

LDPC кодтері негізінде байланыс арнасындағы сигналдардың тұтастығын зерттеу

САЙЛАУҚЫЗЫ Жұлдыз, т.ғ.м., аға оқытушы, s_k_zhuldiz@mail.ru,
Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан, 100027, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56.

Аңдатпа. Жұмыстың мақсаты – LDPC кодтері негізінде байланыс арнасындағы сигналдардың тұтастығын зерттеу. Зерттеуде ықтималдық теориясы, түзетуші кодтарының алгебралық теориясы және ақпарат теориясы әдістері қолданылды. Математикалық модельдер мен алгоритмдер негізінде ақпараттарды кодтау және декодтау үшін Python-скриптік бағдарламалау тілінде бағдарламалық қамтама әзірленді және LDPC кодтарының шуылға төзімділігін зерттеу үшін ақ Гаусс шуы таңдалынды (AWGN – Additive White Gaussian Noise). Қателерді түзетудің алгоритмдері үшін LDPC кодтарын декодтаудың күрделілігін есептеу қатынастары бойынша бағдарламалық қамтама жүзеге асырылды.

Кілт сөздер: LDPC, кодер, декодер, бит, AWGN, BER, SNR, алгоритм.

Кіріспе. Қазіргі уақытта мәліметтерді өңдеуге және таратуға байланысты бағыттар кең таралған және қарқынды дамуды жалғастыруда. Яғни, жергілікті желілер, ұялы байланыс, сымсыз желілер, деректерді сақтау құрылғылары т.б. арқылы ақпараттарды тарату көздеріне тоқталып кетсек болады. Маңызды міндет-ақпараттың таратылуы барысында қолданыстағы әдістерінің тиімділігін арттыру, соның ішінде берілген ақпараттың сенімділігін арттыратын алгоритмдерді әзірлеу. Шуылға төзімді кодтау процедураларын қолдана отырып ақпаратты өңдеу қатенің қажетті ықтималдығын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Берілген шуылға төзімділікті қамтамасыз ету кезінде жоғары жылдамдықты сақтау қажет болған жағдайда, қателіктермен тиімді күресуге мүмкіндік беретін және жылдам кодтау/декодтау процедуралары бар кодтардың болуы қажет.

Осы мақсатта қолдануға болатын көптеген кодтар бар. Қазіргі уақытта төмен тығыздықтағы паритет-тексеру коды кеңінен қолданылады (low-density parity-check codes, бұдан әрі LDPC коды). Төмен тығыздықтағы паритет-тексеру кодтарды 1963 жылы Р. Галлагер ұсынған [1]. LDPC коды ақпаратты беруде пайдаланылатын код, паритетті тексерумен блоктық сызықтық кодтың ерекше жағдайы. Ерекшелігі-тексеру матрицасының маңызды элементтерінің төмен тығыздығы, соның арқасында кодтау құралдарын жүзеге асырудың салыстырмалы қарапайымдылығына қол жеткізіледі.

Сигнал беру кезінде негізгі мақсат әрқашан ең аз қателермен ең жоғары бит жылдамдығымен хабарлама жіберу болып табылады. Сымсыз технологияда Шеннон теоремасы сигналды берудің сенімділігі белгілі бір сигналдың шуылдық коэффициентінен (SNR) жоғары болуы мүмкін деп

тұжырымдайды. Ақпаратты жіберудің сенімділігі желілік схеманың кодталуы мен декодталуына байланысты.

Жұмыстың мақсаты: LDPC кодтерін тиімді пайдалана отыра AWGN байланыс арнасында ақпаратты тарату барысында сигналдардың тұтастығын зерттеу.

Зерттеуде ықтималдық теориясы, түзетуші кодтарының алгебралық теориясы және ақпарат теориясы әдістері қолданылады. Код сипаттамаларын талдау үшін әмбебап Python-скриптік бағдарламалау тілінде LDPC кодын жүзеге асыратын бағдарламалық қамтама әзірленді. Ақпаратты беру аддитивті Гаусс ақ шуымен (AWGN – Additive White Gaussian Noise) арна бойынша бит пакеттерімен жүзеге асырылды.

