Методика формирования 12-ти битных полярно-разреженных кодовых последовательностей

Потапов Илья Александрович
кандидат технических наук, доцент, Военная академия связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, ilpotapovil@mail.ru

Рублёв Александр Александрович
адъюнкт, Военная академия связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, rublev.aleksandr@gmail.com

Дырин Владимир Иванович
преподаватель, Военная академия связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, dviumet@yandex.ru

Исса Ахд
адъюнкт, Военная академия связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, ahed.issa.2021@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение: При ведении боевых действий существенную роль при управлении войсками и оружием выполняет система связи. В связи со сложной помеховой обстановкой со стороны противника помехоустойчивость системы связи всегда сохраняет свою актуальность. Предлагается новый способ формирования 12-ти битных полярно-разреженных кодовых последовательностей. **Постановка задачи:** повысить помехозащищенность тропосферных и радиорелейных линий связи от помех противника. **Методы**: методы теории кодирования в области полярных кодов и расчёта автокорреляционной функции кодовых последовательностей. **Результаты**: разработаны способы формирования полярно-разреженного кода длиною 12-ть бит. Показана возможность повышения автокорреляционных свойств сформированных полярно-разреженных кодов. Представлены графики автокорреляционных функций полярно-разреженных кодовых последовательностей, подтверждающих теорию пот повышению автокорреляционных свойств кодовых последовательностей. **Практическая значимость:** разработанный способ позволяет формировать полярно-разреженные коды длиною 12 бит с дальнейшим улучшением, при необходимости, автокорреляционных свойств данных кодов. **Обсуждение:** Новизна предложенного способа состоит в том, что сформированные полярно-разреженные кодовые последовательности обладают неизвестным для противника реализациями сигналов, что существенно осложняет процесс постановки структурных помех с его стороны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полярно-разреженные кодовые последовательности; автокорреляционные функция кодовой последовательности; информационные биты; вес Хемминга; блочный код.

Введение

В современных средствах связи, радиолокации, радионавигации, на данный момент существуют разные способы достижения необходимого качества связи. Одним из таких способов является канальное кодирование. Канальное кодирование можно считать способом приведения параметров системы к желаемому компромиссу, т.е. соотношению между достоверностью передачи и шириной полосы пропускания или мощностью и шириной полосы пропускания. С помощью канального кодирования происходит преобразование последовательности данных в новую, «улучшенную последовательность», обладающую структурной избыточностью. Таким образом, после преобразования мы получаем на выходе сигнал, имеющий лучшие пространственные характеристики, чем не кодированный. В данной статье представлен метод канального кодирования с использованием полярно-разреженных сигнально-кодовых конструкций длинною 12 бит.

Рассмотрим формирование блочного полярно-разреженного кода длиною 12 бит. Стоит заметить, что блочный полярно-разреженный код длиною 12 бит возможно сформировать двумя способами:

добавлением к полярной части, состоящей из 4 бит, 8-мибитной разреженной части (11000000);

добавлением к полярной части, состоящей из 6 бит, 6-тибитной разреженной части (110000).

При формировании 12-тибитной полярно-разреженной кодовой последовательности по первому способу полярная часть (информационные биты) длиной 4 бита формируются по схеме (рисунок 1).

На рисунке 1 представлена схема формирования полярной части (информационных битов) блочного кода длиной 4 бита. Опишем ее работу. На вход подаются биты U0, U1, U2, U3. В результате попарного суммирования по модулю 2 битов U0 и U1, U2 и U3 формируются биты L0 и L2 соответственно. В блоке BN происходит операция полярного кодирования, т.е. инверсия каждого поступившего бита.

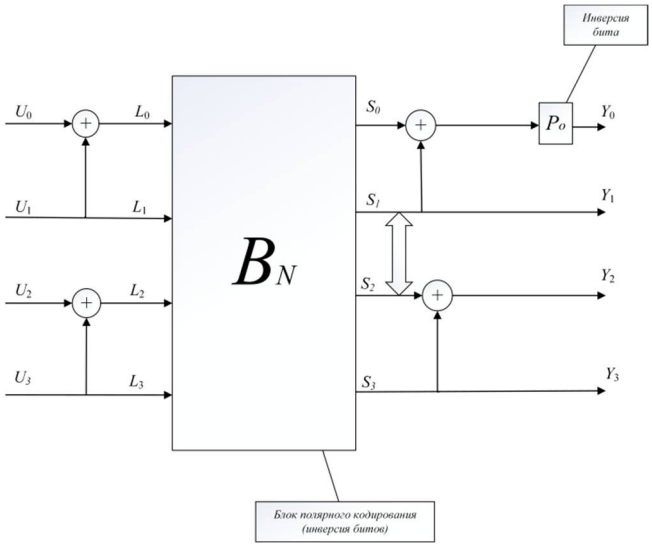

Рис.1 Схема формирования полярной части (информационных битов) длиной 4 бита блочного кода

