



АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

DOI 10.51885/1561-4212_2024_4_183

MFTAA 28.21.19

Ж. Сайлауқызы¹, Г.Т. Даненова², М.М. Коккоз³

Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., Қазақстан

¹E-mail: zhuldyzsailaukyzy@gmail.com*

²E-mail: guldan72@mail.ru

³E-mail: makhabbat_k@bk.ru

КӨП ШЕКТІ ДЕКОДЕРДЫ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ЦИФРЛЫҚ РАДИОЖҮЙЕЛЕРДІҢ ЭНЕРГИЯ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ӘДІСТЕРІН ӘЗІРЛЕУ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВЫХ РАДИОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОПороГОВОГО ДЕКОДЕРА

DEVELOPMENT OF METHODS TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF DIGITAL RADIO SYSTEMS USING A MULTI-THRESHOLD DECODER

Аңдатпа. Цифрлық радиожүйелердің энергия тиімділігі қазіргі заманғы байланыс жүйелеріндегі негізгі мәселелердің бірі болып табылады. Бұл әсіресе сөніп қалатын каналдарда өзекті, өйткені энергия тұтынуы азайтып, деректерді жеткізудің жоғары сапасын сақтау қажет. Осыған орай зерттеудің мақсаты цифрлық радиожүйелердің энергия тиімділігін арттыру әдістерін әзірлеу және бағалау, бұл үшін көп шекті декодерлер (КШД) мен түйілген кодтауды қолдану қарастырылды. Радиоканалдардың әртүрлі жұмыс жағдайларында олардың тиімділігі тексерілді. КШД үшін жоғары деңгейде деректерді қорғауды қамтамасыз ететін тиімді түйілген кодтар таңдалды. Зерттеу барысында бұл кодтардың аддитивті ақ гаусс шуы бар каналдардағы энергия тиімділігі бағаланды. Түйілген кодтау әдістері КШД өнімділігін айтарлықтай жақсартуға мүмкіндік берді, бұл деректерді жеткізудің сенімділігін арттырады. Сонымен қатар, итеративті демодуляция және декодтау әдістері қолданылды, бұл қателіктерді әрбір итерацияда түзетіп отыруға мүмкіндік береді. Бұл әдіс, әсіресе күрделі жағдайларда демодуляция және декодтау процесстерін бірнеше рет қайталау арқылы деректерді беру дәлдігін айтарлықтай жақсартуға ықпал етеді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, ұсынылған әдістер жүйенің энергия тұтынуын 12-18 пайызға азайтуға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, сигнал/шум қатынасы (SNR) 10 дБ болғанда биттік қателік коэффициенті (BER) 10^{-3} деңгейінен 8×10^{-4} деңгейіне дейін төмендеп, қателіктерді түзету тиімділігі 15-20 пайызға артты. Сондай-ақ, сөніп қалатын каналдарда деректерді беру дәлдігі 10-15 пайызға жақсарып, жүйенің жалпы сенімділігін арттырды. Ұсынылған әдістерді қазіргі заманғы радиожүйелерде сәтті қолдану арқылы олардың энергия тиімділігін арттыруға және байланыс сапасын жақсартуға болады.

Түйін сөздер. Цифрлық радиожүйелер, көп шекті декодер, итеративті демодуляция, энергия тиімділігі, түйілген кодтар.

Аннотация. Энергетическая эффективность цифровых радиосистем является одной из ключевых проблем современных систем связи. Особенно это актуально в условиях замираний, когда требуется минимизировать энергопотребление и при этом поддерживать высокое качество передачи данных. Цель данного исследования заключается в разработке методов повышения энергетической эффективности цифровых радиосистем с использованием многопороговых декодеров (МПД) и сверточного кодирования, а также в оценке их эффективности в различных условиях работы радиоканалов. Для многопорогового

