

# Тізбекті кодтардың көп шекті декодтау параметрлерін оңтайландыру алгоритмін әзірлеу

**САЙЛАУҚЫЗЫ Жұлдыз**, PhD, доцент м.а., s\_k\_zhuldiz@mail.ru,

«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56.

**Аңдатпа.** Мақалада ең танымал және іс жүзінде қолданылатын кодтау/декодтау схемалары зерттелінді. Алгоритмдік күрделілікті талдау және Гаусс арналары үшін кодтау схемаларының жұмысын модельдеу нәтижелері барлық қарастырылған блок өлшемдері мен кодтау жылдамдығы бойынша түйілген кодтардың көп шекті декодері (КШД) ғана басқаларынан жоғары болатыны айқындалды. Көп шекті декодер қосымша айырмашылық регистрі қосылған Мессидің қарапайым шекті декодерін дамыту болып табылады. Бұл декодер блоктық және түйілген өздігінен басқаратын кодтарды шешуге мүмкіндік береді. Түйілген кодерлердің жұмыс принциптері егжей-тегжейлі қарастырылды, түйілген кодтар үшін КШД мен Витерби декодерінің сипаттамалары салыстырылды. КШД үшін ең жақсы өзін-өзі басқаратын кодтар таңдалды, аддитивті ақ Гаусс шуы бар арналардағы КШД тиімділігі зерттелді. Символдық өздігінен реттелетін кодтардың КШД параметрлерін оңтайландыру негізінде КШД өнімділігін арттыру алгоритмі ұсынылды.

**Кілт сөздер:** BLER, кодер, декодер, бит, көп шекті декодтау, алгоритм, символдық кодтар, кедергіге төзімді кодтар, түйілген кодтар.

**Кодтау/декодтау алгоритмдерінің есептеу күрделілігін талдау.** Бүгінгі таңда 5G байланыс технологиясын енгізу мобильді кеңжамақты қосымшаларға сұраныстың артуымен ғана емес, сонымен қатар интернет заттары үшін технологияның дамуымен де байланысты. Интернет заттары арасындағы маңызды байланыс өндірісті автоматтандыру, тактильді интернет, ақылды желі және автоматтандырылған жүргізу сияқты қосымшаларды қолдау үшін өте сенімді кідіріс байланысын қажет етеді (ultra-reliable low latency communication, URLLC).

5G желілері үшін жаңа әмбебап радио қол жетімділік технологиясы (radio access technology, RAT) осындай әр түрлі пайдалану жағдайлары мен талаптарын қолдайтын негізгі факторлардың бірі болып табылады. RAT әрдайым арнаны кодтауды қолданады, өйткені деректерді беру жетілмеген арна ортасында жүреді. Арнаны кодтау үшін ұсынылатын шуылға төзімді кодтарының ішінен таңдау қосымшаның талаптарына және кодтау мен декодтаудың қол жетімді есептеу қуатына байланысты. Айқын таңдау-бұл алдыңғы буын ұялы байланыс технологиясында (LTE) қолданылатын турбо кодтары. Алайда, турбо кодтары 5G желілерінде қолдануға оңтайлы емес таңдау болуы мүмкін: оларды жүзеге асырудың күрделілігі қажетті жоғары жылдамдықты қолдау үшін тым жоғары, ал  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  деңгейінде декодтау қателерінің минималды деңгейі, бұл URLLC үшін жеткіліксіз. 5G желілері үшін RAT каналын

кодтау сызбасын (схема) таңдау BLER (Block Error Rate) өнімділігін, іске асырудың күрделілігін, декодтау/кодтаудың кідірісін және икемділікті (код ұзындығы мен код жылдамдығының өзгеруіне және т.б. қатысты) ескеруі керек.

Сондықтан зерттеудің бірінші кезеңінде URLLC талаптары контекстінде бірнеше кодтау схемалары бағаланды: жүзеге асырудың күрделілігі қажетті деректер жылдамдығына жету үшін төмен, кіші және орта (< 1000 бит) код ұзындығындағы қателіктердің өте жоғары ықтималдығы, кодтау/декодтау процесінің кідірісі және пакеттік қателіктердің өте төмен деңгейі.

