



УДК 004.716

DOI 10.52575/2687-0932-2021-48-4-822-830

О помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций для систем Интернет вещей

Урсол Д.В.

ООО «Промышленные электронные системы», Россия
308000, Белгород, ул. Михайловское шоссе, 121а

Аннотация. В статье рассматривается метод формирования сигнально-кодовых конструкций и решающее правило на основе индексов ортогонального субполосного базиса, позволяющих повысить уровень устойчивости к воздействию флуктуационных помех в системах Интернет вещей. Приводятся результаты сравнительных вычислительных экспериментов битовой ошибки метода передачи с расширением спектра системы LoRa и метода на основе собственных векторов субполосного базиса. Результаты вычислений показывают возможность применения субполосного базиса в системах Интернет вещей с высокой эффективностью, не уступающего существующим методам.

Ключевые слова: системы Интернет вещей, расширение спектра, линейная частотная модуляция, ортогональный субполосный базис, отношение сигнал-шум, вероятность ошибки, флуктуационные помехи.

Для цитирования: Урсол Д.В. 2021. О помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций для систем интернет вещей. Экономика. Информатика, 48(4): 822–830. DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-4-822-830.

About noiseimmunity of signal-code structures for internet of things

Denis V. Ursol

Industrial Electronic Systems LLC
121a Mikhailovskoe shosse St, Belgorod, 308000, Russia
E-mail: ursoldenis@mail.ru

Abstract. The article about a method for coding signal-code structures based on an orthogonal sub-band basis with high resistance from fluctuation noise in IoT systems. Shown results of comparative computational experiments of bit error rate on the spread spectrum transmission method in LoRa system and the method based on the eigenvectors of the subband basis. Another solution is use index of subband matrix for coding bit information, this is like time shift of Chirp Spread Spectrum (CSS) base signal. If transmit bits on each eigenvector it is improve throughput of the system and decrease of noise immunity and bit error rate same as binary phase shift key (BPSK) modulation. But it gives more opportunities for adaptive speed correction for current level of Additive white Gaussian noise (AWGN) channel. The article contains results of numerical experiments of spreading factor in AWGN channel against of signal to noise ratio (SNR). Coding by indexing eigenvectors have small complexity and can be build only on memory use.

Keywords: IoT systems, spread spectrum, chirp, orthogonal subband basis, signal-to-noise ratio, error probability, fluctuation noise.

For citation: Ursol D.V. 2021. About noiseimmunity of signal-code structures for internet of things. Economics. Information technologies, 48(4): 822–830 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-4-822-830.

Растущая потребность в повышении эффективности и оптимизации экономических процессов, а также благодаря повсеместному распространению беспроводных сетей, появлению облачных вычислений и развитию технологий межмашинного взаимодействия

появилась концепция сети передачи данных между физическими объектами, оснащёнными встроенными средствами и технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой. Эта концепция получила название Интернет вещей (IoT). Технология Интернет вещей формирует направление информатизации и развития глобальной цифровой экономики, позволяет исключить из операций необходимость участия человека и повысить эффективность управления экономическими процессами.

Особенность архитектуры беспроводной сети для информационного обмена Интернет вещей заключается в работе множества источников данных, работающих в разный момент времени и на большой площади покрытия, сбор и обработка данных единым центром-станцией. Влияние помех на эффективность средств информационного обмена приводит к необходимому снижению полезной скорости передачи, повышению энергопотребления и вычислительных ресурсов для помехоустойчивого кодирования. Таким образом, обеспечение помехоустойчивости информационного обмена между всеми участниками беспроводной сети в системе Интернет вещей определяет её эффективность функционирования и является актуальной задачей.

Одним из решений такой задачи выступает использование различного класса сигнально-кодовых конструкций для передачи информации в беспроводных каналах связи, однако требования к скорости передаваемой информации вступают в противоречия с обеспечением требуемой достоверности и надёжности в силу ограниченности используемых частотно-временных ресурсов. В данной статье рассматривается формирование сигнально-кодовых конструкций на основе ортогонального субполосного базиса с разными походами кодирования информации и декодирования, а также выбора решающего правила и сравнение с существующими методами передачи с частотно-линейным базисом в системе LoRa (Long Range).