декодирования были выбраны эффективные сверточные коды, которые способны обеспечить высокую степень защиты данных при передаче. В ходе исследования была проведена оценка их энергетической эффективности в каналах с аддитивным белым гауссовским шумом. Предложенные методы сверточного кодирования позволили существенно улучшить производительность МПД, что привело к повышению надёжности передачи данных. Использовались итеративные методы демодуляции и декодирования, которые позволяли постепенно корректировать ошибки с каждой итерацией. Этот подход способствовал значительному повышению точности передачи данных за счёт многократного повторения процессов демодуляции и декодирования, что особенно важно в сложных условиях. Результаты исследования показали, что предложенные методы позволили снизить энергопотребление системы на 12-18%. При этом вероятность битовой ошибки (BER) при отношении сигнал/шум (SNR) в 10 дБ снизилась с 10^{-3} до 8×10^{-4} , что улучшило эффективность коррекции ошибок на 15-20%. Также была значительно улучшена точность передачи данных в условиях замираний на 10-15%, что повышает общую надёжность системы. Предложенные методы могут быть успешно применены в современных радиосистемах для повышения их энергетической эффективности и улучшения качества связи, особенно в сложных условиях передачи.

Ключевые слова. Цифровые радиосистемы, многопороговое декодирование, итеративная демодуляция, энергетическая эффективность, сверточное кодирование.

Abstract. Energy efficiency in digital radio systems is one of the key challenges in modern communication systems. This is especially relevant in fading environments, where it is necessary to minimize energy consumption while maintaining high data transmission quality. The goal of this research is to develop and evaluate methods for improving the energy efficiency of digital radio systems using multi-threshold decoding (MTD) and convolutional coding. The efficiency of these methods was tested under various operating conditions of radio channels. Effective convolutional codes were selected for MTD, which ensure a high level of data protection during transmission. The study evaluated the energy efficiency of these codes in channels with additive white Gaussian noise. The convolutional coding methods allowed for significant improvements in MTD performance, which led to increased reliability of data transmission. Additionally, iterative demodulation and decoding methods were used, enabling the correction of errors with each iteration. This approach contributed to a significant increase in data transmission accuracy by repeatedly performing the processes of demodulation and decoding, especially in complex conditions. The research results showed that the proposed methods allowed for a 12-18% reduction in system energy consumption. Furthermore, with a signal-to-noise ratio (SNR) of 10 dB, the bit error rate (BER) decreased from 10^{-3} to 8×10^{-4} , improving error correction efficiency by 15-20%. The accuracy of data transmission in fading environments also improved by 10-15%, enhancing the overall reliability of the system. The practical significance of this research is that the proposed methods can be successfully applied in modern radio systems to increase their energy efficiency and improve communication quality, particularly in challenging transmission conditions.

Keywords. Digital radio systems, multi-threshold decoder, iterative demodulation, energy efficiency, convolutional coding.

Қысқашы. Цифрлық радио жүйелер қазіргі телекоммуникациялық жүйелердің маңызды және ажырамас бөлігі болып табылады. Мұндай жүйелер ақпаратты тиімді әрі сенімді жеткізуге арналған, бірақ олардың өнімділігі мен энергия тұтыну деңгейі әрдайым жетілдіруді қажет етеді. Радио жүйелерді қолдану кезінде жиі кездесетін мәселелердің бірі – сөнетін каналдар, яғни сигнал амплитудасының өзгеруі деректерді берудің сенімділігін төмендетеді. Бұл құбылыс, әдетте, мобильді құрылғылар мен спутниктік байланыс жүйелерінде жиі байқалады.

Сөнетін каналдар жағдайында деректерді сенімді түрде беру қиынға соғады, себебі сигналдың тұрақсыздығы қателіктердің жиі туындауына себеп болады. Сондықтан, радио жүйелерде қателіктерді түзету әдістерін қолдану – маңызды шешімдердің бірі болып саналады. Көп шекті декодерлер және түйілген кодтау әдістері осы мәселелерді шешу үшін тиімді әдіс ретінде қарастырылады. Бұл әдістер деректердің дәлдігін қамтамасыз етіп қана қоймай, энергия тұтынуды азайтуға мүмкіндік береді, әсіресе сөнетін каналдарда маңызды. Бұл саладағы негізгі әзірлемелер мен ғылыми зерттеулердің тиімділігін алғаш рет 1948 жылы К. Шеннон дәлелдеді (Шеннон, 1963). Қателікке төзімді кодтаудың басты мақсаты – қателік ықтималдығын қажетті деңгейде сақтай отырып, энергия тұтынуды барынша төмендету және түзету қабілеті жоғары кодтарды құру. Сонымен қатар, осы кодтарды декодтау үшін тиімді әрі практикалық алгоритмдерді жасау міндеті тұрды. Қателікке