Ең танымал және тиімді кодтау/декодтау схемалары зерттелді, яғни: Турбо кодтары, төмен тығыздықты LDPC кодтары, полярлық және түйілген кодтар. Турбо кодында 3GPP LTE стандарттарында анықталған параметрлер бар. Кодтау схемасына каскадты рекурсивті жүйелі түйілген кодерлер, жылдамдықты өзгерту және үйлестіру алгоритмдері кіреді. Декодерде 8 итерациясы бар max-log-MAP алгоритмі қолданылды.

Кодтарды жүзеге асырудың алгоритмдік күрделілігі кодтаумен де, декодтаумен де байланысты қарапайым есептеу операциялары арқылы анықталады. Жалпы алғанда, кодтау және декодтау операцияларының көпшілігі қосу операциясына эквивалентті, ал салыстыру операциясы көп жағдайда екілік қосуға сәйкес келеді. Ең күрделі әрекет-бұл алты қосындыны қажет ететін іздеу әрекеті. 1-кестеде операциялар санын есептеуге

және алгоритмдердің жалпы есептеу күрделілігін анықтауға арналған деректер берілген [1-2].

1-кестеде қарастырылатын кодтардың параметрлері үшін келесі белгілер қолданылады:

$n$ ,  $R$ ,  $M$  сәйкесінше код ұзындығын, код жылдамдығын және паритет биттерінің санын білдіреді;

$m$  – турбокодтың немесе түйілген кодтың жады регистрінің ұзындығы;

$d_v$  және  $d_c$  – тиісінше паритеттік бақылау матрицасының орташа дәрежесі (parity check matrix, PCM) LDPC-кодтар үшін тексерудің орташа дәрежесі;

$L$  – полярлық код декодері тізімінің өлшемі;

$I_{\max}$  – декодтау итерациясының максималды саны;

$d$  – түйілген коды үшін ең аз кодтық қашықтық.

Зерттелген кодтау схемаларының күрделілігін есептеу нәтижелері Турбо кодтарымен салыстырғанда 2-кестеде келтірілген. Турбо кодтық декодер жұмысының итерацияларының саны базалық деңгей ретінде 8 итерацияға тең. Салыстырмалы нәтижелерді алу үшін түйілген және LDPC код-

тарын декодтау үшін операциялар санын, сондай-ақ полярлық кодтарды декодтау алгоритмі тізімінің ұзындығын есептеу кезінде бірдей итерация қолданылады. Алайда, есептеулерде полярлық кодтардың сәйкесінше  $O(N \cdot \text{poly}(\log_2 N))$  және  $O(N \cdot \log_2 N)$  логарифмдік функциялары болып табылатын кодтардың күрделілігіне және кодердің күрделілігіне байланысты кодтаудың қосымша күрделілігі бар екендігі ескерілмеген.

Талдауда көрсеткендей, түйілген кодтар ең аз декодтау күрделілігіне ие. Жалпы жағдайда декодердың күрделілігі әртүрлі параметрлерге байланысты екені анықталды және оның негізінде бүкіл кодтау схемасының алгоритмдік күрделілігін негіздеуге болады. Мұндай есептеулер негізінен бағдарламалық қамтамасыз етуді енгізуге бағытталған және тиімді кодтарды таңдау және олардың негізінде бағдарламалық жасақтаманы әзірлеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Гаусс арналары үшін кодтау схемаларының жұмысын имитациялық модельдеу нәтижелері барлық қарастырылған блок өлшемдері мен кодтау жылдамдығы бойынша түйілген кодтардың

1-кесте – Турбокодтар, LDPC кодтары, полярлық және түйілген кодтар негізінде кодтау схемаларының есептеу күрделілігі

Кодтау / декодтау алгоритмі	Қарапайым қосу операцияларының саны	Максимумды іздеудің қарапайым амалдарының саны
Турбо код / Max-log-MAP	$I_{\max} \cdot 16 \cdot R \cdot N \cdot 2^m$	$I_{\max} \cdot 8 \cdot R \cdot N \cdot 2^m$
LDPC / min-sum	$I_{\max} \cdot (2 \cdot N \cdot d_v + 2M)$	$I_{\max} \cdot (2 \cdot d_c - 1) \cdot M$
Полярлық код	$L \cdot N \cdot \log_2 N + (N - M) \cdot L \cdot \log_2 2L$	Қолданылмайды
Түйілген код / Витерби алгоритмі	$4 \cdot R \cdot N \cdot 2^m$	Қолданылмайды
Тізбекті код / Көп шекті декодтау алгоритмі	$(I_{\max} + 1) \cdot (d + 1) \cdot N \cdot 2^m$	Қолданылмайды