Модуляция системы LoRa разрабатывалась с низким энергопотреблением и обеспечением передачи на большие расстояния, которая основана на модуляции с расширением спектра с частотно-линейным сигналом. В зависимости от коэффициента расширения спектра (Spreading Factor – SF), который принимает значения от 7 до 12, скорость передачи данных может составлять от 6 кбит/сек до 0,3 кбит/сек в полосе 125 кГц. Базисом такой сигнально-кодовой конструкции является частотно-линейный сигнал вида:

$$s(t) = e^{j(2\pi f_c t + 2\pi \frac{\beta}{2} t^2)}, \quad (1)$$

$$\beta = \frac{BW}{T_s}, \quad (2)$$

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \cdot CR, \quad (3)$$

где f_c – частота несущей, β – коэффициент изменения частоты, где BW – ширина занимаемой полосы частот, T_s – время длительности символа, SF – коэффициент расширения спектра, который определяет количество бит на кодируемый символ, CR – Code Rate, коэффициент кодирования (в данной работе принят равным единице). Если коэффициент изменения частоты $\beta > 0$, то частота монотонно возрастает, иначе ($\beta < 0$) частота снижается [Fialho V., Azevedo F., 2018; Bouras C., Kokkinos V., Papachristos N., 2018].

Кодирование информации в системе LoRa осуществляется путем пропорционального циклического смещения частотного линейного базиса по времени. Доля смещения относительно времени символа рассчитывается по формуле:

$$d = \frac{v}{2^{SF}} T_s, \quad (4)$$

где $v \in \{0, \dots, 2^{SF} - 1\}$ – передаваемое десятичное кодовое значение, полученное преобразованием последовательности из SF бит, T_s – время длительности символа. Метод циклического смещения сигнала является менее требовательным для реализации, так как нет

необходимости постоянно формировать новый смещенный частотно-линейный сигнал [Fialho V., Azevedo F., 2018; Bouras C., Kokkinos V., Papachristos N., 2018].

Количество возможных циклических смещений и соответственно кодирующих комбинаций составляет $2^{SF} - 1$, таким образом, в одном символе передается SF бит информации. На рисунке 1 представлен частотный линейный базис в полосе $BW = 500$ кГц, и закодированный символ ($v = 150$) на основе циклического смещения линейного частотного базиса.

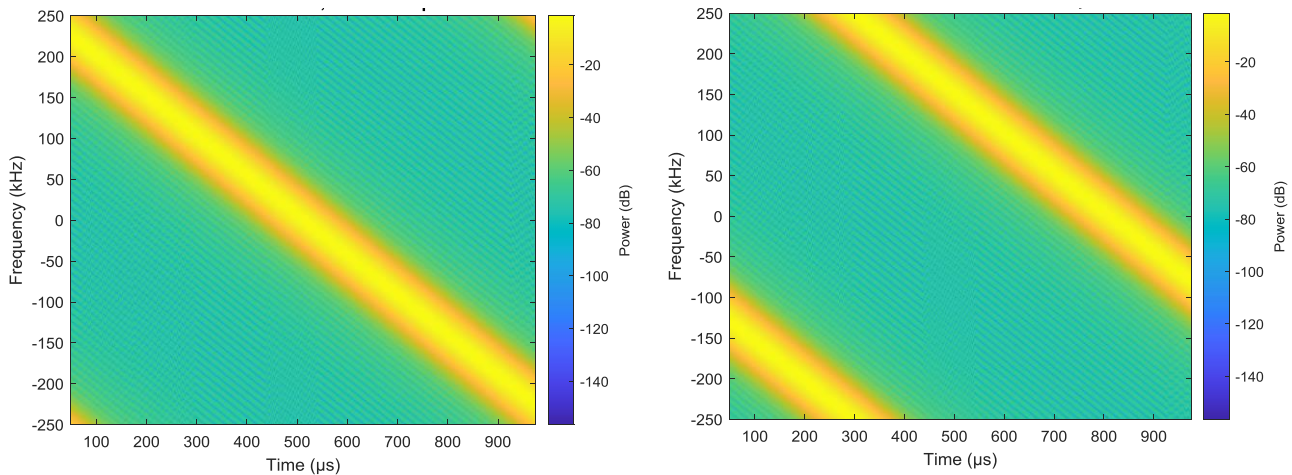


Рис. 1. Частотный линейный базис (500 кГц) и закодированный десятичным символом 150
 Fig. 1. Frequency linear basis (500 kHz) and decimal encoded value 150

