МРНТИ 28.21.19 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.3.28-976**

АҚПАРАТТЫҢ ШУЛЫ ОРТАДА СЕНІМДІ ТАСЫМАЛДАУЫН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ ҮШІН LDPC-ДЕКОДЕРЛЕРІНІҢ ӨНІМДІЛІГІН ТАЛДАУ

[1]М.М. Жакина, [1]Ж. Сайлауқызы, [1]Б. Рысбекқызы, [2]Э.У. Эгамбердиев, [1]А.Н. Аманов

[1]Карагандинский Технический Университет им. Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан,
[2]ТОО «Adal damu», Астана, Казахстан

Корреспондент-автор: m.zhakina@bk.ru

Мақалада аддитивті ақ гаусстық шуылы (AWGN) бар байланыс арнасында әртүрлі төмен тығыздықты тексеру кодтары (LDPC) негізінде құрылған декодтау алгоритмдерінің өнімділігіне салыстырмалы талдау ұсынылады. Зерттеудің негізгі мақсаты — AWGN жағдайында ақпараттың сенімді берілуін қамтамасыз етуге қабілетті ең тиімді LDPC декодерлерін анықтау. Модельдеу үшін AFF3CT бағдарламалық құралы пайдаланылды, ол декодерлердің жұмысын егжей-тегжейлі талдауға және модель параметрлерін икемді баптауға мүмкіндік береді. Байланыс арнасы арқылы деректерді беру үдерісі келесі негізгі кезеңдерді қамтиды: деректер генерациясы, LDPC кодтау, модуляция (жұмыста BPSK қолданылады), AWGN арнасына шу қосу, демодуляция және декодтау. Зерттеу шеңберінде келесі LDPC декодерлері қарастырылды: GALA, GALB, GALE, PPBF, WBF және MWBF. Өнімділікті бағалау метрикалары ретінде биттік қателік жылдамдығы (BER) және кадрлық қателік жылдамдығы (FER) қолданылды. Модельдеу нәтижелері BP_FLOODING және BIT_FLIPPING алгоритмдерінің тиімділігі шу қарқындылығы мен модель параметрлеріне тәуелді екенін көрсетті. Талдау нәтижелері GALE алгоритмінің ұзындығы 20480 бит болатын хабарламалар үшін ең тиімді болып табылатынын көрсетеді. Сонымен қатар, есептеу ресурстары шектеулі жүйелерде итерация саны аз BIT_FLIPPING типті декодерлер де жоғары тиімділік көрсете алады. Ал қысқа хабарламалар жағдайында GALE немесе MWBF декодерлері анағұрлым тиімді болып табылады.

Түйін сөздер: төмен тығыздықты паритет-тексеру коды, декодтау алгоритмдері, бит қателерінің жылдамдығы, кадр қатесінің жылдамдығы; байланыс жүйесі, шуды түзететін кодтау.

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ LDPC-ДЕКОДЕРОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ЗАШУМЛЁННОЙ СРЕДЫ

[1]М.М. Жакина, [1]Ж. Сайлауқызы, [1]Б. Рысбекқызы, [2]Э.У. Эгамбердиев, [1]А.Н. Аманов

[1]Карагандинский Технический Университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан,
[2]ТОО «Adal damu», Астана, Казахстан,
e-mail:m.zhakina@bk.ru

В данной статье представлен сравнительный анализ производительности различных алгоритмов декодирования LDPC-кодов в условиях канала с аддитивным белым гауссовым шумом (AWGN). Целью исследования является идентификация наиболее эффективных методов LDPC-декодирования, обеспечивающих надёжную передачу информации в условиях воздействия AWGN. Для проведения моделирования использовался инструмент AFF3CT, предоставляющий широкие возможности для точной настройки экспериментальных параметров и детального анализа работы декодеров. Процесс передачи данных по каналу связи включает следующие ключевые этапы: генерацию исходных данных, кодирование с применением LDPC-кодов, модуляцию (в данной работе используется BPSK), добавление шума AWGN, демодуляцию и последующее декодирование. В рамках исследования рассмотрены следующие алгоритмы LDPC-декодирования: GALA, GALB, GALE, PPBF, WBF и MWBF. В качестве метрик оценки производительности применялись показатели битовой ошибки (BER) и ошибки на кадр (FER). Результаты численного моделирования продемонстрировали, что алгоритмы BP_FLOODING и BIT_FLIPPING, реализуемые в различных декоде-

рах, проявляют неодинаковую эффективность в зависимости от уровня шума и параметров моделирования. Анализ полученных данных позволяет заключить, что алгоритм GALE демонстрирует наивысшую эффективность при декодировании сообщений длиной 20480 бит. В условиях ограниченных вычислительных ресурсов алгоритмы с малым числом итераций, в частности на основе BIT_FLIPPING, также могут обеспечивать приемлемую производительность. Для декодирования коротких сообщений наиболее целесообразным выбором являются декодеры MWBF или GALE.

Ключевые слова: код с малой плотностью проверок на чётность, алгоритмы декодирования, частота ошибок в битах, частота ошибок в кадрах; система связи, помехоустойчивое кодирование.