төзімді кодтау теориясын дамытуға айтарлықтай үлес қосқан ғалымдар қатарында Р. Галлагер, В. Питерсон, Э. Уэлдон, А.Д. Витерби, Р.К. Боуз, Дж. Месси, И.С. Рид, Г. Соломон, Д. Форни. Сондай-ақ, ресейлік ғалымдар В.Д. Колесник, В.В. Зяблов, В.В. Золотарев, Г.В. Овечкин және басқа да зерттеушілер қателерге қарсы тұру қабілеті жоғары, мәліметтерді сенімді жеткізуге мүмкіндік беретін тиімді әдістерді дамытуға негіз қалады.

КШД Месси ұсынған қарапайым шекті декодердің жетілдірілген нұсқасы болып табылады (Massey, 1963). Бұл декодер итерациялық декодтау үшін әрбір декодталатын символ өзгерген кезде КШД шешімі оңтайлы декодердің шешіміне жақындай түсетініне кепілдік беріледі (Zolotarev et al., 2015). Месси декодерінің қарапайымдылығы оны басқа зерттеушілер де өзгертуге тырысты (Filimonov et al., 2020; Филимонов және т.б., 2019; Yatribi et al., 2020). КШД декодтау идеялары басқа ғылыми топтардың зерттеулерінде де дамыды (Mullah et al., 2011).

Классикалық флукуациялық кедергілер жағдайындағы қателерді түзету кодтаудың теориясы, оның негіздері В.А. Котельников, К. Шеннон және басқа да ғалымдардың фундаменталды еңбектерінде қаланған, қазіргі кезде де арналардың, сигналдардың және кедергілердің нақты сипаттамаларын ескерумен одан әрі дамып келеді (Шеннон, 1963). Кедергіге төзімді радио жүйелерді құрудағы негізгі қиындық – радио және сымды байланыс желілерінің түрлі стандарттарын біріктіру қажеттілігі және оларды келістірудің қиындығы. Осыған байланысты жаңа буын мобильді байланысы әртүрлі байланыс жүйелерін функционалды интеграциялауды қамтуы тиіс, онда пайдаланушы бірнеше байланыс жүйесіне қол жеткізу үшін бір ғана терминалды қолдана алады (Harada, 2005). Осындай терминалдарды құрудағы ең перспективалы технология – бағдарламалық анықталатын радио жүйелерінің (SDR, Software-Defined Radio) технологиясы, яғни пайдаланушыларға бағдарламалық жасақтаманы өз бетінше өзгерте отырып, әртүрлі байланыс және хабар тарату жүйелері арасында ауысуға мүмкіндік береді (Mitola et al., 1999; Dillinger et al., 20023). Зерттеуде SDR радио жүйелердің аппараттық бөлігінен максималды тәуелсіздікке қол жеткізуге бағытталған. SDR жүйелерінде қабылдағыш пен таратқыштың (клиент және сервер) негізгі функциялары бағдарламалық деңгейде жүзеге асырылды, яғни олардың икемділігі мен әмбебаптығын қамтамасыз етеді.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Қазіргі уақытта КШД сипаттамалары тәуелсіз қателіктері немесе сөнетін арналар үшін кеңінен зерттелді. Мұндай арналарда бұл әдістер тіпті өте ұзын кодтарды декодтау кезінде оңтайлы декодердің тиімділігіне жақын нәтиже береді. Осы арналар үшін КШД тиімділігін жақсартудың бірнеше тәсілдері белгілі, олар КШД жұмысының тиімді аймағын арнаның өткізу қабілетіне жақындатады. Нәтижесінде, КШД аппараттық және бағдарламалық нұсқалары Турбо-кодтау және төмен тығыздықтағы кодтарды (LDPC) декодтаудың ең үздік әдістерімен салыстырмалы деңгейде энергетикалық ұтыс береді, ал жұмыс жылдамдығы ондаған есе жоғары болады (Seksembayeva et al., 2022; Satybaldina et al., 2021; Sailaukyzy et al., 2023; Satybaldina et al., 2024). Сонымен қатар, қазіргі заманғы байланыс желілері сигналдардың көпсәулелі таралуы, доплер ығысуы және басқа да көптеген себептерге байланысты әлдеқайда күрделі жағдайда жұмыс істейді (Satybaldina et al., 2024; Seksembayeva et al., 2021). Нәтижесінде, арнадағы қателіктер топталып, пакеттерге бірігеді. Мұндай жағдайларда кодтауды қолдану әсері тәуелсіз қателіктері бар арналарға қарағанда әлдеқайда жоғары, өйткені кейбір жағдайларда таратқыштың қуатын арттыру арқылы деректердің сенімділігін арттыру мүмкін емес.