Декодирование передаваемого символа в системе LoRa основывается на когерентном приёме и использовании противоположного базиса с тем же значением SF . Если при кодировании использовался линейно-частотный сигнал с понижением частоты, на приемной части используется его противоположная комплексно-сопряженная версия:

$$r(n) = \hat{x}(n) \cdot s^*(n), \quad (5)$$

где $\hat{x}(n)$ – реализация сигнала на приёмной стороне после канала связи, полученного с частотой дискретизации F_s , $*$ – знак комплексного сопряжения, $n = 0, \dots, N - 1$ отсчет сигнала на приемной стороне, N – общее количество отсчетов равно 2^{SF} . Из полученного соотношения находится прямое дискретное преобразование Фурье:

$$R_k = \sum_{n=0}^{N-1} r_n e^{\frac{-2\pi i}{N} kn}.$$

Решающее правило состоит в поиске аргумента с максимальным значением энергии после Дискретного преобразования Фурье:

$$\hat{v} = \arg \max_k |R_k|^2, \quad (6)$$

где \hat{v} – принятый десятичный символ, который возможно преобразовать в битовую последовательность. Полагается, что прием когерентный, система синхронизации и помехоустойчивое кодирование в работе не учитываются.

В настоящее время известно, что ортогональный субполосный базис на основе собственных векторов обладает минимальным уровнем внеполосного излучения при высоком уровне устойчивости к воздействию флуктуационных помех. Для цифровых систем

связи данный метод характеризуется количеством ортогональных базисных векторов, влияющих на количество передаваемой информации. Синтез элементов субполосного ядра представляется в виде [Жилияков, Урсол, Магергут. 2012; Урсол, 2020]:

$$a_{i,k} = \begin{cases} \sin\left(\frac{v}{2}(i-k)\right) / \pi(i-k), & i \neq k \\ \frac{v}{2\pi}, & i = k \end{cases}, \quad (7)$$

где $i, k = 1, 2, \dots, N$ – количество отсчетов на интервале одного символа, которое определяется целочисленным значением и рассчитывается согласно выражению

$$N = F_s \cdot T_b = 2^{SF}, \quad (8)$$

где F_s – частота дискретизации в системе связи, T_b – длительность символа. При этом

$$v = 2 \cdot \pi \left(\frac{BW}{F_s} \right), \quad (9)$$

где W – ширина выделенной полосы для передачи в Гц.

Таким образом, мы формируем оптимальный ортогональный базис для системы с параметрами LoRa и кодирования передаваемой информации, формируется в виде матрицы $Q = (\vec{q}_1, \vec{q}_2, \dots, \vec{q}_J)$, которая состоит из собственных векторов $\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_N)^T$ субполосной матрицы, соответствующие собственные числа которых близки или равны единице, где T – знак транспонирования.

Пусть необходимо передать битовый информационный вектор $\vec{e} = (e_1, \dots, e_J)$, состоящий из символов $\{-1, 1\}$, соответствующих BPSK манипуляции. Для передачи используется канальный сигнал $x(\vec{e}, t), t \in [0, T]$ в виде физически реализуемой функции времени, в параметрах которой эти символы закодированы. Предполагается, что энергия сигнала фиксирована, и существует восстанавливающий оператор, который при отсутствии искажений канального сигнала позволяет однозначно декодировать передаваемые символы [Жилияков, Урсол, Магергут, 2012].

Тогда для передачи исходных символов информационных каналов и применяется способ кодирования согласно выражению:

$$x(\vec{e}) = \vec{e} \cdot Q^T, \quad (10)$$

при этом энергия сигнала конечна

$$\|x(\vec{e})\|^2 = \int_0^T x^2(\vec{e}, t) dt = E, \quad (11)$$

тогда их восстановление информации при том, что $Q^T \cdot Q = I$:

$$\vec{e} = (x(\vec{e}) + \vec{\varepsilon}) \cdot Q, \quad (12)$$

где I – единичная матрица, T – знак транспонирования, $\vec{\varepsilon}$ – аддитивный Гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 .