THE PERFORMANCE ANALYSIS OF LDPC-DECODERS TO ENSURE THE RELIABLE DATA TRANSMISSION IN A NOISY ENVIRONMENT

[1]M.M. Zhakina✉, [1]Zh. Sailaukyzy, [1]B. Rysbekkyzy, [2]E.U. Egamberdiev, [1]A.N. Amanov

[1]Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,
[2]TOO «Adal damu», Astana, Kazakhstan,
e-mail:m.zhakina@bk.ru

The article presents a comparative analysis of the performance of various LDPC decoding algorithms in a channel with additive white Gaussian noise (AWGN). The objective of the study is to identify the most efficient LDPC decoding methods that provide reliable data transmission under AWGN conditions. The AFF3CT tool was used for the simulation, which provides ample opportunities for fine-tuning the experimental parameters and detailed analysis of the decoder operation. The process of data transmission over a communication channel includes the following key stages: generation of initial data, encoding using LDPC codes, modulation (BPSK is used in this paper), adding AWGN noise, demodulation, and subsequent decoding. The following LDPC decoding algorithms were considered in the study: GALA, GALB, GALE, PPBF, WBF, and MWBF. The bit error rate (BER) and frame error rate (FER) were used as performance evaluation metrics. The results of numerical simulation demonstrated that the BP_FLOODING and BIT_FLIPPING algorithms implemented in different decoders exhibit different efficiency depending on the noise level and simulation parameters. Analysis of the obtained data allows us to conclude that the GALE algorithm demonstrates the highest efficiency when decoding messages of 20480 bits in length. Under conditions of limited computing resources, algorithms with a small number of iterations, in particular based on BIT_FLIPPING, can also provide acceptable performance. For decoding short messages, the most appropriate choice is the MWBF or GALE decoders.

Keywords: low-density parity check code, decoding algorithms; bit error rate; frame error rate; communication system; noise-resistant coding.

Введение. В современных цифровых системах радиосвязи одной из приоритетных задач остаётся обеспечение надёжной и безошибочной передачи данных. В связи с этим активно ведутся исследования, направленные на разработку и внедрение новых методов и алгоритмов коррекции ошибок, способных эффективно противостоять шумам и помехам, возникающим в каналах связи [1]. При передаче информации через зашумлённые каналы возможно искажение данных, что требует применения помехоустойчивого кодирования с целью повышения достоверности принимаемых сообщений [2].

Одним из наиболее эффективных и широко применяемых методов помехоустойчивого кодирования являются коды с низкой плотностью проверок на чётность (Low-Density Parity-Check, LDPC), которые демонстрируют производительность, близкую к пределу Шеннона. Благодаря своей энергоэффективности, высокой пропускной способности и сравнительно низкой аппаратной сложности, LDPC-коды получили широкое распространение в современных стандартах беспроводной связи, включая 802.11n (Wi-Fi), 802.11ad (WiGig), 802.16e (WiMAX), 802.15.3c (WPAN), DVB-S2 и 5G [3].

Ключевым фактором, определяющим эффективность LDPC-кодов, является выбор алгоритма декодирования. Среди множества известных решений особое место занимают алгоритмы распространения достоверности (BP), модифицированный алгоритм взвешенной перестановки битов (MWBF), а также вероятностный алгоритм параллельной перестановки битов (PPBF) [4-7]. Каждый из них обладает своими преимуществами и находит применение в различных условиях передачи. Например, алгоритмы BP показывают высокую эффективность при низком уровне шума, тогда как методы MWBF демонстрируют лучшие результаты в условиях сильного зашумления [8].

Наряду с традиционными подходами, в последние годы возрастающий интерес вызывают многопороговые декодеры (Multi-Threshold Decoders, MTD), отличающиеся простой архитектурой, высокой скоростью работы и низкими требованиями к вычислительным ресурсам. Несмотря на относительно малую распространённость, они обладают высоким потенциалом в системах с ограниченными ресурсами. В дальнейшем результаты, полученные при исследовании LDPC-декодеров, планируется использовать в качестве эталонной базы для сравнения с алгоритмами многопорогового декодирования. Такое сравнение позволит выявить преимущества и ограничения обоих подходов, а также определить наиболее эффективные решения в зависимости от характеристик канала и требований к системе.

Целью данного исследования является проведение сравнительного анализа эффективности различных алгоритмов LDPC-декодирования в условиях канала с аддитивным белым гауссовым шумом (AWGN), а также формирование основы для дальнейшего сравнения с алгоритмами многопорогового декодирования (Multi-Threshold Decoding, MTD). Особое внимание уделяется выявлению тех алгоритмов, которые обеспечивают наилучший баланс между надёжностью передачи данных и устойчивостью к шуму при различных длинах сообщений и параметрах декодирования. Исследование направлено на определение оптимальных решений для использования в системах связи, где критически важны точность восстановления данных и эффективность использования вычислительных ресурсов. В качестве инструмента моделирования выбран AFF3CT, что позволило провести глубокий анализ производительности декодеров на разных уровнях SNR, с акцентом на два ключевых критерия - частоту битовых и кадровых ошибок (BER и FER).

Материалы и методы. Процесс передачи данных по каналу связи включает в себя несколько ключевых этапов: генерацию данных, кодирование, модуляцию, добавление шума в канал AWGN, демодуляцию и декодирование (рис.1).

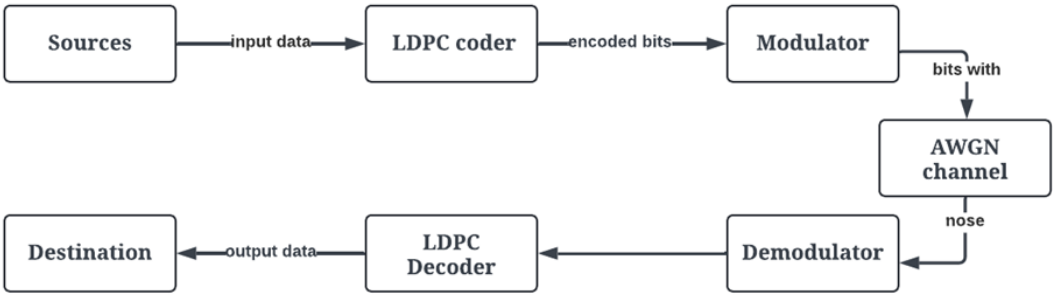


Рис.1 - Простая модель коммуникационной системы

На рис.1 показана часто используемая модель одноканальной системы связи. Независимо от конкретного применения и конфигурации, все системы передачи информации неизменно включают в себя три основные подсистемы - передатчик, канал и приемник [9].