Это означает, что на выходе данного блока биты S0, S1, S2, S3 будут инверсными (обратными) по отношению к битам на входе блока полярного кодирования BN - L0, L1, L2, L3. При этом биты S1 и S2 между собой меняются местами. После операции суммирования по модулю 2 битов S0 и S2 полученный бит подвергается инверсии в блоке P0. В результате получаем информационные биты Y0, Y1, Y2, Y3, которые содержат в себе полезную информацию и являются полярной частью формируемого блочного кода.

К полученным информационным битам Y0, Y1, Y2, Y3 добавляется разреженная часть, так называемые добавочные биты, в виде разреженной кодовой последовательности 11000000.

В таблице 1 представлены все возможные варианты сформированных информационных битов Y0, Y1, Y2, Y3 блочного кода длиной 4 бита с максимальными значениями боковых пиков автокорреляционной функции (АКФ) сформированных кодовых полярно-разреженных последовательностей. Нужно заметить, что комбинация из четырёх нулей была исключена из дальнейшего анализа в связи с малым весом Хемминга. В данном случае вес Хемминга комбинации 000011000000 равен 2. В подобных комбинациях (длиною 12 и более бит) принято не рассматривать комбинации, вес Хемминга которых менее 3.

Таблица 1

Сформированные информационные биты Y_0, Y_1, Y_2, Y_3, блочного кода с максимальными значениями боковых пиков АКФ сформированных кодовых полярно-разреженных последовательностей

$U_0U_1U_2U_3$	$Y_0Y_1Y_2Y_3$	Разреженная часть	АКФ (макс. знач. – номер бита)
0000	1101	11000000	2 – 4-й бит
0001	0010	11000000	3 – 3-й бит
0010	0001	11000000	3 – 9-й бит
0011	1110	11000000	3 – 3-й бит
0100	0111	11000000	1 – 3-й бит
0101	1000	11000000	3 – 5-й бит
0110	1011	11000000	1 – 3-й бит
0111	0100	11000000	3 – 3-й бит
000	0101	11000000	1 – 9-й бит
1001	1010	11000000	4 – 2-й бит
1010	1001	11000000	1 – 5-й бит
1011	0110	11000000	5 – 3-й бит
1100	1111	11000000	3 – 3-й бит
1110	0011	11000000	2 – 10-й бит
1111	1100	11000000	4 – 4-й бит

Проанализировав данные в табл.1, можно сделать вывод, что полученные кодовые комбинации имеют хорошие автокорреляционные свойства, за исключением трёх кодовых последовательностей – 101011000000, 011011000000, 110011000000 (рис.2,3). У

данных кодовых последовательностей боковые пики АКФ имеют значения, превышающие 25% от максимального значения АКФ (в данных случаях 4 и 5 от уровня 12). Рассчитанные значения АКФ данных кодовых последовательностей представлены на рисунках 2 и 3. Расчет производился в соответствующем разработанном на кафедре «Общепрофессиональных дисциплин» ВАС им. С.М. Будённого программном модуле (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №21162 от 09.12.2021 г.).