КШД жұмыс істеу қағидасы.

Тексеру қосындысы. Декодер деректерді тексеру үшін арнайы ережелерді қолданады. Әрбір тексеру нәтижесінде символ дұрыс па, жоқ па, оны анықтайды. Егер тексеру нәтижесі 0 немесе 1 болса, мәндер қосылады.

$$L_k = \sum_{m=1}^J S_{g_m} + r_k, \quad (1)$$

Мұнда $J = d-1$ тексерулер саны; r_k декодталатын u_k символына қатысты айырма регистрінің символы (0 немесе 1); S_m символына қатысты тексерулер жиынына кіретін синдромдық регистрдің m -ші элементі.

Шектік тексеру: Егер тексерулердің қосындысы белгілі бір шектік мәннен (шектен) жоғары болса, декодер қабылданған символды өзгертеді яғни $L_k > T$ болса, мұндағы $T \geq (d-1)/2$ элементтің шегі, онда u_k символы және онымен байланысты барлық тексерулер $\{S_{g_m}\}_{m=1, J}$ мен r_k символы кері мәнге өзгереді.

Келесі символды тексеру: Жоғарыда сипатталған процесс әрбір символ үшін қайталанатын. Егер байланыс жүйесінде қолданылатын кодтау жүйесі қателердің таралуын азайтатын критерийге сәйкес таңдалып, КШД параметрлері дұрыс реттелсе, онда шу деңгейі жоғары болған жағдайда КШД нәтижелері оңтайлы декодердің нәтижесіне жақындайды. 1 суретте КШД жұмыс алгоритмі ұсынылған.



1-сурет. КШД жұмысының алгоритмі

Ескерту – авторлармен құрастырылған

КШД артықшылығы деректердегі қателерді тиімді түрде түзетіп, артық энергия жұмсамай, сигнал-шум қатынасы нашар болған жағдайда да деректердің дұрыс берілуін қамтамасыз ете алады.

Декодерді қолдану кезінде, әртүрлі параметрлерді дұрыс баптап, декодтау қателерін минимизациялау үшін жүйе оңтайлы болуы керек. КШД бағдарламалық қамтамасыздандыру жағынан да, аппараттық тұрғыдан да өте икемді, және оны әртүрлі байланыс арналарында қолдануға болады (Zolotarev et al., 2017). Ұсынылған әдістер үлкен шу кезінде жұмыс істегенде бағдарламалық және аппараттық тұрғыдан өте күрделі болып келеді, бұл олардың жоғары жылдамдықты деректерді беру жүйелерінде практикалық қолданылуын қиындатады. Сонымен қатар, бұл кодтар оңтайлы емес, сондықтан олардың тиімділігін байланыс арнасының өткізу қабілетіне жақындату қиынға соғады. Қатені түзету алгоритмдерін әзірлеудегі тиімді бағыттардың бірі – ресейлік ғалымдар, соның ішінде біздің зерттеу тобымыз бірлесіп дамытып жатқан көп шекті декодерлер. Гаусс арнасындағы КШД бойынша жүргізілген зерттеулер нәтижелері бұл әдістер өте ұзын кодтарды сызықты күрделілікпен декодтауға мүмкіндік беретінін, сонымен қатар қатені