2-кесте – Турбокодтар, LDPC кодтары, полярлық және түйілген кодтар негізінде кодтау схемаларының алгоритмдік күрделілігі

Ұзындық / жылдамдық	Кодтау / декодтау алгоритмі	$m$	$d_v$	$d_c$	$I_{\max}$	$L$	Операциялардың жалпы саны	Турбо кодтармен салыстырғанда пайыздық қатынас, %
N = 14 R = 1/2	Турбо код / Max-log-MAP	3	-	-	8	-	10752	100
	LDPC / min-sum	-	2,576	3,864	47	-	10867,9	101,08
	Полярлық код	-				53	10900,97	101,39
	Тізбекті код / Витерби алгоритмі	8	-	-		-	7168	66,67
	Тізбекті код / Көп шекті декодтау алгоритмі	3			8		6048	56,25
N = 200 R = 1/3	Турбо код / Max-log-MAP	3	-	-	8	-	307200,00	100
	LDPC / min-sum	-	2,576	3,864	47	-	309400,40	100,72
	Полярлық код	-				53	309300,57	100,68
	Тізбекті код / Витерби алгоритмі	8	-	-		-	204800,00	66,66
	Тізбекті код / Көп шекті декодтау алгоритмі	3			8		169344,00	55,13%

көп шекті декодерлары ғана басқаларынан жоғары болатынын көрсетеді. 40 биттік қысқа блоктар үшін LDPC және полярлық кодтар турбо кодтардан және түйілген кодтардан асып түсті, ал 200 биттік орташа блоктар үшін керісінше.

BLEP және алгоритмдік күрделілік талдауларының нәтижелерін кодтау схемаларындағы айырмашылықтарды белгілі бір дәрежеде анықтау үшін пайдалануға болады. 5G-де URLLC пайдалану сценарийі үшін кодтау схемасын таңдағанда, көптеген басқа аспектілерді, мысалы, қателерді түзету схемаларының жылдамдығын, икемділікті (параметрлерді реттеу мүмкіндігі және байланыс арналарының модельдерінде жұмыс істеу мүмкіндігі) зерттеу қажет.

**Екілік және екілік емес кодтардың көп шекті декодтау алгоритмдері.**

Жоғарыда әртүрлі декодтау алгоритмдерін талдау негізінде КШД тиімділігі мен іске асырудың күрделілігі бойынша ең жақсы екенін байқадық, сондықтан оларды дамыту перспективалы және маңызды бағыт болып табылады деп қорытынды жасауға болады.

Деректерді сақтаудың заманауи жүйелері үшін деректерді бұрмалаудан қорғау міндеті өзекті болып табылады. Бұл мәселе шуылға төзімді кодтау әдістері негізінде де шешіледі. Бұл жағдайда символдар деңгейіндегі деректермен жұмыс істейтін екілік емес шуылға төзімді кодтарды пайдалану ыңғайлы. Айта кету керек, қазіргі уақытта екілік емес шуылға төзімді кодтардың ішінде тек 50 жыл бұрын ұсынылған Рид-Соломон (РС) кодтары практикалық қолданыс тапты. Өкінішке орай, іс жүзінде қолданылатын РС қысқа кодтары үшін декодерлер арнадағы үлкен шу кезінде қателерді түзетудің жоғары тиімділігін қамтамасыз ете алмайды, ал РС ұзын кодтары үшін декодерлерді іске асырудың жоғары күрделілігіне байланысты құру мүмкін емес. Бірқатар жарияланымдарда РС кодтарының орнына символдық көп шекті кодтарды (qКШД) декодтауға мүмкіндік беретін символдық көп шекті декодерлерді (qӨБК) пайдалануға болатындығы көрсетілген [3-4]. Бұл декодерлер q-ші симметриялық арнадағы (qСА) символдық қатенің жоғары ықтималдығы бар өте ұзын qӨБК-тардың оңтайлы декодталуын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Жұмыста алдымен qӨБК-ды декодтау үшін

қолданылатын бастапқы кодер мен декодердің алгоритмдері ұсынылған, содан кейін декодтау функциясын азайту негізінде оның үдеу параметрлерін оңтайландыру арқылы екілік емес көп шекті декодердің жұмысын жақсарту әдісі қарастырылады.