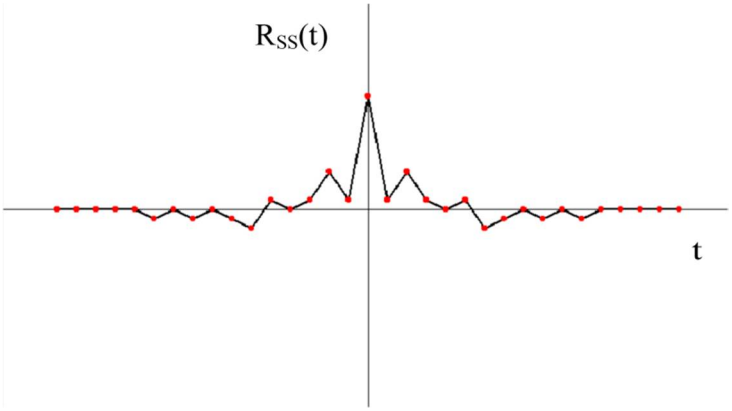

Рис.2 Значения АКФ кодовой последовательности 101011000000

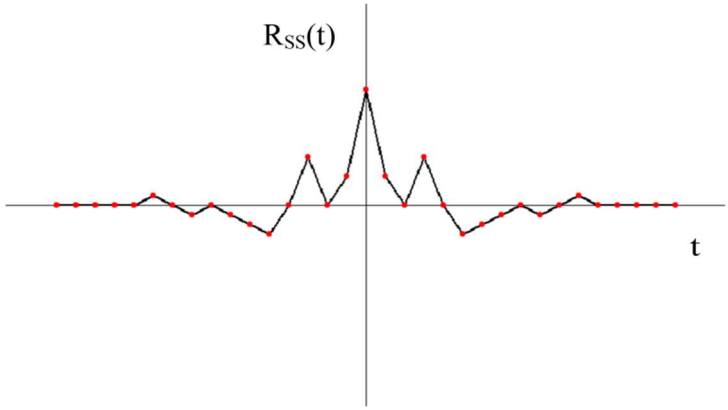

Рис.3 Значения АКФ кодовой последовательности 011011000000

Для того, чтобы снизить уровень боковых пиков АКФ представленных выше трёх кодовых последовательностей сделаем замену предпоследнего или последнего бита на противоположный. На рис.4 и 5 можно увидеть, что после замены предпоследнего или последнего битов на противоположные в данных кодовых комбинациях боковые пики АКФ имеют значения, не превышающие 25% от максимального значения АКФ (в данных случаях – 3 от уровня 12). Необходимо отметить, что во всех трёх случаях произвели замену предпоследнего бита на противоположный.