түзетудің жақсы мүмкіндіктерін көрсететінін анықтады. КШД алгоритмі екілік Гаусс арнасында түйілген кодтар түрінде жүзеге асырылған, демодулятордағы сигналдың 4 биттік квантталуында.

КШД алгоритмінің тағы бір ерекшелігі – күрделілігі төмен бола отырып, күрделі алгоритмдерден асып түсуі. Мысалы, $E_b/N_0 = 1,8$ дБ кезінде 40 итерациялы қарапайым КШД декодері Витерби және Рид-Соломон кодының каскадтық схемасынан да жақсы нәтиже көрсетеді. Бұл энергия тиімділігі мен кідірісті азайту мүмкіндігін береді, яғни жоғары жылдамдықты жүйелерде өте маңызды.

Нәтижелер және оларды талқылау. Цифрлық радио жүйелердің деректерді жеткізу тиімділігін арттыру мақсатында КШД қолдана отырып, бірлескен итерациялық демодуляция/декодтау әдістері жүзеге асырылды. Итерациялық демодуляция/декодтау схемасының қателерді түзету жұмысының эксперименттік сипаттамалары Python тілінде имитациялық модельдеу техникасы арқылы алынды. SDR жүйелерінде қабылдағыш пен таратқыштың негізгі функциялары бағдарламалық деңгейде жүзеге асырылды. Wi-Fi арқылы клиент-сервер қосымшасы негізінде радиоканалдар арқылы деректерді беру процесі қарастырылады, онда ақ гаусс шуылын (AWGN) қосу арқылы өшу немесе шу жағдайы моделденеді.

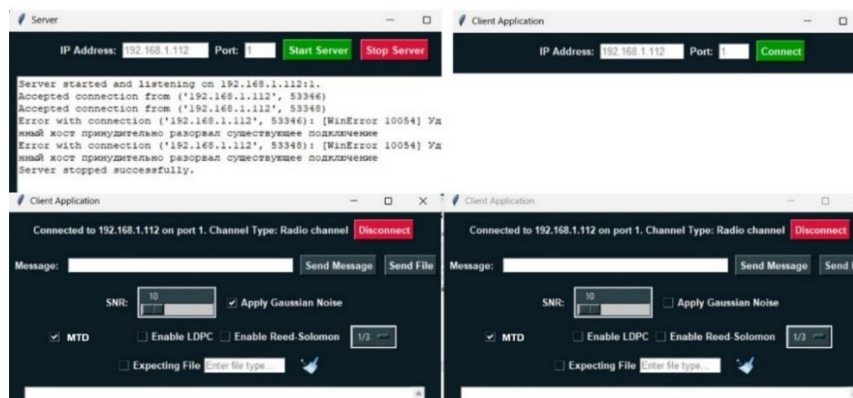
Wi-Fi желісі арқылы клиент пен сервер арасында деректер алмасу жүзеге асырылады, деректер арнасын құру сервер сокетын инициализациялаудан басталады (2 сурет):

Сервер

```
def start_server(ip, port):
    with socket.socket(socket.AF_INET,
socket.SOCK_STREAM) as server_socket:
        server_socket.bind((ip, port))
        server_socket.listen()
        log(f"Server is listening on {ip}:{port}\n")
        while True:
            conn, addr = server_socket.accept()
            clients[conn] = addr
            threading.Thread(target=handle_client,
args=(conn, addr)).start()
    def log(message):
        log_text.insert(tk.END, message)
```