Передача данных по каналу связи начинается с генерации исходных данных. Затем эти данные передаются через LDPC-кодер, который добавляет избыточности данным для повышения надежности передачи. Закодированные данные проходят этап модуляции, на котором цифровые данные преобразуются в аналоговые сигналы для передачи по каналу. В этой работе используется BPSK (двоичная фазовая манипуляция) модуляция, которая является простым и эффективным методом модуляции [10]. Во время передачи по каналу данные подвержены помехам. Канал с аддитивным белым гауссовым шумом (AWGN) моделирует эффекты шума, который обычно распространяется с нулевым средним значением и постоянной спектральной плотностью мощности. Шум добавляется к модулированному сигналу, что приводит к искажению передаваемых данных [11]. Основным показателем в таких условиях является отношение сигнал/шум (SNR), которое влияет на вероятность ошибок передачи. На приемном конце искаженный сигнал проходит через демодулятор, который преобразует аналоговый сигнал обратно в цифровой формат. Затем демодулированные данные вводятся в декодер LDPC, который выполняет процесс декодирования, используя один из алгоритмов, таких как BP_FLOODING или BIT_FLIPPING, для восстановления исходных данных.

Для изучения производительности LDPC декодеров в реальных каналах связи был разработан и активно используется инструмент AFF3CT, который предоставляет широкий спектр инструментов для моделирования работы каналов связи и оценки эффективности различных кодеров [12]. AFF3CT позволяет гибко настраивать параметры моделирования и анализировать результаты, что делает его незаменимым инструментом для исследования цифровых коммуникаций.

В ходе экспериментов были рассмотрены следующие алгоритмы декодирования LDPC:

Алгоритм GALA (LDPC-RL09)[13];

Алгоритм GALB (LDPC-DDB14)[13][14];

Алгоритм ГЕЙЛА (LDPC-DDB14)[15];

Алгоритм PPBF (LDPC-LGK+19)[16];

Алгоритм WBF (LDPC-WNY+10)[17];

Алгоритм MWBF (LDPC-WNY+10)[18].

Основными параметрами моделирования были [12]:

Тип шума. Канал AWGN характеризуется наличием аддитивного белого гауссовского шума, который имеет нормальное распределение с нулевым средним значением и постоянной спектральной плотностью мощности. Эта модель шума широко используется для оценки производительности систем связи, поскольку она точно имитирует реальные условия передачи данных.

Диапазон шумов. От 0 до 10 dB в зависимости от кодера. Диапазон уровней шума, выраженный в децибелах (dB), указывает на различные соотношения сигнал/шум (SNR), при которых выполнялось моделирование. Различные уровни SNR позволяют оценить производительность LDPC декодеров в различных условиях шума.

Модуляция. BPSK расшифровывается как двоичная фазовая манипуляция, один из самых простых и эффективных методов модуляции. В этой схеме два возможных фазовых состояния сигнала соответствуют двум разным битам данных. BPSK обеспечивает хорошую производительность в условиях канала AWGN и часто используется в цифровых системах связи.

Скорость передачи кода. Скорость передачи кода определяется как отношение количества информационных битов к общему количеству передаваемых битов. Скорость, равная 0,8, означает, что 80% передаваемых данных составляют информацию, а оставшиеся 20% - избыточные биты, используемые для исправления ошибок. Высокая скорость работы с кодом позволяет передавать больше полезной информации, сохраняя при этом возможность исправления ошибок.

Размер кадра. Размер кадра (N) указывает на общее количество битов, передаваемых в одном кадре данных. В данном исследовании использовались кадры размером 1008 и 20480 бит, ко-

торые предоставляют достаточные данные для анализа производительности LDPC декодеров.

Количество информационных битов. Количество информационных битов (K) указывает количество битов полезной информации в каждом фрейме данных. В этом исследовании было использовано 504 и 16384 бита, что в сочетании с размером кадра 1008 и 20480 бит соответствует скорости кодирования 0,8.

Алгоритм декодирования: BP_FLOODING для GalA, GalB, GalE; BIT_FLIPPING для MWBF, WBF, PPBF. BP_FLOODING (Believe Propagation Flooding) - это алгоритм распространения вероятности, в котором обновление сообщений происходит параллельно для всех узлов графа. BIT_FLIPPING - это простой и быстрый алгоритм декодирования, основанный на чередовании битов, в которых с наибольшей вероятностью может быть ошибка.

Моделирование проводилось с использованием случайных данных, сгенерированных источником RAND, для оценки производительности различных LDPC декодеров. Основными показателями оценки производительности были частота ошибок в битах (BER) и частота ошибок в кадрах (FER).