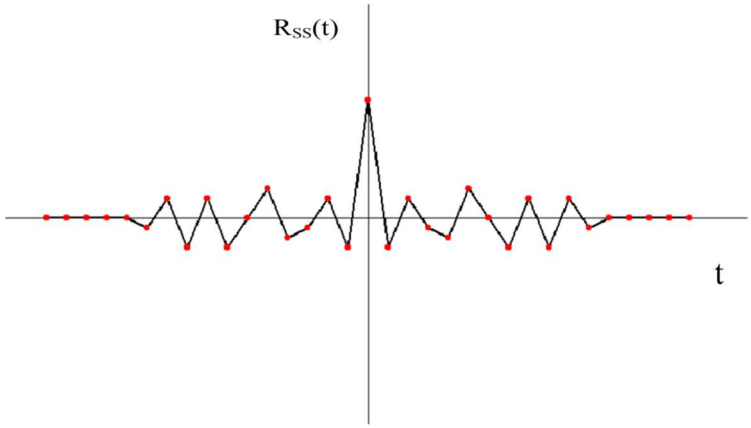

Рис.4 Значения АКФ кодовой последовательности 101011000010

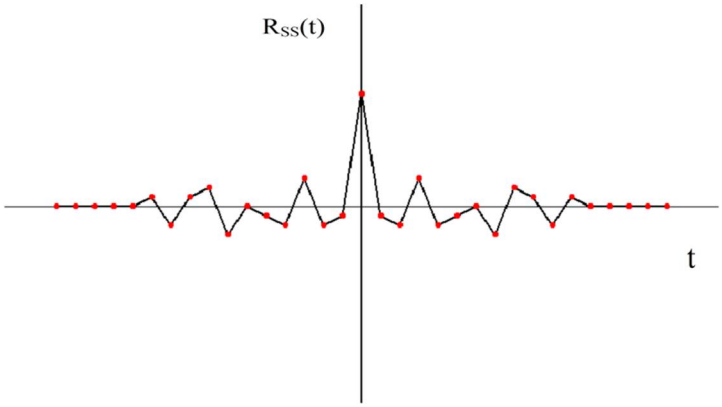

Рис.5 Значения АКФ кодовой последовательности 011011000010

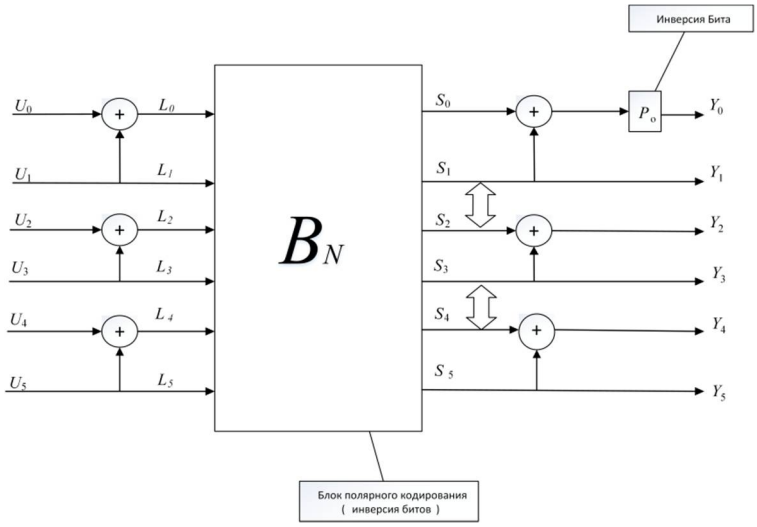

Рис.6 Схема формирования полярной части (информационных битов) длиной 6 бит блочного кода

Анализ сформированных и подкорректированных (через замену предпоследнего бита на противоположный в данных кодовых комбинациях) блочных полярно-разреженных

кодов длиною 12 бит позволяет сделать вывод о том, что данные кодовые комбинации обладают хорошими автокорреляционными свойствами. Что в свою очередь, позволит повысить помехозащищенность системы связи за счёт их применения в процессе передачи данных.

При формировании 12-тибитной полярно-разреженной кодовой последовательности по второму способу полярная часть (информационные биты) длиной 6 бит формируются по схеме, представленной на рисунке 6.

Отметим, что количество всех возможных вариантов для схемы формирования полярной части (информационных битов) длиной 6 бит блочного кода будет составлять 64 (26) кодовых комбинаций.

В таблице 2 представлены некоторые сформированные информационные биты Y0, Y1, Y2, Y3, Y4, Y5 блочного кода с максимальными значениями боковых пиков автокорреляционной функции (АКФ) сформированных кодовых полярно-разреженных последовательностей. Нужно заметить, что вес Хемминга всех комбинаций больше 2 (3 и более). Приступим к их анализу (с точки зрения АКФ).

Таблица 2

Сформированные информационные биты Y_0, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 блочного кода с максимальными значениями боковых пиков АКФ сформированных кодовых полярно-разреженных последовательностей

$U_0U_1U_2U_3U_4U_5$	$Y_0Y_1Y_2Y_3Y_4Y_5$	Разреженная часть	АКФ (макс. знач. – номер бита)
000000	110101	110000	2 – 6-й бит
000001	111010	110000	2 – 6-й бит
000010	111001	110000	3 – 5-й бит
000011	110110	110000	5 – 3-й бит
000100	001011	110000	2 – 8-й бит
000101	001000	110000	3 – 5-й бит
000110	001011	110000	2 – 8-й бит
000111	000100	110000	3 – 9-й бит
001000	000101	110000	3 – 9-й бит
001001	001010	110000	2 – 8-й бит
001010	001001	110000	2 – 8-й бит
001011	001110	110000	2 – 10-й бит
001100	110111	110000	2 – 2-й бит
001101	111000	110000	4 – 6-й бит
001110	111011	110000	2 – 2-й бит
010001	010010	110000	3 – 3-й бит
010100	101111	110000	1 – 3-й бит
011010	100001	110000	5 – 7-й бит
011100	011111	110000	1 – 3-й бит
011101	010000	110000	4 – 6-й бит

Проанализировав таблицу 2, можно сделать вывод, что полученные кодовые комбинации имеют хорошие автокорреляционные свойства, за исключением четырёх кодовых последовательностей – 110110110000, 111000110000, 100001110000, 010000110000 (рис.7, 8, 9). У данных кодовых последовательностей боковые пики АКФ имеют значения, превышающие 25% от максимального значения АКФ (в данных случаях 4 и 5 от уровня 12). Рассчитанные значения АКФ данных кодовых последовательностей представлены на следующих рисунках. Расчет производился в соответствующем разработанном на кафедре «Общепрофессиональных дисциплин» ВАС им. С.М. Будённого программном модуле (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №21162 от 09.12.2021 г.).