Клиент

```
def handle_client(conn, addr):
    log(f"New connection from {addr}\n")
    try:
        while data := conn.recv(1024):
            broadcast(data, addr)
    except ConnectionResetError:
        log(f"Connection reset by {addr}\n")
    finally:
        conn.close()
    remove_client(conn)
    log(f"Connection closed by {addr}\n")
    def log(message):
        log_text.insert(tk.END, message)
```



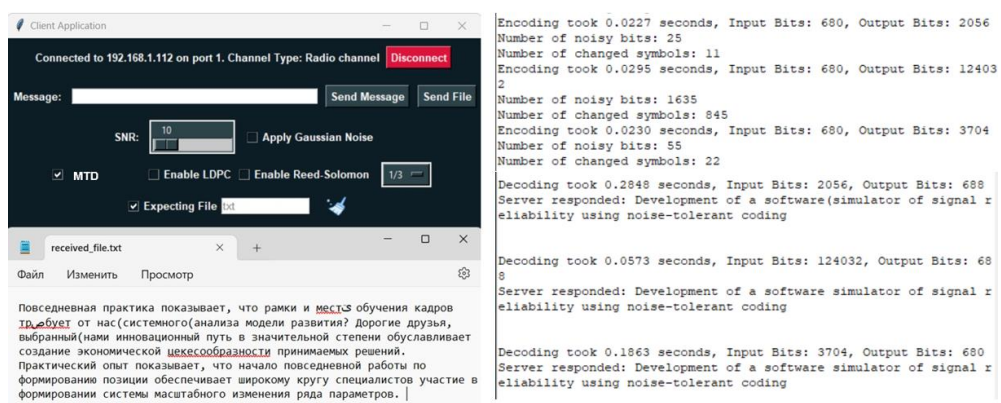
2-сурет. SDR жүйелерінде қабылдағыш пен таратқыштың негізгі функциялары

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Сөну және шуды модельдеу:

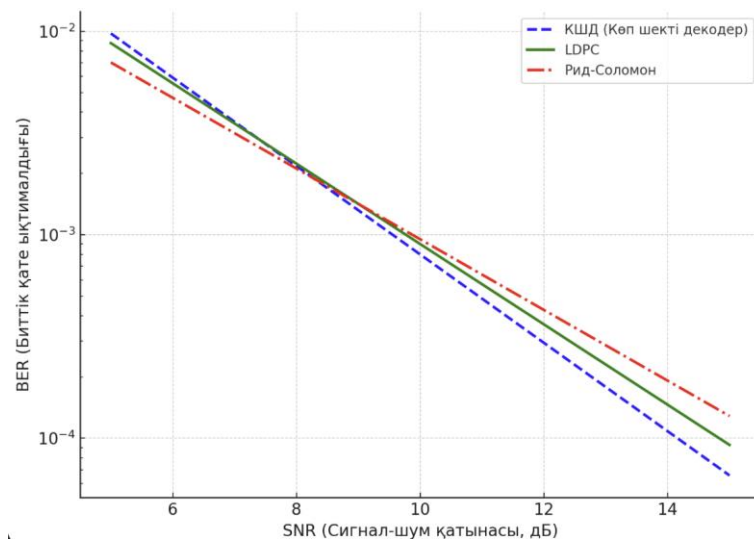
```
import random
def add_noise_to_text(encoded_message, n_errors=5, fading_prob=0.1):
    message_list = list(encoded_message)
    for i in range(len(message_list)):
        if random.random() < fading_prob:
            message_list[i] = 0 # Байттарды 0-ге теңестіру арқылы немесе кездейсоқ мәнмен
ауыстыруға болады
    for _ in range(n_errors):
        index = random.randint(0, len(message_list) - 1)
        message_list[index] ^= random.randint(0, 255)
    return bytes(message_list)
```

Деректерді беру және өңдеу: Клиент серверге деректерді жібереді, онда деректер шуга ұшырап, қайтадан өңделіп клиентке жіберіледі (3-сурет).