Символды qӨБК белгілі бір ақпараттық символды басқаратын барлық тексерулер жүйесінің өзі осы символға қатысты ортогональды екендігімен сипатталады. ӨБК кодтау әрекетін жүзеге асыру үшін ығысу регистрлеріне негізделген қарапайым схемаларды қолдануға болады. 1-суретте  $g(x) = 1 + x + x^4 + x^6$  генеративті полиноммен берілген кодер-кодер схемасының мысалы келтірілген.

Тиісінше бұл код код ұзындығының, ақпараттық жүйелілік ұзындығының, кодтық жылдамдықтың және ең аз кодтық қашықтықтың параметрлерімен сипатталады  $n=26, k=13, R=1/2, d=5$ . Ұқсас схема блоктық qӨБК кодтау кезінде де қолданылады.

Кодер  $U$  ақпараттық векторын кодтап,  $A=[U, V]$  код векторын алсын делік, мұндағы  $V=U*G$ . Векторлар мен матрицаларды көбейту, қосу және азайту амалдарын орындау кезінде модульдік арифметика қолданылатынын ескеруіміз қажет. Ұзындығы  $n$   $A$  кодтық векторын  $k$  ақпараттық символы бар qСА арқылы жібергеннен кейін декодер  $Q$  векторын алады, ол арнаның бұрмалануына байланысты бастапқы код векторынан ерекшеленеді:

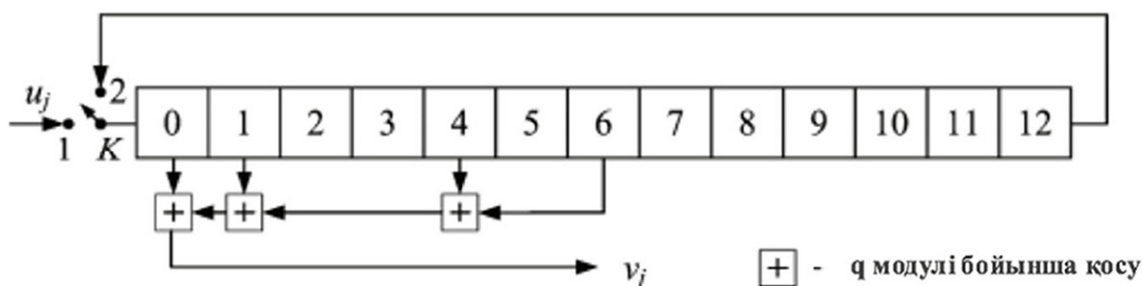
$$Q = A + E, \tag{1}$$

мұнда  $E$  – qСК типті арнаның шу векторы.

$Q$  векторын декодтау кезінде qКШД алгоритмі келесідей [5].

1.  $S=H \cdot QT$  синдромының векторы есептеледі.  $D$  айырмашылық регистрі нөлденеді, осы регистрде декодермен өзгертілген ақпараттық таңбалар белгіленеді.  $D$  және  $S$  векторларының нөлдік емес элементтерінің саны әрқашан арнадан қабылданған  $Q$  хабарламасы мен ағымдағы qКШД шешімі болып табылатын код сөзі арасындағы қашықтықты анықтайтынын ескереміз. Декодердің міндеті –  $D$  және  $S$  векторларының нөлдік емес элементтерінің саны минималды болатын код сөзін табу.

2. Қабылданған хабарламаның ерікті түрде алынған  $q$ -ші декодталған  $i_j$  ақпараттық символы үшін  $S$  синдром векторының  $s_j$  тексерулерінің екі



1-сурет – qӨБК блоктық екілік емес кодының кодері

ең көп тараған мәндерінің саны символға қатысты барлық тексерулердің жалпы санынан есептеледі.  $i_j$ , сонымен қатар  $i_j$  символына сәйкес  $D$  векторының  $d_j$  символы. Осы екі тексерудің мәндері  $h_0$  және  $h_1$ -ге тең болсын, ал олардың саны  $m_0 \geq m_1$  болғанда сәйкесінше  $m_0$  және  $m_1$ -ге тең болсын. Бұл қадам екілік КШД-де шекті элемент бойынша соманы алу процедурасына ұқсас.