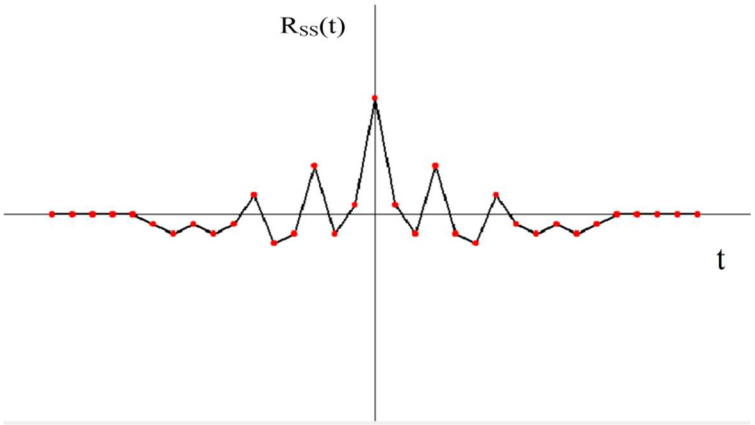

Рис.7 Значения АКФ кодовой последовательности 110110110000

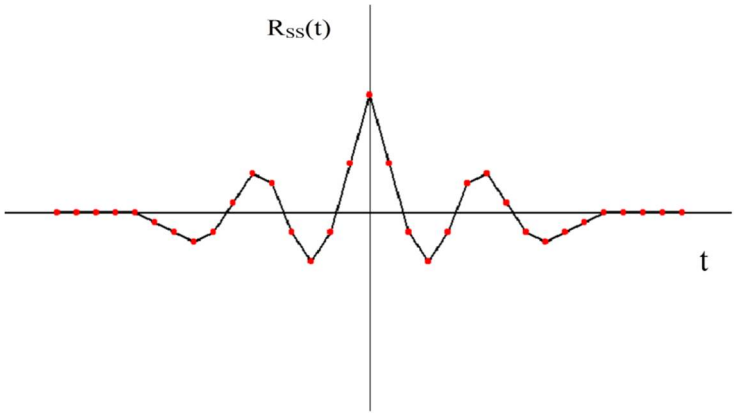

Рис.8 Значения АКФ кодовой последовательности 111000110000

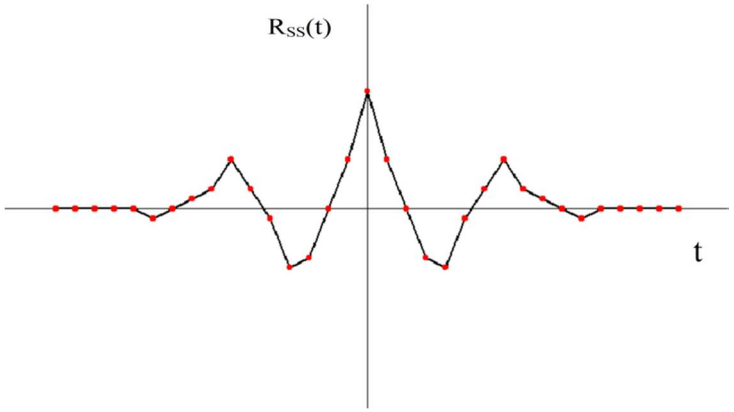

Рис.9 Значения АКФ кодовой последовательности 100001110000

Для того, чтобы снизить уровень боковых пиков АКФ представленных выше четырёх кодовых последовательностей сделаем замену предпоследнего или последнего бита на противоположный. На рис.10,11 можно увидеть, что после замены предпоследнего или последнего битов на противоположные в данных кодовых комбинациях боковые пики АКФ имеют значения, не превышающие 25% от максимального значения АКФ (в данных случаях – 3 от уровня 12). Необходимо отметить, что для снижения уровня боковых пиков АКФ в кодовой комбинации 110110110000 произвели замену последнего бита на противоположный, в остальных трёх случаях произвели замену предпоследнего бита на противоположный.