3-сурет. Деректерді беру және өңдеу

Ескерту – авторлармен құрастырылған



4-сурет. BER мен SNR арасындағы тәуелділік

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Ұсынылған бағдарламалық қамтамасыз ету көмегімен КШД, LDPC және Рид-Соломон кодтау әдістерін қолдану арқылы сөнетін каналдардағы деректерді жеткізу тиімділігін талдауға мүмкіндік берді (4-сурет). Әрбір әдіс бойынша модельдеу жүргізіліп, SNR деңгейі өзгергенде биттік қате ықтималдығы (BER) бағаланды.

1-кесте. Кодтау әдістерін қолдану арқылы сөнетін каналдардағы деректерді жеткізу тиімділігін талдау нәтижесі

Параметр	КШД	LDPC	Рид-Соломон
Энергия тұтынуы төмендету	12-18 %	8-12 %	5-8 %
BER азаюы (SNR = 10 дБ)	$10^{-3} \rightarrow 8 \times 10^{-4}$	$10^{-3} \rightarrow 9 \times 10^{-4}$	$10^{-3} \rightarrow 9.5 \times 10^{-4}$
Сөну жағдайларындағы дәлдік	10-15 %-ға жақсарту	8-12 %-ға жақсарту	5-10 %-ға жақсарту

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Алынған нәтижелер көрсеткендей, КШД ең жоғары тиімділікті көрсетті. Әсіресе төмен SNR мәндерінде КШД басқа әдістермен салыстырғанда биттік қате ықтималдығын айтарлықтай төмендетті. Бұл КШД-ның жоғары тиімділігін және қателерді түзету қабілетін айқындайды. LDPC және Рид-Соломон кодтау әдістері де жақсы нәтижелер көрсетті, бірақ олардың тиімділігі КШД-ға қарағанда сәл төмен болды. Бұл әсіресе күрделі сөну жағдайларында айқын байқалды (1-кесте).

Қорытынды. Зерттеу барысында цифрлық радиожүйелердің энергетикалық тиімділігін арттырудың түрлі әдістері қарастырылды. Зерттеу үш негізгі әдісті қамтыды: Көп шекті декодер, LDPC және Рид-Соломон кодтары. Алынған нәтижелер КШД-дың басқа әдістермен салыстырғанда энергетикалық тұрғыдан ең тиімді әдіс екенін көрсетті.

Зерттеу нәтижелері бойынша, КШД-ды қолдану жүйенің энергия тұтынуын 12-18 %-ға төмендетуге мүмкіндік берді. LDPC және Рид-Соломон кодтары да жақсы нәтижелер көрсеткенімен, олардың энергетикалық тиімділігі КШД-дан төмен болды. Бұл КШД-дің күрделі радиоканалдардағы, әсіресе сөнетін жағдайларында, деректерді жеткізу сапасын жақсартуда маңызды рөл атқаратынын көрсетеді.

Сонымен қатар, алынған нәтижелер көрсеткендей, КШД өте ұзын кодтарды тіпті төмен есептеуіш күрделілікпен іс жүзінде оңтайлы декодтауға қабілетті болғандықтан, сөнетін түрлері, соның ішінде көпсәулелі арналардағы аралас сигналдар кезінде жоғары тиімділікті қамтамасыз етеді. Мұндай жағдайларда қысқа кодтар тиімсіз болып қалса да, КШД жоғары тиімділік көрсетеді. КШД күрделі қателер сипаттамалары бар заманауи жоғары жылдамдықты цифрлық деректерді беру жүйелерінде қолдануға жарамды екенін дәлелдейді.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Алғыс. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрілігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (грант AP19679505 – «Тізбекті кодтардың көп шекті декодтау алгоритмдерін зерттеу мен дамыту және оларды жоғары жылдамдықта сөнетін радиоарналар үшін бағдарламалық-аппараттық имплементациялау»).

Әдебиеттер тізімі

- Dillinger M., Madani K., Alonistioti N. (2003). Software Defined Radio: Architectures, Systems, and Functions. Wiley, 454 p
- Filimonov A.A., Slipenchuk K.S. (2020). The processing of OFDM system signals in dispersion channel. Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – Pp. 1428-1432.