LDPC кодының сипаттамасы. Кез келген сызықтық блок коды сияқты, LDPC кодын $k \times n$ өлшемді G генератор матрицасы арқылы сипаттауға болады, мұндағы k – ақпараттық тізбектің ұзындығы және n – код блогының ұзындығы. Содан кейін u ақпараттық тізбегін G генерациялайтын матрицаға көбейту арқылы C код векторы алынады:

$$C = u \cdot G. \quad (1)$$

Жүйелі LDPC коды үшін генерациялаушы матрицаны $G = [I, P]$ түрінде көрсетуге болады, мұндағы $I - k \times k$ сәйкестік матрицасы. Содан кейін код $H = [PT, I]$ паритеттік тексеру матрицасы арқылы сипатталады.

$$C \cdot H^T = 0. \quad (2)$$

Мұндай матрицаның элементтері тексеру таңбалары есептелетін тексеру теңдеулерінің коэффициенттері болып табылады. Тиімді LDPC кодтары үшін H паритеттік тексеру матрицасы

сирек болуы керек, ал ондағы бірліктердің тығыздығы, әдетте, бірнеше ондаған және жүздеген мың элементтерді құрайды. Төмен тығыздықтағы кодтар матрицалық көріністің арқасында өз атауын алды.

LDPC кодтарын декодтау үшін пайдаланылатын декодтау алгоритмдерінің тобы хабар алмасу алгоритмдерін біріктіреді. «Sum-Product» алгоритміне негізделген дешифратор алгоритмінің барлық дерлік кезеңдерінде және формулаларында қолданылатын гиперболалық тангенс және оның логарифмі сияқты метрикуаны есептеу үшін күрделі математикалық функцияларды пайдаланады. Битті айналдыру алгоритміне негізделген декодерді орындау салыстырмалы түрде оңай. «Bit-flipping» шешімдердегі дешифратордың жұмысы шуға төзімділік тұрғысынан төмен болғанымен, іске асыруда қарапайымдылығы оған артықшылық береді [2-5].

LDPC коды Таннер графигі арқылы берілген [6,7] (1-сурет). Таннер графигіндегі түйіндер ақпараттық және тексеру түйіндері деп аталады, оларды сәйкесінше C және F деп белгілейміз. Графикте F әрбір тексеру теңдеуі үшін тексеру түйіндері f және әрбір код сөз символы үшін бір C ақпараттық түйіндері c болатынын атап өтуге болады.

(8, 16) – кодта генератор матрицасы (G) және паритет-тексеру матрицасы (H) келесі пішінге ие:

$$G_{16,8} = \begin{pmatrix} 1000000000000111 \\ 0100000000001101 \\ 0010000001110100 \\ 0001000001100111 \\ 0000100001110111 \\ 0000010000001100 \\ 0000001001000101 \\ 0000000101101000 \end{pmatrix} \cdot$$

$$H_{16,8} = \begin{pmatrix} 0000000010000000 \\ 0011101101000000 \\ 0011100100100000 \\ 0010100000010000 \\ 0100010100001000 \\ 1111111000000100 \\ 1001100000000010 \\ 1101101000000001 \end{pmatrix} \cdot$$