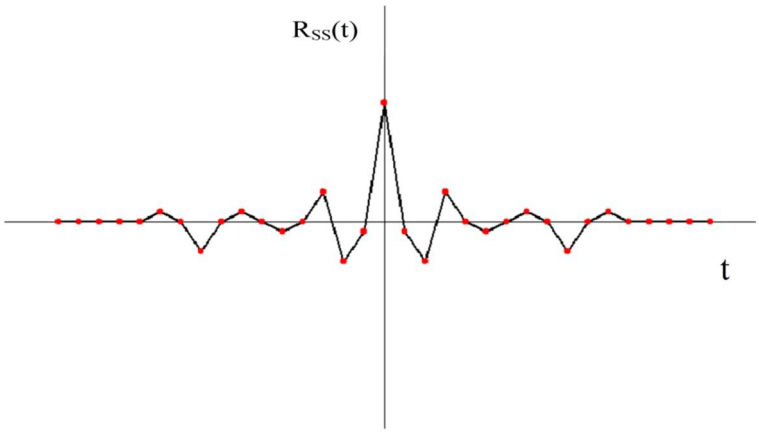

Рис.10 Значения АКФ кодовой последовательности 110110110001

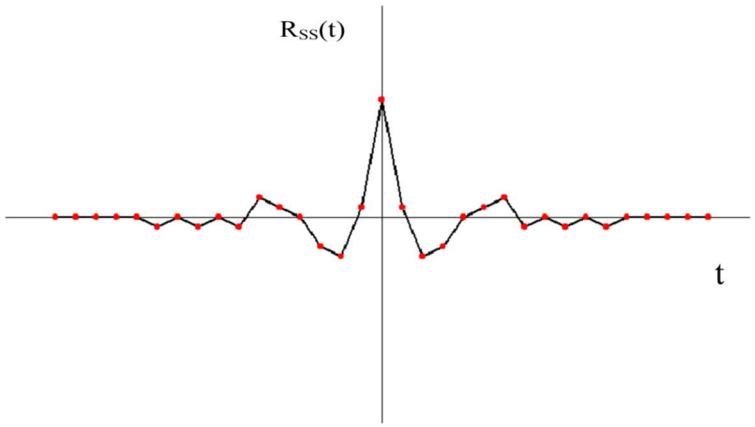

Рис.11 Значения АКФ кодовой последовательности 111000110010

Анализ сформированных и подкорректированных (через замену предпоследнего и последнего битов на противоположные в данных кодовых комбинациях) блочных полярно-разреженных кодов длиною 12 бит позволяет сделать вывод о том, что данные кодовые комбинации обладают хорошими автокорреляционными свойствами. Что в свою очередь, позволит повысить помехозащищенность системы связи за счёт их применения в процессе передачи данных.

В данной статье представлен материал по формированию блочных полярно-разреженных кодов длиною 12 бит. Другими словами, представлен материал по функционированию кодера блочных 12-тибитных кодов.

Для анализа исправляющей способности сформированных блочных полярно-разреженных кодов необходимо исследовать данное семейство блочных кодов на предмет минимального кодового расстояния кода (dmin). Как известно, минимальное кодовое расстояние кода – это минимальное расстояние Хемминга между всеми возможными парами кодовых комбинаций данного кода. С помощью разработанной программы было установлено, что минимальное кодовое расстояние кода сформированных блочных полярно-разреженных кодов равно 2. Из теории кодирования сообщений известно, что количество обнаруженных ошибочных битов равно:

$$t_{обн} = d_{min} - 1 \tag{1}$$

В свою очередь, количество исправляемых ошибочных битов равно:

$$t_{испр} = (d_{min} - 1) / 2 \tag{2}$$

Таким образом, количество обнаруженных и исправляемых ошибочных битов равно 1. Очевидно, что такой результат не может устраивать разработчиков данного семейства блочных полярно-разреженных кодов, поэтому было принято решение об исключении из кода тех кодовых комбинаций, расстояние Хемминга которых равно 2 или 3. Для увеличения количества кодовых комбинаций без изменения структуры формирования кода (кодера) можно использовать разреженную часть большей длины. Иметь ввиду, что разреженная часть всегда формируется по одному и тому же принципу: 1100, 110000, 11000000, 1100000000 и т.д.

Заключение

Новизна способа, рассмотренного в данной статье, заключается в том, что путём моделирования можно добиться, того что минимальное кодовое расстояние кода сформированных блочных полярно-разреженных кодов будет равно 4. В связи с этим количество обнаруженных ошибочных битов равно 3, а исправляемых битов 2.

Представленная методика формирования 12-тибитных полярно-разреженных кодовых последовательностей показывает, что данные кодовые комбинации целесообразно применять как в интересах синхронизации, системы управления, так и для передачи данных. Применение данных кодовых последовательностей будет зависеть от того, битовые поля какого размера в пакетной структуре определены для синхронизации, управления и передачи данных.

Литература

1. *Чилихин Н.Ю.* Разработка и моделирование алгоритмов декодирования полярных кодов в системе информационно-управляющих комплексов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ульяновский государственный технический университет, 2015.