- Harada H. (2005). Software defined radio prototype toward cognitive radio communication systems. Proceedings of the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005), Baltimore, MD, USA, pp. 539-547. doi: 10.1109/DYSPAN.2005.1542667.
- Massey J.L. (1963). Threshold Decoding. Massachusetts Institute of Technology, Research Laboratory of Electronics.
- Mitola J., Maguire G.Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. IEEE Personal Communications, vol. 6, no. 4, pp. 13-18. doi: 10.1109/98.788210.
- MUllah A., Ogiwara H. (2011). Performance improvement of multi-stage threshold decoding with difference register. IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci., vol. 94, no. 6, pp. 1449-1457.
- Satybaldina D.Zh., Zolotarev V.V., Ovechkin G.V. (2021). New concatenation schemes based on the multithreshold decoders of convolutional self-orthogonal codes for gaussian channels. Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications, vol. 9, no. 4, pp. 51-62.
- Sailaukyzy Zh., Satybaldina D., Danenova G., Kokkoz M., Tashatov N. (2023). Design of Majority Decoded Codes and Decoding Algorithm Based on Error Propagation Analysis. 7th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS 2023).
- Satybaldina D., Zolotarev V., Ovechkin G., Khassenova Z. (2024). Specifics of applying multi-threshold decoding methods to correct errors in fading communication channels. Journal of Electrical Systems, vol. 20, special issue, pp. 4003-4012.
- Seksembayeva M.A., Tashatov N., Ovechkin G.V., Seitkulov Y.N. (2022). Modeling of communication channels with multipath propagation of signals by noise-immunity coding procedures in the frameworks of LTE standard. Journal RENSIT.
- Seksembayeva M.A., Tashatov N., Ovechkin G.V., Satybaldina D., Seitkulov Y.N. (2021). Study of the principles of error correcting code in a multipath communication channel with intersymbol interference. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, vol. 99, no. 18.
- Yatribi A., Belkasmi M., Ayoub F. (2020). Gradient-descent decoding of one-step majority-logic decodable codes. Physical Communication, vol. 39, article no. 100999.
- Zolotarev V.V., Satybaldina D.Zh., Chulkov I.V., et al. (2017). Review of achievements in the optimization coding theory for satellite channels and Earth remote sensing systems: 25 years of evolution. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, vol. 14, issue 1, pp. 9-24. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-9-24.
- Zolotarev V.V., Zubarev Y.B., Ovechkin G.V. (2015). Optimization Code Theory and Multithreshold Algorithms. Geneva, ITU, 159 p. (E-book: <http://www.itu.int/pub/S-GEN-OCTMA-2015>).
- Филимонов А.А., Карташевский В.Г., Беспалов А.Н., Котков К.В. (2019). Прием сигналов OFDM со сверточным кодированием в каналах с памятью и быстрыми замираниями. Радиотехника, № 6, С. 48-53.// Filimonov A.A., Kartashevskij V.G., Bepalov A.N., Kotkov K.V. (2019). Priem signalov OFDM so svertochnym kodirovaniem v kanalah s pamyat'yu i bystryimi zamiraniyami. Radiotekhnika, № 6, S. 48-53
- Шеннон К.Е. (1963). Математическая теория связи. Работы по теории информации и кибернетике: сб. ст. М., 1963, С. 243-332.// SHennon K.E. (1963). Matematicheskaya teoriya svyazi. Raboty po teorii informacii i kibernetike: sb. st. M., 1963, S. 243-332

Information about authors

Sailaukyzy Zhuldyz – Ph.D., Associate Professor, Karaganda Technical University named after Abylka Saginov, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: zhuldyzsailaukyzy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7605-7634, +7 7027269206

Danenova Gulmira Tulendievna – Ph.D., Associate Professor, Karaganda Technical University named after Abylka Saginov, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: guldan72@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3301-7282, +7 701 745 4519

Kokkoz Mahabbat Meiramovna – Ph.D., Associate Professor, Karaganda Technical University named after Abylka Saginov, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: makhabbat_k@bk.ru, ORCID: 0000-0002-6232-1868, +7 700 461 8846