Пусть для сохранения условия сохранения энергии (10) при кодировании бит используется правило: если $e_j = 0$, то $g_j = -(E/J)^{1/2}$, а при $e_{j'} = 1$ положить $g_j = (E/J)^{1/2}$, где J – количество базисных отобранных векторов с собственным числом, близким или равным единице. Тогда решающее правило декодирования принимает вид: если $\hat{g}_j < 0$, то $e_j = 0$ и наоборот – $e_j = 1$, когда $\hat{g}_j \geq 0$. При этом вероятность ошибки определяется соотношением

$$P_{out1} = Q \left(\sqrt{\frac{E}{\sigma^2}} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{2E}{N_0}} \right), \quad (13)$$

где N_0 – спектральная плотность шума,

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2/2) dt.$$

Таким образом, вероятности ошибок будут равны вероятностям ошибок в методе кодирования BPSK, при равенстве энергетических затрат на передачу соответствующих символов. На рисунке 2 представлены результаты вычислительных экспериментов SF=7, BW=125кГц.

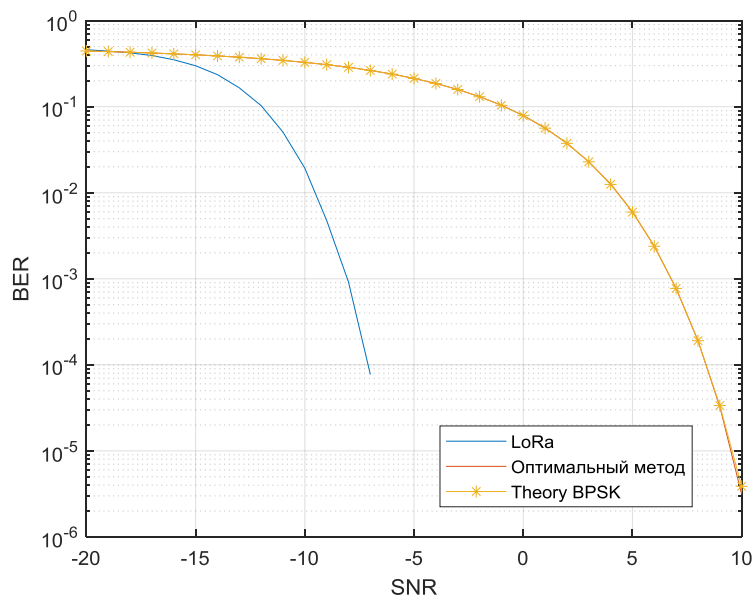


Рис. 2. Вероятность битовой ошибки LoRa и оптимального метода SF=7, BW=125кГц
 Fig. 2. Bit error rate of LoRa and optimum method SF=7, BW=125 kHz

Как показано на рисунке, LoRa имеет большую помехоустойчивость (но меньшую битовую скорость передачи), оптимальный метод соответствует аналитическим выражениям и результаты вычислений соответствуют помехоустойчивости BPSK манипуляции. Важно заметить, что сформированный таким образом сигнал позволит повысить скорость передачи в несколько раз, поскольку в одном базисе может содержаться больше собственных векторов с собственным числом больше единице, чем параметр системы SF. Соответственно при этом снижается и помехоустойчивость системы за счет равномерного разделения энергии между используемыми ортогональными базисными векторами при кодировании, что доказывают результаты вычислительных экспериментов.

В данной работе предлагается повысить помехоустойчивость в системе Интернет вещей на основе собственных векторов субполосного базиса за счет использования альтернативного метода кодирования и выбора альтернативного решающего правила.

Пусть необходимо передать SF бит информации, тогда символ $v \in \{0, \dots, 2^{SF} - 1\}$ будет иметь уникальное значение. Отберем из все собственные вектора из субполосного ядра (7) и сформируем «полный» базис размерностью $N = 2^{SF}$.

$$B = (\vec{q}_1, \vec{q}_2, \dots, \vec{q}_j), j = N \quad (14)$$

при $F_s = BW$, практически все значения собственных чисел будут равны или близки единице, B – матрица размерности $[NxN]$, состоящая из ортогональных собственных векторов. Также выполняется условие для возможности верного декодирования $B^T \cdot B = I$.