2. *L. Li, Z. Xu and Y. Hu*, "Channel Estimation With Systematic Polar Codes", in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 6, pp. 4880-4889, June 2018.

3. *Потапов И.А., Грецев В.П., Лебеда Е.В., Головизнин В.П.* Расчет и анализ автокорреляционной функции известных бинарных последовательностей // Научно-технический сборник «Труды академии». СПб.: ВАС, 2018.

4. *Трифонов П.В.* Методы построения и декодирования многочленных кодов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, 2018.

5. *Sharma A., Salim M.* Polar code: the channel code contender for 5G scenarios, 2017 International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix), IEEE, Jaipur, India, 2017, pp. 1-6.

6. *Ercan F., Condo C., Hashemi S.A., Gross W.J.* On error-correction performance and implementation of polar code list decoders for 5G, 2017 55th Annual Allerton Conference on Communication , Control, and Computing (Allerton), IEEE, Monticello, IL, USA, 2017.

7. 3GPP TSG RAN WG1, R1-1706965, polar coding design, Huawei, HiSilicon, 2017.

8. *Гладких А.А., Климов Р.В., Чилихин Н.Ю.* Методы эффективного декодирования избыточных кодов и их современные приложения. Ульяновск УлГТУ, 2016. 258 с.

9. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Multiplexing and channel coding (Release 16).

10. *Нефедов В.И., Сигов А.С.* Общая теория связи. М.: Издательство Юрайт, 2016. 495 с.

11. *Ito E, Okamoto K., Kunimori H., Toyoshima M.* An Adaptive Coded Transmission Scheme Utilizing Frozen Bits of Polar Code in Satellite Laser Communications, International Conference on Space Optics ICSO 2018 Chania, Greece.

12. *Бурлаков С.О., Потапов И. А., Дырин В.И., Рублёв А.А.* Итоги науки и техники: Научно-технический сборник № 116. Труды академии. СПб.: ВАС, 2021. С. 192-198.

13. *Corlay V. and Gresset N.* A Simple Sign-Bit Probabilistic Shaping Scheme, IEEE communications letters, Vol. 26, No. 4, Apr. 2022.

14. *Barakatain M., Lentner D., Boecherer G. and Kschischang F.R.* Performance-Complexity Tradeoffs of Concatenated FEC for Higher-Order Modulation, J. Lightw. Technol., Vol. 38, No. 11, June 2020.

15. *Hashemi S. A., Condo C. and Gross W. J.* Fast simplified successive-cancellation list decoding of polar codes, 2017 IEEE WCNCW, March 2017.

16. *Потапов И.А., Дырин В.И., Галкина М.Ю., Рублёв А.А.* Научно-практическая конференцию «Современные тенденции инженерного образования» СПб.: ВАС, 2022. С.335.

17. Multiplexing and Channel Coding, Release 15, 3GPP Standard TS 38.212, V15.8.0, Dec. 2019.

18. *Bocherer G., Prinz T., Yuan P. and Steiner F.* Efficient polar code construction for higher-order modulation, in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops, pp. 1–6, San Francisco, CA, 2017.

19. *Henry D. Pfister A.* Brief Introduction to Polar Codes. Supplemental Material for Advanced Channel Coding

20. *Liu X. et al.* β-expansion A Theoretical Framework for Fast and Recursive Construction of Polar Codes" in Proc IEEE Globecom, Dec. 2017.

METHODOLOGY FOR THE FORMATION OF 12-BIT POLAR SPARSE CODE SEQUENCES

ILYA AI. POTAPOV
PhD, Military Academy of Communications
St. Petersburg, Russia, ilpotapovil@mail.ru

ALEXANDER AI. RUBLEV
Doctoral student, Military Academy of Communications
St. Petersburg, Russia, rublev.aleksandr@gmail.com

VLADIMIR Iv. DYRIN
Teacher, Military Academy of Communications
St. Petersburg, Russia, dviumet@yandex.ru

ISSA AHD
Doctoral student, Military Academy of Communications
St. Petersburg, Russia, 1leonuck@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction: In the conduct of hostilities, the communication system plays an essential role in the management of troops and weapons. Due to the complex interference situation on the part of the enemy, the noise immunity of the communication system always remains relevant. A new method of forming 12-bit polar sparse code sequences is proposed. Task statement: to increase the noise immunity of tropospheric and radio relay communication lines from enemy interference. **Methods:** methods of coding theory in the field of polar codes and calculation of the autocorrelation function of code sequences. **Results:** methods of forming a polar sparse code with a length of 12 bits have been developed. The possibility of increasing the autocorrelation properties of the generated polar-sparse codes is shown. Graphs of autocorrelation functions of polar-sparse code sequences are presented, confirming the theory of increasing the autocorrelation properties of code sequences. **Practical significance:** the developed method make it possible to form polar sparse codes with a length of 12 bits with further improvement, if necessary, of the autocorrelation properties of these codes. **Discussion:** The novelty of the proposed method consists in the fact that the generated polar-sparse code sequences have signal implementations unknown to the enemy, which significantly complicates the process of setting up structural interference on his part.