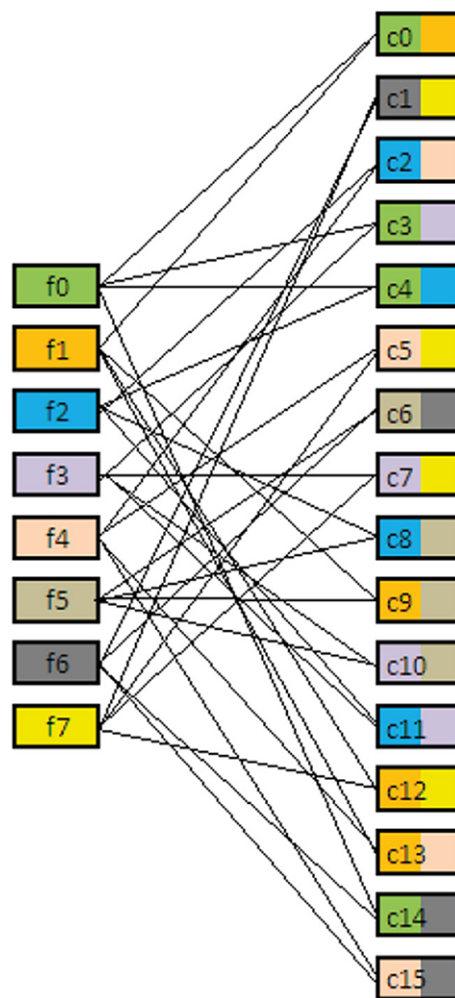
Ақпараттық таңбаларды кодтауды қарастырайық [$u = 01001110$].

1. [u] ақпараттық таңбаларын және G матрицасын көбейту арқылы біз код сөзін аламыз: 01001110 00110011

2. Алынған код сөзі шартты қанағаттандыруы тиіс.

$$U \cdot H = 0. \quad (3)$$

Декодтау әдісі. Bit-flipping алгоритмі LDPC кодтары үшін хабарды қатты декодтау әдісі болып табылады. Мысалда $u = 01001010$ 00110011 кодтық сөзі бар хабарлама шулы байланыс арнасына жіберіледі, егер оны кодтық сөздерге жататындығын тексерсек, нәтиже нөлге тең емес, сондықтан « u »



1-сурет – Сызықтық блок коды үшін тонер графигі (8, 16)

векторы кодтық сөз емес, бұл хабарламаны жіберу кезінде қателер пайда болғаны анықталды. Инициализация орындалады және декодер кірісінен алынған мәндер биттік түйіндерге жіберіледі. Бірінші қадамда тексеру түйіндері разрядтық түйіндерден мәндерді оқиды және екінші қадамға хабарламалар жасайды. Екінші қадамда тексеру түйіндері мәндерді салыстыру үшін разрядтық түйіндерге жібереді.

Соңғы қадам жаңа хабарламаның H матрицасының тексеру теңдеулеріне сәйкестігін тексеруді бастайды (0-7 түйін үшін).

$$\begin{aligned} f_0 &= y_8 = 0, \\ f_1 &= y_2 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus y_6 \oplus y_7 \oplus y_9 = 0, \\ f_2 &= y_2 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus y_7 \oplus y_{10} = 0, \\ f_3 &= y_2 \oplus y_4 \oplus y_{11} = 0, \\ f_4 &= y_1 \oplus y_5 \oplus y_7 \oplus y_{12} = 0, \\ f_5 &= y_0 \oplus y_1 \oplus y_2 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus y_5 \oplus y_6 \oplus y_{13} = 0 = 0, \\ f_6 &= y_0 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus y_{14} = 0, \\ f_7 &= y_0 \oplus y_1 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus y_6 \oplus y_{15} = 0. \end{aligned}$$

Тексеру нәтижесінде сәйкессіздіктер табылмады, сондықтан алгоритм тоқтап, қайтарылады 01001110 00110011.

Нәтиже. Математикалық модельдер мен алгоритмдер негізінде кодтау және декодтау үшін Python-скриптік бағдарламалау тілінде бағдарламалық қамтама әзірленді және LDPC кодтарының шуылға төзімділігін зерттеу үшін ақ Гаусс шуы таңдалынды (деректер арнасында байқалатын кедергі әсерінің түрі).

Кодтау мен декодтауды қамтитын әзірленген жүйенің құрылымдық сұлбасы 2-суретте көрсетілген.