Кодирование информации для максимизации энергии на один информационный символ будет иметь вид:

$$\vec{x}_{alt}(v) = B(v) = \vec{q}_j, \quad (15)$$

$$j = v \in \{1, \dots, N\}.$$

Альтернативный метод кодирования – сформировать бинарный вектор с единицей в позиции равной значению передаваемого символа и осуществить произведение матрицы B на такой вектор, однако такой метод будет более ресурсозатратным.

Декодирование передаваемой информации и решающее правило (по принципу максимального правдоподобия) выполняется по формуле:

$$\hat{v} = \arg \max_j ((\vec{x}_{alt}(v) + \vec{\varepsilon}) \cdot B) = \arg \max_j (\hat{q}_j \cdot B), \quad (16)$$

где, $\vec{x}_{alt}(v)$ – канальный сигнал, закодированный определенным собственным вектором, $\vec{\varepsilon}$ – аддитивный Гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 , B – полный ортогональный базис, матрица размерности $[N \times N]$, состоящая из ортогональных собственных векторов.

Таким образом, индекс максимального значения скалярного произведения передаваемого собственного вектора и ортогональных собственных векторов является оценкой передаваемого символа. Вся энергия передатчика используется на передачу сигнала, состоящего только из одного собственного вектора, что увеличивает помехоустойчивость, но скорость передачи при этом снижается. На рисунке 3 представлены результаты вычислительных экспериментов с альтернативным методом кодирования и декодирования на основе ортогонального базиса в сравнении с LoRa.

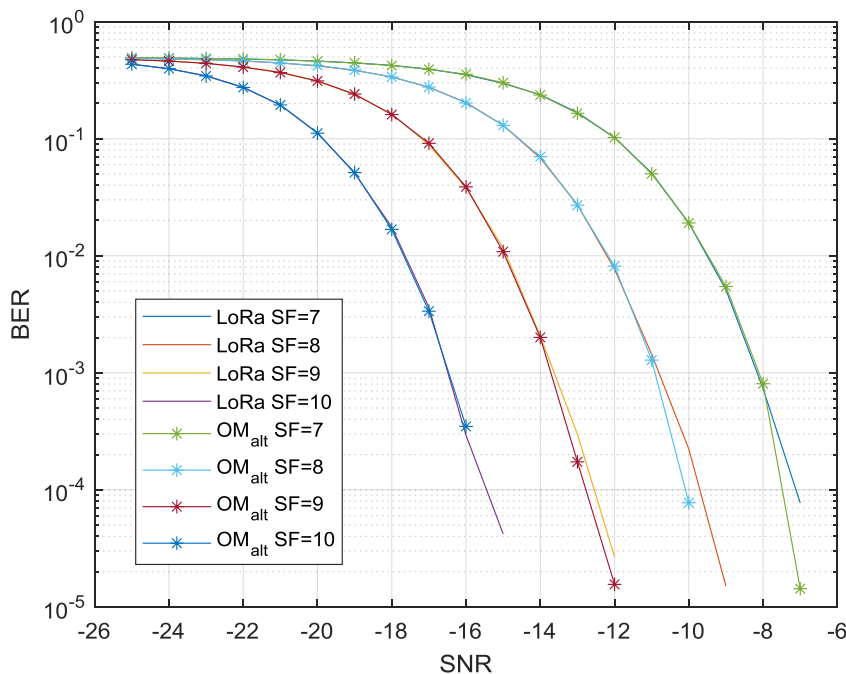


Рис. 3. Вероятность битовой ошибки LoRa и оптимального метода передачи с альтернативным методом кодирования/декодирования $BW=125$ кГц

Fig. 3. Bit error rate of LoRa and optimum method alternative encoding/decoding $BW=125$ kHz



В таблице 1 представлены вероятности битовой ошибки для альтернативного метода кодирования и декодирования информации на основе субполосного ортогонального базиса в сравнении с системой LoRa при различном коэффициенте расширения спектра SF.