Для каждого алгоритма декодирования были проведены эксперименты с различными уровнями шума, и на основе полученных данных были построены графики зависимости BER и FER от отношения сигнал/шум (SNR). Результаты моделирования были проанализированы для определения наилучших алгоритмов декодирования LDPC в условиях канала AWGN. Подробное описание основных показателей оценки производительности:

Частота ошибок в битах (BER). BER измеряет долю битов, декодированных с ошибками (e), по отношению к общему количеству переданных битов (t). Этот показатель является ключевым для оценки надежности системы кодирования и декодирования [19]. Чем меньше значение BER, тем лучше производительность декодера. BER определяется как [20]:

$$BER = \frac{N_e}{N_t} \quad (1)$$

где N_e - количество ошибочных битов, N_t- общее количество переданных битов.

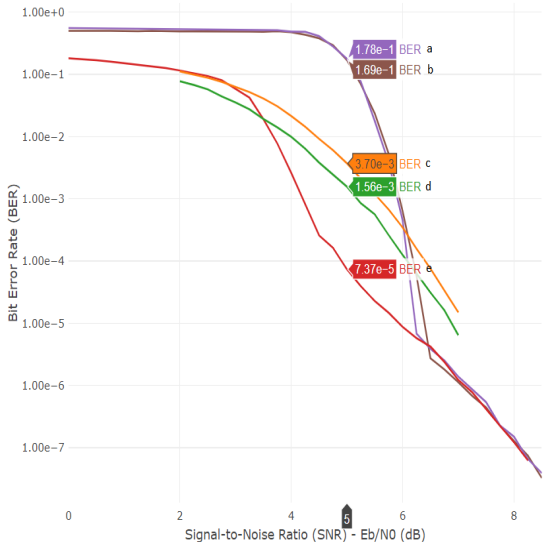


Рис.2 - Производительность BER моделирования AFF3CT:
a) LDPC (1008,504) Gallager B 200 ит., b) LDPC (1008,504) Gallager A 200 ит., c) LDPC (1008,504) WBF 100 ит., d) LDPC (1008,504) MWBF 0.2 100 ит., e) LDPC (1008,504) Gallager E 200 ит..

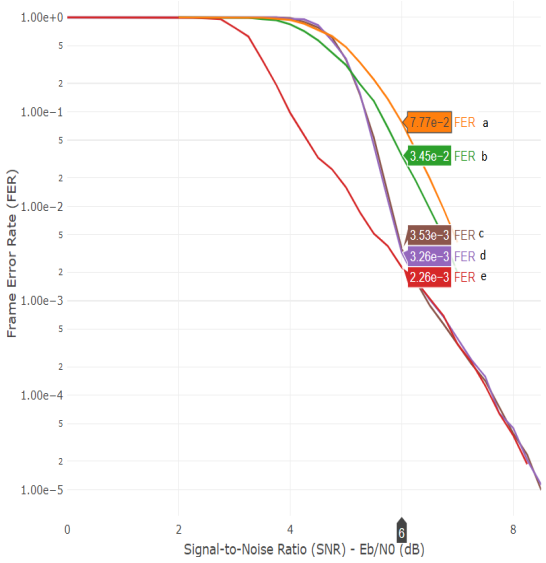


Рис.3 - Производительность FER моделирования AFF3CT:
a) LDPC (1008,504) WBF 100 ит., b) LDPC (1008,504) MWBF 0.2 100 ит., c) LDPC (1008,504) Gallager A 200 ит., d) LDPC (1008,504) Gallager B 200 ит., e) LDPC (1008,504) Gallager E 200 ит..

Частота ошибок в кадрах (FER). FER измеряет долю кадров, декодированных с ошибками, по отношению к общему количеству переданных кадров. Этот показатель важен для оценки стабильности передачи данных на уровне кадров [21].

Отношение сигнал/шум (SNR). SNR является критическим параметром, влияющим на производительность системы связи. Он измеряет уровень полезного сигнала относительно уровня шума и выражается в децибелах (dB) [22]. Высокие значения SNR указывают на более качественную передачу данных с меньшим количеством ошибок.

Для каждого кодера были проведены эксперименты с различными уровнями шума, и на основе полученных данных были построены графики зависимости BER и FER от отношения сигнал/шум (SNR). Результаты моделирования были проанализированы для определения наилучших алгоритмов декодирования LDPC в условиях канала AWGN.

Обсуждение и результаты. В ходе моделирования была получена сравнительная оценка производительности различных алгоритмов декодирования LDPC в канале AWGN. Ключевые показатели оценки включали частоту ошибок в битах (BER) и частоту ошибок в кадрах (FER), которые были измерены при различных уровнях отношения сигнал/шум (SNR). В таблицах и графиках ниже показана зависимость BER и FER от уровня шума для различных алгоритмов декодирования. Анализ этих данных позволяет нам определить наилучшие алгоритмы для использования в реальных системах связи.

Анализ представленных данных показывает, что алгоритм Gallager E продемонстрировал наилучшие результаты по вероятности битовой ошибки (BER) при низких уровнях отношения сигнал/шум (0–4 dB), однако при высоком уровне SNR (6 dB) его эффективность уступала алгоритмам Gallager B и MWBF. Алгоритм MWBF, в свою очередь, обеспечил стабильно хорошие показатели как по BER, так и по вероятности пакетной ошибки (FER) на всех уровнях SNR, особенно начиная с 2 dB и выше. Алгоритмы WBF и Gallager A показали наихудшие результаты по BER и FER на всех уровнях SNR по сравнению с Gallager E и MWBF. Алгоритм Gallager B проявил хорошие характеристики BER при высоких значениях SNR, однако на низких уровнях уступал MWBF и Gallager E. Учитывая проведённый анализ, можно сделать вывод, что декодер MWBF является наилучшим выбором для канала связи с длиной сообщения 1008 бит, поскольку он обеспечивает оптимальный баланс между характеристиками исправления ошибок (BER и FER) и устойчивостью к шумам (SNR).