Кедергіге төзімділік сипаттамасы ретінде биттік қате ықтималдығының – BER (ағылшынша Bit Error Rate – биттік сигнал-шуыл қатынасына) тәуелділігін қолданамыз. 3-суретте әртүрлі итерациялар санымен сенімділік үшін сенімді тарату

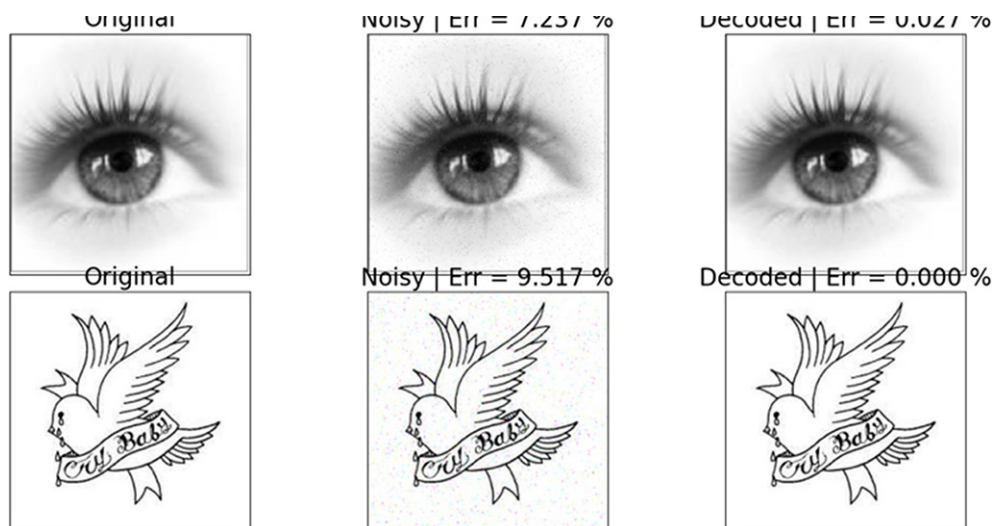
алгоритмін пайдаланып декодтау кезінде зерттелетін төмен тығыздықты кодқа BER тәуелділігі көрсетілген.

BER (bit Error Rate) – бит бойынша қателер жиілігі (BER) уақыт бірлігіне бит қателіктерінің санын сипаттайды. Бит бойынша қателер коэффициенті (сонымен бірге – BER деп те аталады) – зерттелетін уақыт кезеңі ішінде берілген биттердің жалпы санына бөлінген бит қателіктерінің саны. Қателік коэффициенті өлшемсіз шама болып табылады және көбінесе пайызбен көрсетіледі.

SNR (signal-to-noise ratio) – жиі кездесетін шама, әдетте, күтілетін сигналдың қуатының қабылдағыштың айналасындағы шу қуатына қатынасы (жүйе компоненттерінің жылу шуы да осы

Битті ауыстыру алгоритмі (bit-flipping algorithm)

