science/hal-02316402/document].
6. Обзор технологии LoRa [Режим доступа] https://itechinfo.ru/node/46 (дата обращения: 01.11.2024 г.).
7. Применение технологии LoRa в беспилотных авиационных системах / М. А. Межетов, А. И. Тихова, У. С. Вахрушева, А. В. Федоров // 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», 2021. – С. 180-185. – EDN UZUCLT.
8. IoT Communication Protocols—Network Protocols Ignacio de Mendizábal [Режим доступа] https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/internet-of-communication-communication-protocols-network-protocols/ (Дата обращения: 01.11.2024 г.).
9. Naumov M.A. Development of a control system for machines and mechanisms using lora wireless communication technology [Текст] / М.А. Naumov, А. Ю. Karpovsky // Сборник материалов научно-практической конференции для преподавателей гуманитарных дисциплин Young scientists' researches and achievements in science – Донецк, 2024. – С. 281-289.
10. Наумов М.А. Разработка и исследование стенда для проверки беспроводной радиосвязи LoRa / М.А. Наумов, А.Ю. Карповский // Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием Инженеры настоящего и будущего: практика и перспективы развития партнерства в высшем техническом образовании – Таганрог, 2024. – Т. 2. – С. 330-336.
11. SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver [Электронный ресурс] Режим доступа: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/SX1278%20Lora%20Datasheet.pdf.
12. Performance line, ARM-based 32-bit MCU with Flash, USB, CAN, seven 16-bit timers, two ADCs and nine communication interfaces Режим доступа: http://inverter48.ru/datasheet/mcu/STM32F103C8T6.pdf?ysclid=m2swy5p2eh408905702
13. Шестакович В.П. Основы численных методов: учеб.-метод. пособие/ В.П. Шестакович Минск: БГУИР, 2012.–68с.: ил ISBN 978-985-488-789-0.
14. Малышева Т.А. Численные методы и компьютерное моделирование. Лабораторный практикум по аппроксимации функций [Текст] / Т.А. Малышева // Учебно-методическое пособие - СПб.: Университет ИТМО, 2016. – С. 33.
15. Пономарев, А.Б. Методология научных исследований: учеб. пособие / А.Б. Пономарев, Э.А. Пикулева. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 186 с.



STUDY OF THE EFFECT OF PROPAGATION COEFFICIENT ON DISTANCE, TIME AND DATA RATE OF LORA WIRELESS COMMUNICATION

Maxim A. Naumov, Arthur Yu. Karpovsky, Vyacheslav G. Kurnosov

State Institution "Automatgormash named after V.A. Antipov"



Article info

Received:
15 August 2024

Revised:
30 October 2024

Accepted:
25 November 2024

Keywords: approximation,
propagation coefficient, data
transmission, regression, remote
control, radio communication,
LoRa technology.

Abstract.

Equipping mining machinery with remote control systems requires the use of new means and technologies of wireless communication. The peculiarities of using new devices in underground mine workings require studying the degree of influence of specific environmental factors on the main parameters of the system: range, transmission speed, rapid performance, noise immunity, reliability. Therefore, this article is devoted to the actual topic. The aim of the work was to study the influence of propagation coefficient on the distance, time and data transmission rate of LoRa wireless communication. As a result, dependencies between propagation coefficient and data transmission distance, parcel transmission time, and transmission rate are established. Functional descriptions of these dependencies by different methods of approximation of experimental data are obtained, and regression errors in percentage are calculated. The most accurate methods of approximation of the data obtained as a result of the experiment are highlighted.