Таблица 1
 Table 1

Вероятность битовой ошибки при различном значении SF и отношении сигнал/шум
 Bit error rate with different value SF and signal noise ratio

Соотношение сигнал/шум SNR(dB)	SF7		SF8		SF9		SF10	
	LoRa	OM	LoRa	OM	LoRa	OM	LoRa	OM
-20	0,460	0,459	0,419	0,421	0,309	0,311	0,112	0,111
-19	0,444	0,444	0,383	0,385	0,238	0,240	0,051	0,051
-18	0,423	0,421	0,337	0,337	0,163	0,161	0,018	0,017
-17	0,393	0,391	0,275	0,276	0,088	0,091	0,004	0,003
-16	0,351	0,355	0,204	0,202	0,038	0,039	0,000	0,000
-15	0,297	0,300	0,130	0,130	0,012	0,011	0,000	0,000
-14	0,237	0,236	0,068	0,070	0,002	0,002	0,000	0,000
-13	0,167	0,165	0,027	0,027	0,000	0,000	0,000	0,000
-12	0,102	0,102	0,008	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000
-11	0,051	0,050	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
-10	0,019	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-9	0,005	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-8	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Как видно из результатов вычислительных экспериментов, помехоустойчивость на основе субполосного базиса совпадает с методом системы LoRa, что может говорить о возможности применения новой технологии в системе Интернет вещей. Одним из основных преимуществ использования ортогонального базиса в системе Интернет вещей является возможность адаптивного подбора скорости передачи данных. Появляется возможность более точно и гибко регулировать скорость передачи в зависимости от уровня воздействия внешних помех, без конструкторских изменений и алгоритмов. Другой отличительной особенностью такого метода является низкая вычислительная сложность в кодировании информации, что является большим преимуществом в системах с автономными и сильно ограниченными источниками питания, включая снижение конечной стоимости приемопередающего устройства.

Список литературы

1. Жилияков Е.Г., Урсол Д.В., Магергут В.З., 2012. Разработка нового способа формирования сигналов для систем доступа к широкополосным мультимедийным услугам. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: экономика. информатика. Издательство: Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород.
2. Урсол Д.В., 2012. Метод обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций при субполосной передаче информации: дис. канд. техн. наук: 05.13.17 – Теоретические основы информатики. Белгород.
3. Fialho V., Azevedo F., 2018. Wireless Communication Based on Chirp Signals for LoRa IoT Devices. ETC: ISEL Academic Journal of Electronics, Telecommunications and Computers IoT-2018 Issue, 4 (1).
4. Bouras C., Kokkinos V., Papachristos N., 2018. Performance evaluation of LoraWan physical layer integration on IoT devices. Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS).
5. Afisiadis O., Cotting M., 2019. On the Error Rate of the LoRa Modulation with Interference. IEEE Transactions on Wireless Communications PP(99):1–1.
6. Wang X., Fei M., Li X., 2008. Performance of Chirp Spread Spectrum in Wireless Communication Systems. Conference: Communication Systems ICCS 2008. 11th IEEE Singapore International.

7. Savaux V., Ferré G., 2021. Simple Asymptotic BER Expressions for LoRa System over Rice and Rayleigh Channels. Wireless Telecommunications Symposium, San Francisco (virtual), United States. hal-03200448.
8. Jair A, Silva A, 2020. Theoretical and Experimental Evaluation on the Performance of LoRa Technology. DOI 10.1109/JSEN.2020.2987776.
9. LoRa™ Modulation Basics 2015. Revision 2, AN1200.22.
10. Rajni B., Pooja S., Javed A., 2012. Analysis of Chirp Spread Spectrum System for Multiple Access. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278-0181, 1 (3).
11. Aiju T., Eldhose N., 2020. Chirp spread spectrum for narrow band long range bio sensor networks. International Journal Of Scientific & Technology Research. 9 (01).
12. Joerg R., Tallal E., 2018. Closed Form Approximation of LoRa Modulation BER Performance DOI 10.1109/LCOMM.2018.2849718, IEEE Communications Letters.
13. Tallal E., Joerg R., 2018. Analysis of BER and Coverage Performance of LoRa Modulation under Same Spreading Factor Interference. IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC).
14. Gonzalez N., Bossche A., Val T., 2018. Specificities of the LoRa physical layer for the development of new ad hoc MAC layers. 17th International Conference on Ad Hoc Networks and Wireless, St Malo, France. pp.163–174.
15. Ferré G., Giremus A., 2018. LoRa Physical Layer Principle and Performance Analysis. ICECS 25th IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems.
16. Ferreira A., Ortiz F., Henrique L., Costa M. K., Foubert B., Amadou I., 2020. A study of the LoRa signal propagation in forest, urban, and suburban environments. Annals of Telecommunications – annales des télécommunications.
17. Staniec K., Kowal M., 2018. LoRa Performance under Variable Interference and Heavy-Multipath Conditions. Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2018.