Түйін	y_i қабылдау	Бақылау түйіндерінен хабарлар						Шешім
c_0	0	$f_5 \rightarrow 1$	$f_6 \rightarrow 0$	$f_7 \rightarrow 0$				0
c_1	1	$f_4 \rightarrow 0$	$f_5 \rightarrow 0$	$f_7 \rightarrow 1$				1
c_2	0	$f_1 \rightarrow 0$	$f_2 \rightarrow 0$	$f_3 \rightarrow 0$	$f_5 \rightarrow 1$			0
c_3	0	$f_1 \rightarrow 0$	$f_2 \rightarrow 0$	$f_5 \rightarrow 1$	$f_6 \rightarrow 0$	$f_7 \rightarrow 0$		0
c_4	1	$f_1 \rightarrow 1$	$f_2 \rightarrow 1$	$f_3 \rightarrow 1$	$f_5 \rightarrow 0$	$f_6 \rightarrow 1$	$f_7 \rightarrow 1$	1
c_5	0	$f_4 \rightarrow 1$	$f_5 \rightarrow 1$					1
c_6	1	$f_1 \rightarrow 1$	$f_5 \rightarrow 0$	$f_7 \rightarrow 1$				1
c_7	0	$f_1 \rightarrow 0$	$f_2 \rightarrow 0$	$f_4 \rightarrow 1$				0
c_8	0	$f_0 \rightarrow 0$						0
c_9	0	$f_1 \rightarrow 0$						0
c_{10}	1	$f_2 \rightarrow 1$						1
c_{11}	1	$f_3 \rightarrow 1$						1
c_{12}	0	$f_4 \rightarrow 0$						0
c_{13}	0	$f_5 \rightarrow 0$						0
c_{14}	1	$f_6 \rightarrow 1$						1
c_{15}	1	$f_7 \rightarrow 1$						1



2-сурет – Гаусс шуын енгізу арқылы LDPC кодын қолдану нәтижесі

шулардың ажырамас бөлігі болып табылады).

BER және SNR сипаттамалары бойынша LDPC кодының нәтижесі 3-суретте көрсетілген.

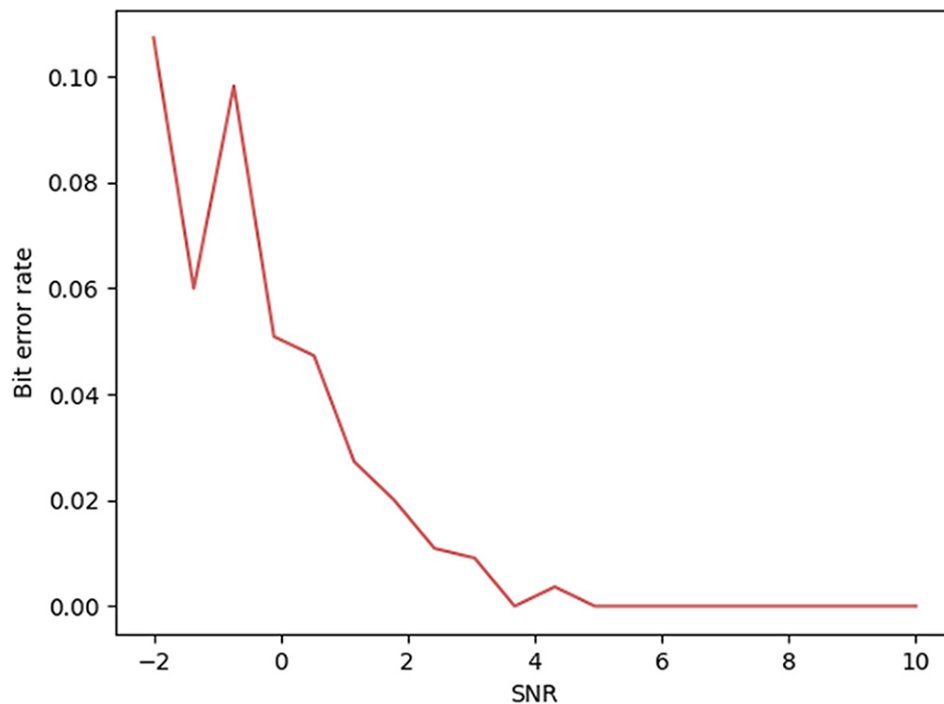
Модельдеу нәтижелерін талдау: суреттен LDPC кодтау және декодтаудан кейін кодтық сөздің шуғылға қарсы тұру қабілеті айтарлықтай жақсарғанын көруге болады. Осылайша LDPC коды тамаша өнімділігі бар арна қателерін түзету коды екенін растайды.