Таблица 1 - Параметры моделирования канала связи AFF3CT, в котором используются LDPC декодеры с N = 1008

Параметры		LDPC (1008,504) Gallager A 200 ит.	LDPC (1008,504) Gallager B 200 ит.	LDPC (1008,504) Gallager E 200 ит.	LDPC (1008,504) MWBF 0.2 100 ит.	LDPC (1008,504) WBF 100 ит.
Моделирование	Тип кодирования	LDPC	LDPC	LDPC	LDPC	LDPC
	Диапазон шума	0 - 8.5 dB	0 - 8.5 dB	0 - 8.5 dB	2 - 7 dB	2 - 7 dB
	Тип шума	EBN0	EBN0	EBN0	EBN0	EBN0
	Многопоточность	4 поток	48 поток	48 поток	8 поток	8 поток
	Скорость передачи битов	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Источник	Тип	AZCW	AZCW	AZCW	RAND	RAND
Кодек	Тип	LDPC	LDPC	LDPC	LDPC	LDPC
	Размер бита (K)	504	504	504	504	504
	Размер кадра (N)	1008	1008	1008	1008	1008
	Скорость кодирования	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Кодер	Тип	AZCW	AZCW	AZCW	LDPC_H	LDPC_H
Декодер	Тип	BP_FLOODING	BP_FLOODING	BP_FLOODING	BIT_FLIPPING	BIT_FLIPPING
	Реализация	GALA	GALB	GALE	MWBF	WBF
	Количество итераций	200	200	200	100	100
Модем	Тип	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK
Канал	Тип	AWGN	AWGN	AWGN	AWGN	AWGN

Таблица 2 - Параметры моделирования канала связи AFF3CT, в котором используются LDPC декодеры с N = 20480

Параметры		LDPC (20480, 16384) GalA IRA 4/5 200it	LDPC (20480, 16384) GalB IRA 4/5 50it	LDPC (20480, 16384) GalE IRA 4/5 50it	LDPC (20480, 16384) PPBF IRA 4/5 10it.	LDPC (20480, 16384) PPBF IRA 4/5 50it
Моде-лирова-ние	Тип кодирования	LDPC	LDPC	LDPC	LDPC	LDPC
	Диапазон шума	7 - 10 dB	5 - 10 dB	4 - 7 dB	6 - 10 dB	0 - 8.5 dB
	Тип шума	EBN0	EBN0	EBN0	EBN0	EBN0
	Многопоточность	48 поток	48 поток	48 поток	8 поток	4 поток
	Скорость передачи битов	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Источник	Тип	RAND	RAND	RAND	RAND	RAND
Кодек	Тип	LDPC	LDPC	LDPC	LDPC	LDPC
	Размер бита (K)	16384	16384	16384	16384	16384
	Размер кадра (N)	20480	20480	20480	20480	20480
	Скорость кодирования	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Кодер	Тип	LDPC_IRA	LDPC_IRA	LDPC_IRA	LDPC_IRA	LDPC_IRA
Декодер	Тип	BP_FLOODING	BP_FLOODING	BP_FLOODING	BIT_FLIPPING	BIT_FLIPPING
	Реализация	GALA	GALB	GALE	PPBF	PPBF
	Количество итераций	200	50	50	10	50

Модем	Тип	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK
Канал	Тип	AWGN	AWGN	AWGN	AWGN	AWGN

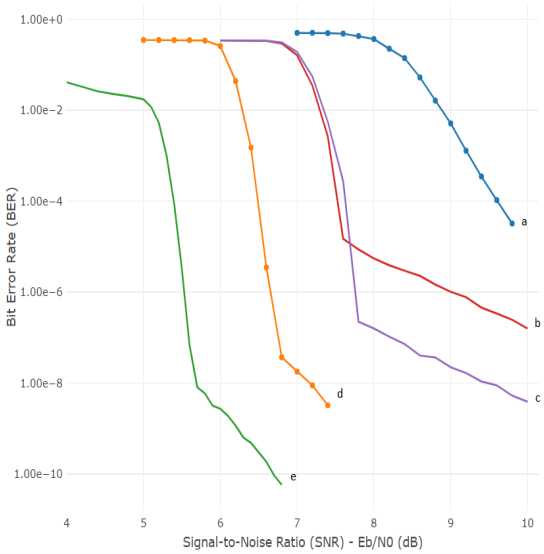


Рис.4 - Производительность BER моделирования AFF3CT: *a*) LDPC (20480,16384) GalA IRA 4/5 200ит., b) LDPC (20480,16384) PPBF IRA 4/5 10ит., c) LDPC (20480,16384) PPBF IRA 4/5 50ит., d) LDPC (20480,16384) GalB IRA 4/5 50ит., e) LDPC (20480,16384) GalE IRA 4/5 50 ит..

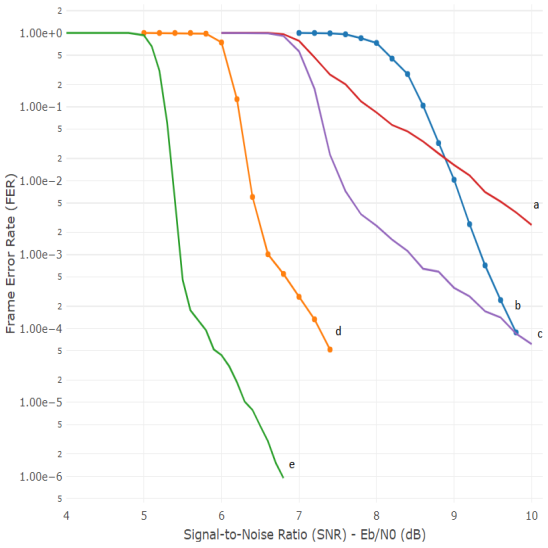


Рис.5 - Производительность FER моделирования AFF3CT: *a*) LDPC (20480,16384) GalA IRA 4/5 200ит., b) LDPC (20480,16384) PPBF IRA 4/5 10ит., c) LDPC (20480,16384) PPBF IRA 4/5 50ит., d) LDPC (20480,16384) GalB IRA 4/5 50ит., e) LDPC (20480,16384) GalE IRA 4/5 50ит..