Keywords: polar sparse code sequences; autocorrelation function of a code sequence; information bits; Hamming weight; block code.

REFERENCES

1. Chilikhin N.Yu. Development and modeling of algorithms for decoding polar codes in the system of information and control complexes. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Ulyanovsk State Technical University, 2015.
2. L. Li, Z. Xu and Y. Hu, "Channel Estimation With Systematic Polar Codes", in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 6, pp. 4880-4889, June 2018.
3. I. A. Potapov, V. P. Gretsev, E. V. Lebedev, V. P. Goloviznin "Calculation and analysis of the autocorrelation function of known binary sequences". Article in the scientific and technical collection "Proceedings of the Academy". St. Petersburg: VAS, 2018.
4. Trifonov P.V. Methods of constructing and decoding polynomial codes. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, 2018.
5. A. Sharma, M. Salim, Polar code: the channel code contender for 5G scenarios, 2017 International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix), IEEE, Jaipur, India, 2017, pp. 1-6.
6. F. Ercan, C. Condo, S.A. Hashemi, W.J. Gross, On error-correction performance and implementation of polar code list decoders for 5G, 2017 55th Annual Allerton Conference on Communication , Control, and Computing (Allerton), IEEE, Monticello, IL, USA, 2017.
7. 3GPP TSG RAN WG1, R1-1706965, polar coding design, Huawei, HiSilicon, 2017.
8. Gladkikh A.A., Klimov R.V., Chilikhin N.Yu., Methods of effective decoding of redundant codes and their modern applications. Ulyanovsk UlSTU, 2016. 258 p
9. Partner project of the 3rd generation; Technical specification of the radio access group network; NR; Multiplexing and coding of channels (issue 16).
10. Nefedov V.I., Sigov A.S. General theory of communication: textbook for undergraduate and graduate studies. - M.: Yurayt Publishing house, 2016. 495 p .
11. K. Ito E. Okamoto H. Kunimori M. Toyoshima, «An Adaptive Coded Transmission Scheme Utilizing Frozen Bits of Polar Code in Satellite Laser Communications», International Conference on Space Optics ICSO 2018 Chania, Greece.
12. Burlakov S.O., Potapov I. A., Dyrin V.I., Rublev A.A., Results of science and technology: Scientific and technical collection No. 116 Proceedings of the Academy. St. Petersburg: VAS, 2021. Pp. 192-198.
13. V. Corlay and N. Gresset, "A Simple Sign-Bit Probabilis- tic Shaping Scheme," IEEE communications letters, Vol. 26, No. 4, Apr. 2022.
14. M.Barakatain, D.Lentner, G.B¨oecherer,and F.R.Kschischang, "Performance-Complexity Tradeoffs of Concatenated FEC for Higher-Order Modulation," J. Lightw. Technol., Vol. 38, No. 11, June 2020.
15. S. A. Hashemi, C. Condo and W. J. Gross, "Fast simplified successive-cancellation list decoding of polar codes," 2017 IEEE WCNCW, March 2017.
16. Potapov I.A., Dyrin V.I., Galkina M.Yu., Rublev A.A., Scientific and practical conference "Modern trends in engineering education" St. Petersburg: VAS, 2022. P.335.
17. Multiplexing and Channel Coding, Release 15, 3GPP Standard TS 38.212, V15.8.0, Dec. 2019.
18. G. Bocherer, T. Prinz, P. Yuan and F. Steiner, "Efficient polar code construction for higher-order modulation," in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops, pp. 1–6, San Francisco, CA, 2017.
19. Henry D. Pfister A Brief Introduction to Polar Codes // Supplemental Material for Advanced Channel Coding.
20. X. Liu et al., "β-expansion A Theoretical Framework for Fast and Recursive Construction of Polar Codes" in Proc IEEE Globecom, Dec. 2017.