3. Егер  $m_0 - m_1 > T$ , мұндағы  $T$  – шекті мән (кейбір теріс емес бүтін сан), онда  $h_0$ -ге тең қателік бағалау  $i_j$ ,  $d_j$  және  $i_j$ -ге қарсы барлық тексерулерден шегеріледі.

4. Жаңа  $i_m$ ,  $m \neq j$  таңдауы бар және 2-қадамға көшу жүзеге асырылады.

2-суреттегі кодер үшін қКШД схемасын іске асыру көрсетілген.

**Декодер параметрлерін оңтайландыру негізінде символдық кодтарда көп шекті декодтау алгоритмін дамыту.**

қКШД жұмысының жоғарыда аталған принциптерін талдаудан оның тиімділігі ( $P_s$  символдарын декодтау қатесінің ықтималдығы) көптеген параметрлерге байланысты болады. Оларға декодтау қателерінің көбею деңгейін азайту қағида-даттарына сәйкес таңдалған қолданылатын код, декодтау итерацияларының саны, әр итерациядағы шектер мен салмақ коэффициенттері, байланыс арнасындағы шу деңгейі кіруі керек. Біз осы параметрлерді таңдаудың жалпы тәсілдерін ұсынамыз.

Математикалық тұрғыдан, декодтау қатесінің ықтималдығы мен декодер параметрлері арасындағы байланысты келесі түрде ұсынуға болады:

$$P_s = f(t, w, poly, p_0), \quad (2)$$

мұнда  $t$  – декодтаудың әртүрлі итерацияларындағы шекті мәндердің векторы;

$w$  – айырмашылық регистрінің элементтері үшін салмақ коэффициенттерінің мәндерінің векторы;

$poly$  – көпмүшені құраушы;

$p_0$  – байланыс арнасындағы символдық қатенің ықтималдығы.

Көрсетілген параметрлердің мәндерін декодер арнадағы шу деңгейі мүмкіндігінше оңтайлы шешімді қамтамасыз ете алатындай етіп таңдау керек. Яғни, декодерді орнатқан кезде, мүмкіндігінше  $p_0$  үшін (1) функцияны азайту керек.  $t$  және  $w$  векторларының элементтерінің мәндері дискретті екенін есте ұстаған жөн, яғни бізде көптеген дискретті айнымалылардың функциясын азайту мәселесі бар.

Декодер параметрлерінің әртүрлі комбинацияларының санын бағалауға болады.  $t$  векторының элементтері  $t_n = 5$  түрлі мәндердің ретін, ал  $w$  векторының элементтері  $w_n = 4$  мәндерінің ретін қабылдай алатындығы эмпирикалық түрде анықталды. Тиісінше, декодер параметрлерінің әртүрлі мәндерінің комбинацияларының саны  $t_n^l w_n^l$ -ге тең, мұндағы  $l$  – декодтау итерацияларының саны (әдетте шу деңгейіне байланысты 10-дан 30-ға дейінгі мәндерді алады). Яғни, параметр мәндерінің нұсқаларының жалпы саны  $20^{30}$ -не дейін, ал кейбір жағдайларда одан да көп болуы мүмкін. Сондықтан, сұрыпталған опциялар санын едәуір азайтуға мүмкіндік беретін декодтау функциясын азайту алгоритмдерін жасау қажет.

Оңтайландыру мәселесінің тағы бір ерекшелігі-мақсатты функция (1) аналитикалық түрде берілмеген. Оның үлкен шу кезіндегі маңыздылығын компьютерлік модельдеу арқылы ғана бағалауға болады, бұл көп уақытты қажет етеді. Бұл қосымша және оңтайландыру процесін айтарлықтай қиындатады [6].