References

1. Zhilyakov E.G., Ursol D.V., Magergut V.Z., 2012. Development of a new method for generating signals for access systems to broadband multimedia services. Scientific reports of Belgorod State University. Series: Economics. computer science. Publisher: Belgorod National Research University, Belgorod. (in Russian)
2. Ursol D.V., 2012. Metod obespechenija pomehoustojchivosti informacionnyh kommunikacij pri subpolosnoj peredache informacii [The method of ensuring noise immunity of information communications in the subband transmission of information]: dis. cand. tech. Sciences: 05.13.17 – Theoretical foundations of computer science. Belgorod. (in Russian)
3. Fialho V., Azevedo F., 2018. Wireless Communication Based on Chirp Signals for LoRa IoT Devices. ETC: ISEL Academic Journal of Electronics, Telecommunications and Computers IoT-2018 Issue, 4 (1).
4. Bouras C., Kokkinos V., Papachristos N., 2018. Performance evaluation of LoraWan physical layer integration on IoT devices. Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)
5. Afisiadis O., Cotting M, 2019. On the Error Rate of the LoRa Modulation with Interference. IEEE Transactions on Wireless Communications PP(99):1–1.
6. Wang X., Fei M., Li X., 2008. Performance of Chirp Spread Spectrum in Wireless Communication Systems. Conference: Communication Systems ICCS 2008. 11th IEEE Singapore International.
7. Savaux V., Ferré G., 2021. Simple Asymptotic BER Expressions for LoRa System over Rice and Rayleigh Channels. Wireless Telecommunications Symposium, San Francisco (virtual), United States. hal-03200448.
8. Jair A, Silva A, 2020. Theoretical and Experimental Evaluation on the Performance of LoRa Technology. DOI 10.1109/JSEN.2020.2987776.
9. LoRa™ Modulation Basics 2015. Revision 2, AN1200.22.
10. Rajni B., Pooja S., Javed A., 2012. Analysis of Chirp Spread Spectrum System for Multiple Access. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278-0181, 1 (3).
11. Aiju T., Eldhose N., 2020. Chirp spread spectrum for narrow band long range bio sensor networks. International Journal Of Scientific & Technology Research. 9 (01).



12. Joerg R., Tallal E., 2018. Closed Form Approximation of LoRa Modulation BER Performance DOI 10.1109/LCOMM.2018.2849718, IEEE Communications Letters.

13. Tallal E., Joerg R., 2018. Analysis of BER and Coverage Performance of LoRa Modulation under Same Spreading Factor Interference. IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC).

14. Gonzalez N., Bossche A., Val T., 2018. Specificities of the LoRa physical layer for the development of new ad hoc MAC layers. 17th International Conference on Ad Hoc Networks and Wireless, St Malo, France. pp.163–174.

15. Ferré G., Giremus A., 2018. LoRa Physical Layer Principle and Performance Analysis. ICECS 25th IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems.

16. Ferreira A., Ortiz F., Henrique L., Costa M. K., Foubert B., Amadou I., 2020. A study of the LoRa signal propagation in forest, urban, and suburban environments. Annals of Telecommunications – annales des télécommunications.

17. Staniec K., Kowal M., 2018. LoRa Performance under Variable Interference and Heavy-Multipath Conditions. Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2018.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Урсол Денис Владимирович, кандидат технических наук, инженер-программист, ООО «Промышленные электронные системы», г. Белгород, Россия

Denis V. Ursol, Candidate of Technical Sciences, Software Engineer, Industrial Electronic Systems LLC, Belgorod, Russia