For citation Naumov M.A., Karpovsky A.Yu., Kurnosov V.G. Study of the effect of propagation coefficient on distance, time and data rate of LoRa wireless communication. *Journal of mining and geotechnical engineering*. 2024;4(27):26-44. DOI: 10.26730/2618-7434-2024-4-26-44

References

1. Decree of the President of the Russian Federation of 28.02.2024 No. 145 "On the Strategy of Scientific and Technological Development of the Russian Federation". [In Russ.].
2. Naumov, M.A. Development of a control system for machines and mechanisms with the use of wireless communication technology LoRa [Text] / M.A. Naumov, A.Yu. Karpovsky, V.V. Kazakov // Proceedings of XXIV International Scientific and Technical Conference Automation of Technological Processes. Search for young people. Donetsk, 2024. – P. 123-126. [In Russ.].
3. State Standard 31557-2012 Shearers. General technical requirements. Test methods: interstate standard: date of introduction 2014-01-01 / Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. Official edition. Moscow: Standartinform publishing house, 2013, 18 p. [In Russ.].
4. LoRaWAN Specification, N. Sornin (Semtech), M. Luis (Semtech), T. Eirich (IBM), T. Kramp (IBM), O. Hersent (Actility), V1.0, 2015 January. Access mode [https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/2015_-_lorawan_specification_1r0_611_1.pdf].
5. Experimental Characterization of LoRaWAN Link Quality Takwa Attia, Martin Heusse, Bernard Tourancheau, Andrzej Duda, Accessed 15 Oct 2019. [https://hal.science/hal-02316402/document].
6. LoRa Technology Overview [Access mode] https://itechinfo.ru/node/46 (accessed 01.11.2024).
7. Application of LoRa technology in unmanned aircraft systems / M.A. Mezhetov, A.I. Tikhova, U.S. Vakhrusheva, A.V. Fedorov // 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 Moscow State Technical University of Civil Aviation", 2021. – P. 180-185. – EDN UZUCLT. [In Russ.].
8. IoT Communication Protocols-Network Protocols Ignacio de Mendizábal [Access mode] https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/internet-of-communication-communication-protocols-network-protocols/ (Date of reference: 01.11.2024).



9. Naumov M.A. Development of a control system for machines and mechanisms using lora wireless communication technology [Text] / M.A. Naumov, A. Yu. Karpovsky // Collection of materials of scientific and practical conference for teachers of humanitarian disciplines «Young scientists' researches and achievements in science». Donetsk. 2024. – P. 281-289. [In Russ.].
10. Naumov, M.A. Development and research of the stand for the LoRa wireless radio communication testing / M.A. Naumov, A.Yu. Karpovsky // Proceedings of the XIX All-Russian scientific and practical conference with international participation Engineers of the present and future: practice and prospects of partnership development in higher technical education. – Taganrog, 2024. – Vol. 2. – P. 330-336. [In Russ.].
11. SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver [Electronic resource] Access mode: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/SX1278/Lora/Datasheet.pdf
12. Performance line, ARM-based 32-bit MCU with Flash, USB, CAN, seven 16-bit timers, two ADCs and nine communication interfaces Access mode: <http://inverter48.ru/datasheet/mcu/STM32F103C8T6.pdf?ysclid=m2swy5p2eh408905702>.
13. Shestakov V.P. Fundamentals of numerical methods: textbook. Minsk: BSUIR publishing house, 2012, 68 p. [In Russ.].
14. Malysheva T.A. Numerical methods and computer modeling. Laboratory workshop on approximation of functions: Training manual. St. Petersburg: ITMO University, 2016. – P. 33. [In Russ.].
15. The methodology of scientific research: textbook / A.B. Ponomarev, E.A. Pikuleva. Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2014. - 186 c. [In Russ.].

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Information about the authors

Maxim A. Naumov, Junior researcher at the Scientific Research Department of automation of mining machines
e-mail: maksim-naumov-99@bk.ru

Artur Yu. Karpovsky, Head of the scientific research department of automation of mining machines
e-mail: oagm308@mail.ru

Vyacheslav G. Kurnosov, Dr.Sc.(Tech.), Professor, First Deputy Director for Scientific Work
e-mail: avtomatgormash@mail.ru

State Institution "Automatgormash named after V.A. Antipov", 93 Ilyich Ave., 283003, Donetsk, DPR, Russian Federation.