Ұсынылған  $f$  декодтау функциясын азайту алгоритмінің негізгі қадамдары:

1. *Параметрлердің бастапқы орнатылуы.* Салмақ векторының бастапқы мәні ретінде бірлік векторын, ал шекті вектор үшін нөлдік векторды таңдаған жөн. Кейбір жағдайларда декодер де-



2-сурет – Символды КШД (қКШД) схемалық жүзеге асырылуы

кодтаудың алғашқы итерацияларында аз қателіктер жіберу үшін, шекті вектордың алғашқы мәндерін 0-ден үлкен етіп алған дұрыс.

2. *Итерация бойынша оңтайландыру.* Ең жақсы qKШД параметрлерін табу процесі әр итерация үшін дербес орындалуы мүмкін. Бұл тәсіл үшін сұрыпталатын параметрлердің жалпы саны Itnwn-ге дейін азаяды. Сонымен қатар, әр түрлі итерациялар үшін функцияның мәндерін (1) талдау нәтижесінде бұл функция көп жағдайда дөңес екендігі көрсетілді, сонымен қатар минимумды табу үшін координаталық түсу әдісін қолдануға мүмкіндік береді. Бұл әрекет азайту кезінде таңдау опцияларының санын бірнеше есе азайтады.

Айта кететін жайт, мұндай тәсілмен ең жақсы шешім әдетте алынбайды, себебі келесі итерацияның шекті элементінің жұмысы көбінесе декодтаудың алдыңғы итерацияларының шекті элементтерінің жұмысымен анықталады. Бірақ, модельдеу нәтижелері қолайлы шешім алуға болатынын көрсетті.

3. *Жалпы оңтайландыру.* Алдыңғы қадамда алынған шешімді әр декодтау итерациясы үшін салмақ пен шекті мәндерді ±1-ге өзгерту және соңғы итерацияның шығуында декодтау қатесінің ықтималдығын бақылау арқылы жақсартуға болады. Бұл процесі декодер шешімі жақсарғанға дейін бірнеше рет қайталауға болады және 9IK нұсқасынан артық емес жағдайлар қарастырылады. (мұнда K – оңтайландыру циклдерінің саны, әдетте бірнеше ондағаннан аспайды) [7].

1-суретте кодтық жылдамдығы 1/2, кодтық қашықтық 11 және ұзындығы 20000 таңбадан тұратын qKШД коды үшін qSC-дегі шу деңгейіне байланысты декодтау қатесінің ықтималдығы графиктері ұсынылған.

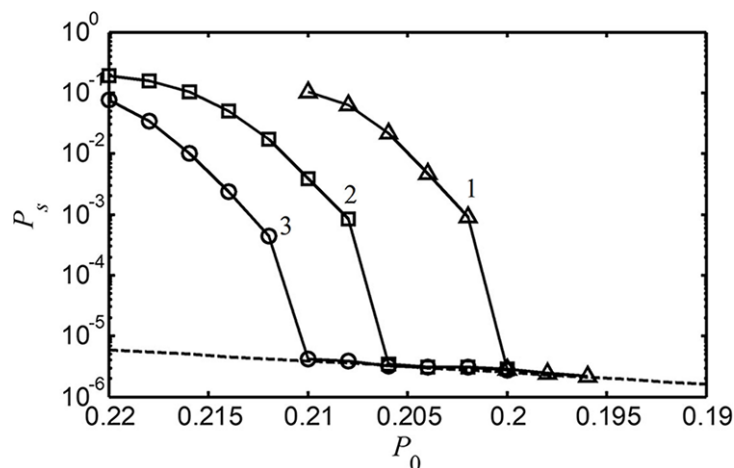
1-қисық 3-суретте бастапқы параметрлері бар KШД сипаттамалар (1-қадам), 2-қисықта итерация үшін параметрлерді бөлек оңтайландырғаннан кейінгі нұсқалары бар KШД үшін сипаттамалар (2-қадам), ал оңтайландырудан кейінгі параметрлері бар KШД үшін сипаттама 3-қисықта

берілген (3-қадам). Суретте нүктелермен код үшін оңтайлы декодер қатесінің ықтималдығын бағалау анықталған. Итерацияны оңтайландыру және тұтастай оңтайландыру бірнеше жақсы сипаттамаларды алуға мүмкіндік беретінін ескеру қажет. Сонымен қатар, бұл пайда алгоритмнің күрделенуіне байланысты емес (декодер бұрынғыдай қарапайым болып қалады), бірақ оның даму сатысында декодер параметрлерін жақсы таңдаудың арқасында ғана алынады. Осылайша, ұсынылған тәсіл қолайлы есептеу күрделілігімен оңтайландырылмаған нұсқамен салыстырғанда арнадағы шу деңгейі жоғарырақ, онда қолданылатын кодты тиімді декодтауды қамтамасыз ететін qKШД параметрлерін табуға мүмкіндік береді [8].