Анализ данных показывает, что кодер GalE IRA 4/5 продемонстрировал наилучшие результаты по вероятности битовой и пакетной ошибок (BER и FER) на всех уровнях отношения сигнал/шум (SNR). Кодер PPBF IRA 4/5 с 50 итерациями показал хорошие характеристики, уступая GalE IRA 4/5, но превосходя остальные схемы. В то же время кодеры GalA IRA 4/5 и GalB IRA 4/5 показали худшие результаты по сравнению с GalE и PPBF, особенно при низких значениях SNR. Версия PPBF IRA 4/5 с 10 итерациями продемонстрировала высокие значения BER и FER при низком уровне SNR, что делает её менее предпочтительной для использования в условиях значительных шумов.

Выводы. Таким образом, для канала связи с длиной сообщения 20 480 бит наивысшую эффективность продемонстрировал алгоритм GalE IRE 4/5, обеспечивший низкую частоту ошибок и высокую устойчивость к шуму. Декодер GalE показал лучшие результаты по показателям битовой (BER) и кадровой (FER) ошибок на всех уровнях отношения сигнал/шум (SNR), что позволяет рассматривать его в качестве оптимального решения для систем передачи данных, функционирующих в условиях высокой помехоустойчивости. В то же время, в системах с ограниченными вычислительными ресурсами, где предпочтение отдаётся передаче более коротких сообщений, эффективным может быть использование канала с длиной сообщения 1008 бит. В данном сценарии целесообразно применение декодера MWBF, продемонстрировавшего стабильную производительность при сокращённой длине кода и ограниченных ресурсах декодирования.

В перспективе полученные результаты планируется использовать для сравнительного анализа с многопороговыми декодерами (Multi-Threshold Decoders, MTD), отличающимися низ-

кой вычислительной сложностью и высокой потенциальной эффективностью в энергозависимых и ресурсоограниченных системах. Особый интерес представляет реализация многопорогового декодирования с использованием технологии параллельных вычислений OpenCL, что, как ожидается, позволит существенно повысить производительность и обеспечить дополнительный прирост по показателям BER и FER по сравнению с традиционными LDPC-декодерами.

***Финансирование**. Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы по проекту грантового финансирования при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19679505)*

Литература

1. Satybaldina D. Zh., Zolotarev V. V., Ovechkin G. V., Sailau kyzy Zh. New concatenation schemes based on the multithreshold decoders of convolutional self-orthogonal codes for gaussian channels // Eurasian journal of mathematical and computer applications. -2021. - Vol.9(4). - P.51-62. DOI 10.32523/2306-6172-2021-9-4-51-62.

2. Сайлауқызы Ж., Сатыбалдина Д.Ж., Аманов А.Н., Жакина М.М. Радиоарналар үшін таннер графын қолдану арқылы LDPC кодтарының қателерді түзету әсерін талдау // Информатика и прикладная математика: Мат. VIII Межд. науч. - практ. конф. (26-27 октября 2023 г). - Алматы. - 2023. - с.274. ISBN 978-601-332-165-3.

3. Zikry, A. H. A., Hassan, A. Y., Shaban, W. I., Abdel-Momen, S. F. (2021). Performance analysis of LDPC decoding techniques // International Journal of Recent Technology and Engineering. - 2021. - Vol.9(5). - P.17-26. DOI 10.35940/ijrte.E5067.019521.

4. Сайлауқызы Ж. LDPC кодері негізінде байланыс арнасындағы сигналдардың тұтастығын зерттеу // Журнал «Труды университета». - 2021. - № 4 (85). - С.339-343. DOI 10.52209/1609-1825_2021_4_339.

5. Усатюк В.С., Егоров С.И. Построение LDPC-кодов с использованием модифицированного метода выборки по значимости Коула // Известия Юго-Западного государственного университета. - 2023. - Vol.27(1). - P. 92–110 DOI 10.21869/2223-1560-2023-27-1-92-110.

6. Ouakili H. E., Touati H., Kadi A., Mehdaoui Y., Alami R. E. New low-density-parity-check decoding approach based on the hard and soft decisions algorithms // International Journal of Power Electronics and Drive Systems/International Journal of Electrical and Computer Engineering. - 2023. - Vol.13(2). - P.1639- 1646. DOI 10.11591/ijece.v13i2.

7. Le K., Ghaffari F., Kessal L., Declercq D., Boutillon E., Winstead C., Vasic B. A probabilistic parallel Bit-Flipping decoder for Low-Density Parity-Check codes // IEEE Transactions on Circuits and Systems. I, Regular Papers. - 2019. - Vol.66(1). - P.403–416. DOI 10.1109/tcsi.2018.2849679.