Енді параллель және тізбектей декодтаулары

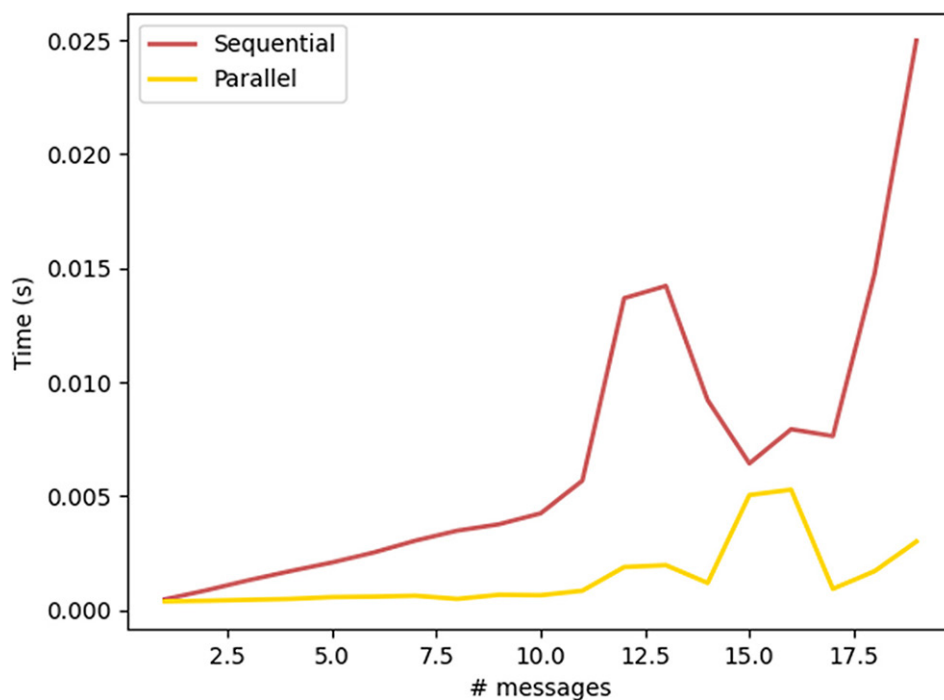
үшін берілістерді имитациялаймыз және бит қателік жылдамдығын бағалау арқылы қате жылдамдығын анықтаймыз (4-сурет).

Осылайша, түзету кодтарын пайдалану бұрмаланған деректерді анықтауға және мүмкіндігінше түзетуге мүмкіндік береді, бұл ретте бұрын жазылған деректер мен олардың құрылымы өзгеріссіз қалатындығына көз жеткіздік.

Қорытынды. Зерттеуде паритетті тексерудің тығыздығы төмен кодтардың көмегімен ақпарат-



3-сурет – BER және SNR сипаттамалары бойынша LDPC кодының нәтижесі



4-сурет – LDPC кодының шуға төзімділігінің сипаттамасы

ты арналарда өңдеу және жіберу қарастырылды. Ақ Гаусс шуы қосылған арнада модельдеу жүргізілді. Модельдеу ұсынылған конструкциялар беріліс тиімділігінің жоғарылауын, яғни декодтаудың күрделілігін төмендете отырып, ең жақсы белгілі құрылымдармен салыстырылатын қателік

ықтималдығын қамтамасыз ететіндігін көрсетті.

Келешекте алынған зерттеу нәтижелері арқылы әр түрлі арнада ақпараттарды жіберу ба-рысында, шифрлеу және дешифрлеу әдістерімен толықтырылып, **сигналдар тұтастығының тиімділігін бақылауға қолданыс табады.**