### Қорытынды

Ең танымал және іс жүзінде қолданылатын кодтау/декодтау схемалары (Турбо-кодтар, төмен тығыздықты LDPC кодтары, полярлық және түйілген кодтар) BLER өнімділік параметрлерінің арақатынасы, іске асыру күрделілігі, декодтау/кодтау қалып қоюы және икемділігі тұрғысынан зерттелді. Алгоритмдік күрделілікті талдау және Гаусс арналары үшін кодтау схемаларының жұмысын модельдеу нәтижелері барлық қарастырылған блок өлшемдері мен кодтау жылдамдығы бойынша түйілген кодтардың көп шекті декодері ғана басқаларынан жоғары болатыны айқындалды. Зерттеу аймағы ретінде түйілген кодтарды және түйілген символдық және екілік кодтардың көп шекті декодерлерін таңдау негізделді. Түйілген кодтардың жұмыс істеу принциптері егжей-тегжейлі қарастырылды, көп шекті декодерлермен түйілген кодтар үшін Витерби декодерінің сипаттамалары салыстырылды. Символдық өзін-өзі басқаратын кодтардың көп шекті декодтау параметрлерін оңтайландыруға негізделген KШД өнімділігін арттыру алгоритмі ұсынылды.

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы ғылым және жоғары білім министрлігінің қаржылық қолдауымен орындалды (грант № AP19679505).



3-сурет – в qSC-де qKШД тиімділігі

## ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Sybis M., Wesolowski K., Jayasinghe K. et al. Channel Coding for Ultra-Reliable Low-Latency Communication in 5G Systems// Proceed. 2016 IEEE 84th vehicular technology conference (VTC-Fall-2016). – Montreal, 2016. – Pp. 1-5.
2. Sailaukyzy Zh. LDPC koderi negizinde bailanys arnasyndaǵy signaldardyń tutastyǵyn zertteý// Tr. KarGTU. – 2021. – No. 4. – Pp. 323-326.
3. Zolotarev V.V., Ovechkin G.V. Ispol'zovanie mnogoporogovogo dekodera v kaskadnykh skhemah // Vestnik RGRTA. – 2003. – No. 11. – Pp. 112-115.
4. Zolotarev V.V., Ovechkin G.V. Efficient Multithreshold Decoding of Nonbinary Codes // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2010. – Vol. 55, Issue 3. – Pp. 302-306.
5. Richardson T., Urbanke R. Modern Coding Theory. – Cambridge: University Press, 2008. – 592 p.
6. Satybaldina D.Zh., Sailaukyzy Zh., Sadykov A.A., Tashatov N.N. Simvoldy kodtardyń kópsatyly dekoderiniń parametrlerin tiimdileý ádisi // Tr. KarGTU. – 2017. – No. 1. – Pp. 92-95.
7. Satybaldina D., Ovechkin G., Sailaukyzy Zh. et al. Parameters Optimization of the Multithreshold Decoders for Non binary Error Correcting Codes // Abstract Book ICCES-2016 3rd internat. conf. on Computational and Experimental Science and Engineering. – Kemer; Antalya, 2016. – P. 409.
8. Satybaldina D., Ovechkin G., Sailaukyzy Zh. et al. Parameters Optimization of the Multithreshold Decoders for Non binary Error Correcting Codes // International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering. – 2017. – Vol. 3, Issue 2. – Pp. 8-11.

**Разработка алгоритма оптимизации параметров многопорогового декодирования сверточных кодов**

**САЙЛАУҚЫЗЫ Жұлдыз**, PhD, и.о. доцента, s\_k\_zhuldiz@mail.ru,

НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56.