8. Guan W., Liang L. Check-Belief propagation decoding of LDPC code // IEEE Transactions on Communications. - 2023. - Vol.71(12). - P. 6849–6858. DOI 10.1109/tcomm.2023.3308155

9. Ziemer R. E., Tranter W. H. Principles of Communications. - 2014.-768 p. ISBN 978-1-118-07891-4.

10. Волхонская Е. В., Коротей Е. В., Власова К. В., Рушко М. В. Модельное исследование помехоустойчивости приема радиосигналов с QPSK, BPSK, 8psk и DBPSK // Известия КГТУ. - 2017. - № 46. - С.1-10.

11. Черноусов А. В. Анализ воздействия аддитивных помех на широкополосный сигнал // Решетневские чтения. - 2016. - № 20.- С.1-3 URL https://cyberleninka.ru

12. Cassagne A., Hartmann O., Léonardon M., He K., Leroux C., Tajan R., Aumage O., Barthou D.,

Tonnellier T., Pignoly V., Gal B. L., Jégo C. AFF3CT: A fast forward error correction toolbox // SoftwareX. - 2019. - Vol.10:100345. DOI 10.1016/j.softx.2019.100345

13. Guruswami V. Iterative decoding of Low-Density parity check codes // Bulletin of the European Association for Theoretical Computer Science. - 2006. - P.1-29. URL https://www.cs.cmu.edu

14. Rasheed O. A., Brkic S. S., Ivanis P. N., Vasic B. Performance analysis of faulty Gallager-B decoding of QC-LDPC codes // 21st Telecommunications Forum Telfor (TELFOR) – 2013. DOI 10.1109/telfor.2013.6716235.

15. Gal B. L., Pignoly V., Jego C. High-Performance Gallager-E decoders for hard input LDPC decoding on multi-core devices // In Lecture notes in computer science. - 2022. - P.3-15. DOI 10.1007/978-3-031-12748-9_1.

16. Le K., Ghaffari F., Declercq D., Vasic B., Winstead C. A novel high-throughput, low-complexity bit-flipping decoder for LDPC codes // International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC). - 2017. DOI 10.1109/atc.2017.8167601.

17. Kou Y., Lin S., Fossorier M. Low-density parity-check codes based on finite geometries: a rediscovery and new results // IEEE Transactions on Information Theory. - 2001. - Vol.47(7). - P.2711-2736. DOI 10.1109/18.959255

18. Zhang J., Fossorier M. A modified weighted Bit-Flipping decoding of Low-Density Parity-Check codes // IEEE Communications Letters. - 2004. - Vol.8(3). - P.165-167. DOI 10.1109/lcomm.2004.825737

19. Дубов М.А., Приоров А.Л. Методика неэталонной оценки отношения сигнал/шум и вероятности битовой ошибки для сигналов с квадратурной модуляцией // Цифровая обработка сигналов. -2012. -№ 4. - С.37-43.

20. Philip-Kpae F. O., Omijeh B. Bit Error Rate and Signal to Noise Ratio Performance Evaluation of OFDM System with QPSK and QAM M-array Modulation Scheme in Rayleigh, Rician and AWGN Channel Using MATLAB/Simulink // Innovative Systems Design and Engineering. - 2017. - Vol.8(4). - P.1–9. https://core.ac.uk.

21. Haddadi S., Farhang M., Derakhtian M. Low-complexity decoding of LDPC codes using reduced-set WBF-based algorithms // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. - 2020. - Vol.1:180 DOI 10.1186/s13638-020-01791-5.

22. Ong V. C. A., Welch B. W. Bit error rate and frame error rate data processing for space communications and navigation-related communication system analysis tools // National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center. - 2019.- 20 p. URL https://ntrs.nasa.gov.

References

1. Satybaldina D. Zh., Zolotarev V. V., Ovechkin G. V., Sailau kyzy Zh. New concatenation schemes based on the multithreshold decoders of convolutional self-orthogonal codes for gaussian channels // Eurasian journal of mathematical and computer applications. -2021. - Vol.9(4). - P.51-62. DOI 10.32523/2306-6172-2021-9-4-51-62.

2. Sajlauқyzy Zh., Satybaldina D.Zh., Amanov A.N., Zhakina M.M. Radioarnalar үshin tanner grafyn қoldanu arқyly LDPC kodtarynyң қatelerdi tүzetu әserin taldau // Informatika i prikladnaja matematika: Mat. VIII Mezhd. nauch. - prakt. konf. (26-27 oktjabrja 2023 g). - Almaty. - 2023. - c.274. ISBN 978-601-332-165-3.[in Kazakh]

3. Zikry, A. H. A., Hassan, A. Y., Shaban, W. I., Abdel-Momen, S. F. (2021). Performance analysis of LDPC decoding techniques // International Journal of Recent Technology and Engineering. - 2021. -

Vol.9(5). - P.17-26. DOI 10.35940/ijrte.E5067.019521.

4. Sajlauқyzy Zh. LDPC koderi negizinde bajlanys arnasyndaғy signaldardyң tұtastyғyn zertteu // Zhurnal «Trudy universiteta». - 2021. - № 4 (85). - S.339-343. DOI 10.52209/1609-1825_2021_4_339. [in Kazakh]

5. Usatjuk V.S., Egorov S.I. Postroenie LDPC-kodov s ispol’ zovaniem modificirovannogo metoda vyborki po znachimosti Koula // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. - 2023. - Vol.27(1). - P.92–110 DOI 10.21869/2223-1560-2023-27-1-92-110.[in Russian]

6. Ouakili H. E., Touati H., Kadi A., Mehdaoui Y., Alami R. E. New low-density-parity-check decoding approach based on the hard and soft decisions algorithms // International Journal of Power Electronics and Drive Systems/International Journal of Electrical and Computer Engineering. - 2023. - Vol.13(2). - P.1639- 1646. DOI 10.11591/ijece.v13i2.