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Gallager R.G. Low Density Parity Check Codes. Cambridge, MA: MIT Press, 1963.
2. Johnson S.J. Iterative error correction turbo, low-density parity-check and repeat-accumulate codes. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, P. 335.
3. Воробьев К.А. Методы построения и декодирования не двоичных низкоплотностных кодов // Теория и практика системного анализа. 2010. Т. II. С. 96-102.
4. Тикменов В.Н., Ухандеев В.И., Собченко М.И., Денискин М.Ю. Система помехоустойчивого кодирования на основе квазциклических кодов с низкой плотностью проверок на четность // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 4. – С. 399-409.
5. Сайлауқызы Ж., Горлов С.С. Исследование принципов реализации LDPC кода для каналов с АБГШ // Eger, Hungary, Materials of the International Scientific Conference «Global Science and Innovations», 2018, February 28, 2018. – С. 13-15.
6. Сайлауқызы Ж. LDPC кодының бағдарламаланатын логикалық интегралды сұлба негізінде жүзеге асу қағидасын зерттеу / Издательство «Государственный университет имени Шакарима города Семей» // Вестник государственного университета имени Шакарима города Семей. 2018. № 2. С. 13-15.

Исследование целостности сигналов в канале связи на основе LDPC кодера

САЙЛАУҚЫЗЫ Жұлдыз, м.т.н., старший преподаватель, *s_k_zhuldiz@mail.ru*, Карагандинский технический университет, Казахстан, 100027, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56.

Аннотация. Цель работы – исследование целостности сигналов в канале связи на основе кодера LDPC. В исследовании использовались методы теории вероятностей, алгебраической теории корректирующих кодов и теории информации. На основе математических моделей и алгоритмов для кодирования и декодирования информации, разработано программное обеспечение на языке Python-скриптового программирования и выбран белый Гауссовский шум (AWGN – Additive White Gaussian Noise) для исследования помехоустойчивости кодов LDPC. Реализовано программное обеспечение по вычислению сложности декодирования кодов LDPC для алгоритмов исправления ошибок.

Ключевые слова: LDPC, кодер, декодер, бит, AWGN, BER, SNR, алгоритм.

Investigation of the Integrity of Signals in a Communication Channel Based on an LDPC Encoder

SAILAUKYZY Zhuldiz, Mast. Tech. Sci., doctoral student, Senior Lecturer, *s_k_zhuldiz@mail.ru*, Karaganda Technical University, Kazakhstan, 100027, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56.

Abstract. The purpose of the work is to study the integrity of signals in a communication channel based on the LDPC encoder. The research used methods of probability theory, algebraic theory of correcting codes and information theory. Based on mathematical models and algorithms for encoding and decoding information, software was developed in the Python-scripting programming language and white Gaussian noise (AWGN – Additive White Gaussian Noise) was selected to study the noise immunity of LDPC codes. Implemented software for calculating the complexity of decoding LDPC codes for error correction algorithms.

Keywords: LDPC, encoder, decoder, bit, AWGN, BER, SNR, algorithm.

REFERENCES

1. Gallager R.G. Low Density Parity Check Codes. Cambridge, MA: MIT Press, 1963.
2. Johnson S.J. Iterative error correction turbo, low-density parity-check and repeat-accumulate codes. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, P. 335.
3. Vorobyev K. A. Methods of constructing and decoding non-binary low-density codes // Theory and practice of system analysis. 2010. Vol. II. pp. 96-102.
4. Tikmenov V.N., Ukhandeev V.I., Sobchenko M.I., Deniskin M.Yu. System of noise-resistant coding based on quasi-cyclic codes with a low density of parity checks // Izv. vuzov. Electronics. – 2018. – Vol. 23. – No. 4. – pp. 399-409.
5. Sailaukyzy Zh., Gorlov S.S. Investigation of the principles of implementing LDPC code for channels with ABGS// Eger, Hungary, Materials of the International Scientific Conference «Global Science and Innovations», 2018, February 28, 2018. – pp. 13-15.
6. Sailaukyzy J. LDPC kodynyn bagdarlamalanatyn logikalik integraldy sulba negizinde zhuzege asu kagidasyn zertteu / Publishing house «Shakarim State University of Semey» // Bulletin of Shakarim State University of Semey. 2018. No. 2. pp. 13-15.