**Аннотация.** Исследованы наиболее известные и практически применяемые схемы кодирования/декодирования. Результаты анализа алгоритмической сложности и имитационного моделирования работы схем кодирования для гауссовских каналов показывают, что только многопороговые декодеры (МПД) сверточных кодов превосходят все остальные для всех рассматриваемых размеров блоков и скоростей кодирования. Многопороговый декодер (МПД) является развитием простейшего порогового декодера Мессе, в который добавлен дополнительный разностный регистр. Данный декодер позволяет декодировать блочные и сверточные самоортогональные коды. Подробно рассматриваются принципы работы сверточных кодеров, сравниваются характеристики МПД и декодера Витерби для сверточных кодов. Выбраны наилучшие для МПД самоортогональные коды, исследована эффективность МПД в каналах с аддитивным белым гауссовским шумом. Предложен алгоритм повышения производительности МПД на основе оптимизации параметров МПД символьных самоортогональных кодов.

**Ключевые слова:** BLER, кодер, декодер, бит, многопороговое декодирование, алгоритм, символьные коды, помехоустойчивые коды, сверточные коды.

**Development of an Algorithm for Optimizing Parameters of Multithreshold Decoding of Convolutional Codes**

**SAILAUKYZY Zhuldiz**, PhD, Acting Associate Professor, s\_k\_zhuldiz@mail.ru,

NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56.

**Abstract.** The most known and practically used coding/decoding schemes are investigated. The results of the analysis of algorithmic complexity and simulation of the operation of coding schemes for Gaussian channels show that only multi-threshold decoders of convolutional codes outperform all others for all considered block sizes and coding rates. The multithreshold decoder (MTD) is a development of the simplest Messian threshold decoder with an additional difference register added. This decoder allows decoding block and convolutional self-orthogonal codes. The operating principles of convolutional encoders are considered in detail, the characteristics of multithreshold decoders and the Viterbi decoder for convolutional codes are compared. The best self-orthogonal codes for MTD are chosen, the efficiency of MTD in channels with additive white Gaussian noise is studied. An algorithm for increasing the performance of multithreshold decoding (MTD) based on the optimization of the MTD parameters of symbolic self-orthogonal codes is proposed.

**Keywords:** BLER, encoder, decoder, bit, multithreshold decoding, algorithm, character codes, error-correcting codes, convolutional codes.

## REFERENCES

1. Sybis M., Wesolowski K., Jayasinghe K. et al. Channel Coding for Ultra-Reliable Low-Latency Communication in 5G Systems// Proceed. 2016 IEEE 84th vehicular technology conference (VTC-Fall-2016). – Montreal, 2016. – Pp. 1-5.
2. Sailaukyzy Zh. LDPC koderi negizinde bailanys arnasyndaǵy signaldardyń tutastyǵyn zertteý// Tr. KarGTU. – 2021. – No. 4. – Pp. 323-326.
3. Zolotarev V.V., Ovechkin G.V. Ispol'zovanie mnogoporogovogo dekodera v kaskadnyh skhemah // Vestnik RGRTA. – 2003. – No. 11. – Pp. 112-115.
4. Zolotarev V.V., Ovechkin G.V. Efficient Multithreshold Decoding of Nonbinary Codes // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2010. – Vol. 55, Issue 3. – Pp. 302-306.
5. Richardson T., Urbanke R. Modern Coding Theory. – Cambridge: University Press, 2008. – 592 p.
6. Satybaldina D.Zh., Sailaukyzy Zh., Sadykov A.A., Tashatov N.N. Simvoldy kodtardyń kópsatyly dekodeleriniń parametrlerin tiimdileý ádisi // Tr. KarGTÝ. – 2017. – No. 1. – Pp. 92-95.
7. Satybaldina D., Ovechkin G., Sailaukyzy Zh. et al. Parameters Optimization of the Multithreshold Decoders for Non binary Error Correcting Codes // Abstract Book ICCESSEN-2016 3rd internat. conf. on Computational and Experimental Science and Engineering. – Kemer; Antalya, 2016. – P. 409.
8. Satybaldina D., Ovechkin G., Sailaukyzy Zh. et al. Parameters Optimization of the Multithreshold Decoders for Non binary Error Correcting Codes // International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering. – 2017. – Vol. 3, Issue 2. – Pp. 8-11.