7. Le K., Ghaffari F., Kessal L., Declercq D., Boutillon E., Winstead C., Vasic B. A probabilistic parallel Bit-Flipping decoder for Low-Density Parity-Check codes // IEEE Transactions on Circuits and Systems. I, Regular Papers. - 2019. - Vol.66(1). - P.403–416. DOI 10.1109/tcsi.2018.2849679.

8. Guan W., Liang L. Check-Belief propagation decoding of LDPC code // IEEE Transactions on Communications. - 2023. - Vol.71(12). - P. 6849–6858. DOI 10.1109/tcomm.2023.3308155

9. Ziemer R. E., Tranter W. H. Principles of Communications. - 2014.-768 p. ISBN 978-1-118-07891-4.

10. Volhonskaja E. V., Korotej E. V., Vlasova K. V., Rushko M. V. Model’ noe issledovanie pomehoustojchivosti priema radiosignalov s QPSK, BPSK, 8psk i DBPSK // Izvestija KGTU. - 2017. - № 46. - C.1-10. [in Russian]

11. Chernousov A. V. Analiz vozdejstvija additivnyh pomeh na shirokopolosnyj signal // Reshetnevskie chtenija. - 2016. - № 20.- C. 1-3 URL https://cyberleninka.ru. [in Russian]

12. Cassagne A., Hartmann O., Léonardon M., He K., Leroux C., Tajan R., Aumage O., Barthou D., Tonnellier T., Pignoly V., Gal B. L., Jégo C. AFF3CT: A fast forward error correction toolbox // SoftwareX. - 2019. - Vol.10:100345. DOI https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.100345

13. Guruswami V. Iterative decoding of Low-Density parity check codes // Bulletin of the European Association for Theoretical Computer Science. - 2006. - P.1-29. URL https://www.cs.cmu.edu

14. Rasheed O. A., Brkic S. S., Ivanis P. N., Vasic B. Performance analysis of faulty Gallager-B decoding of QC-LDPC codes // 21st Telecommunications Forum Telfor (TELFOR) – 2013. DOI 10.1109/telfor.2013.6716235.

15. Gal B. L., Pignoly V., Jego C. High-Performance Gallager-E decoders for hard input LDPC decoding on multi-core devices // In Lecture notes in computer science. - 2022. - P.3-15. DOI 10.1007/978-3-031-12748-9_1.

16. Le K., Ghaffari F., Declercq D., Vasic B., Winstead C. A novel high-throughput, low-complexity bit-flipping decoder for LDPC codes // International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC). - 2017. DOI 10.1109/atc.2017.8167601.

17. Kou Y., Lin S., Fossorier M. Low-density parity-check codes based on finite geometries: a rediscovery and new results // IEEE Transactions on Information Theory. - 2001. - Vol.47(7). - P.2711-2736. DOI 10.1109/18.959255

18. Zhang J., Fossorier M. A modified weighted Bit-Flipping decoding of Low-Density Parity-Check codes // IEEE Communications Letters. - 2004. - Vol.8(3). - P.165-167. DOI 10.1109/lcomm.2004.825737

19. Dubov M.A., Priorov A.L. Metodika nejetalonnoj ocenki otnoshenija signal/shum i verojatnosti bitovoj oshibki dlja signalov s kvadraturnoj moduljaciej // Cifrovaja obrabotka signalov. -2012. -№ 4.

- S.37-43. [in Russian]

20. Philip-Kpae F. O., Omijeh B. Bit Error Rate and Signal to Noise Ratio Performance Evaluation of OFDM System with QPSK and QAM M-array Modulation Scheme in Rayleigh, Rician and AWGN Channel Using MATLAB/Simulink // Innovative Systems Design and Engineering. - 2017. - Vol.8(4). - P.1–9. https://core.ac.uk/download/pdf/234644027.pdf.

21. Haddadi S., Farhang M., Derakhtian M. Low-complexity decoding of LDPC codes using reduced-set WBF-based algorithms // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. - 2020. - Vol.1:180 DOI 10.1186/s13638-020-01791-5.

22. Ong V. C. A., Welch B. W. Bit error rate and frame error rate data processing for space communications and navigation-related communication system analysis tools // National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center. - 2019.- 20 p. URL https://ntrs.nasa.gov.

Сведения об авторов

Жакина М.М. - Магистрант 2-го курса, Карагандинский Технический Университет им. Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан, e-mail: m.zhakina@bk.ru;

Сайлаукызы Ж.- PhD, и.о. доцента, Карагандинский Технический Университет им. Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан, e-mail: zhuldyzsailaukyzy@gmail.com;

Рысбекқызы Б.- PhD, и.о. доцента, Карагандинский Технический Университет им. Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан, e-mail: bakhytgulz@mail.ru;

Эгамбердиев Э.У. – директор ТОО «Adal damu», Астана, Казахстан, e-mail: eeldoru@gmail.com;

Аманов А.Н. - Магистрант 2-го курса,Карагандинский Технический Университет им. Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан, e-mail: a.taimagambetov@bk.ru.

Information about the authors

Zhakina M.M. – 2nd year master’s student, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: m.zhakina@bk.ru;

Saylaukyzy Zh.- PhD, acting associate professor, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: zhuldyzsailaukyzy@gmail.com;

Rysbekkyzy B.- PhD, acting associate professor, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: bakhytgulz@mail.ru;

Egamberdiev E.U.- Director LLP «Adal damu», Astana, Kazakhstan, e-mail: eeldoru@gmail.com;

Amanov A.N. - 2nd year master’s student, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: a.taimagambetov@bk.ru.