

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ  
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Оралтай Диасбек Олжасұлы

«Байланыс жүйесіндегі антенналардың кеңістіктік-уақыттық кодтау әдістерін  
зерттеу»

**ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС**

6B06201 «Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы

Алматы 2024 ж.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ  
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

**ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ**

Кафедра меңгерушісі

 Е. Таштай

« 30 » 05 2024 ж.

**ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС**

Тақырыбы: «Байланыс жүйесіндегі антенналардың кеңістіктік-уақыттық  
кодтау әдістерін зерттеу»

6B06201 «Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы

Орындаған:



Д.О. Оралтай

Пікір беруші

ХАТУ, «Компьютерлік  
технологиялар және  
киберқауіпсіздік» факультетінің  
деканы, т.ғ.к.

 Н.А. Сейлова

« 30 » 05 2024 ж.

Ғылыми жетекші

ҚазҰТЗУ, т.ғ.м., Электроника,  
телекоммуникация және ғарыштық  
технологиялар кафедрасының  
аға оқытушысы

 Дағарбек Р.

« 30 » 05 2024 ж.

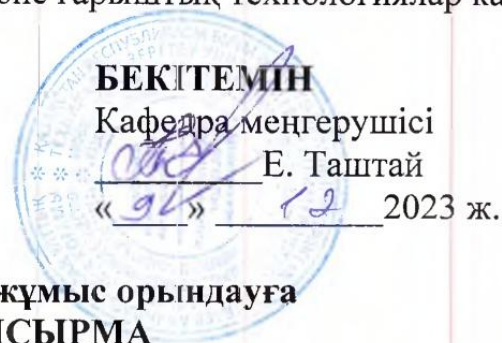
Алматы 2024 ж.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ  
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы



Дипломдық жұмыс орындауға  
ТАПСЫРМА

Білім алушы *Оралтай Диасбек Олжасұлы*

Тақырыбы *«Байланыс жүйесіндегі антенналардың кеңістіктік-уақыттық кодтау әдістерін зерттеу»*

Университет ректорының *«04» желтоқсан 2023 ж. №548-П бұйрығымен* бекітілген.

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі *«30» сәуір 2024 ж.*

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістері:

- 1) *Кеңістік-уақыт кодтары;*
- 2) *Шеннон Формуласының сипаттамалары;*
- 3) *МІМО математикалық моделі;*

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

- a) *Кеңістік-уақыт кодтарының оңтайлылық критерийлерін талдау;*
- б) *Үлкен өлшемді кеңістік-уақыт кодының арнасының эквивалентті виртуалды матрицасын синтездеу әдістері;*
- в) *Екіден көп антенналар саны үшін өзгертілген кодты қалыптастыру;*
- г) *Кеңістік - уақыт матрицаларының оңтайлылығының жаңа өлшемін талдау.*

Сызбалық материалдар тізімі (міндетті сызбалар дәл көрсетілуі тиіс):

Ұсынылатын негізгі әдебиет 20 атау: 1) 3GPP Технический стандарт TR 136.913 v 15.0.0, Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)/ETSI //2018. – p.17, <https://www.etsi.org> 2. Прокис, Дж. Цифровая связь/Перевод с английского и под редакцией Д.Д. Клоковского // Москва. Радио и связь, 2000. – 797 с. 3. Аджемов, А. Общая теория связи: Учебник для вузов/Аджемов А.С., Санников В.Г. //Москва. Горячая линия – Телеком, 2018. - 624 с. 4. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники/ Б.Р. Левин // Москва. Радио и связь, 1989. – 656 с.



ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫСТЫ (ЖОБАНЫ) ДАЙЫНДАУ  
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	04.01.2024 - 01.02.2024	<i>Оралтай</i>
Теориялық ақпарат	01.02.2024 - 01.03.2024	<i>Оралтай</i>
Жабдықтар жұмысының есебі және жұмысты рәсімдеу	01.03.2024 - 30.05.2024	<i>Оралтай</i>

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен  
норма бақылаушының аяқталған жұмысқа(жобаға) қойған

ҚОЛТАҢБАЛАРЫ

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	ЭТЖҒТ каф.аға оқытушысы, т.ғ.м. Дағарбек Р.	01.02.2024	<i>Рахатбек</i>
Теориялық ақпарат	ЭТЖҒТ каф.аға оқытушысы, т.ғ.м. Дағарбек Р.	01.03.2024	<i>Рахатбек</i>
Норма бақылау	ЭТЖҒТ каф.аға оқытушысы, PhD, Досбаев Ж.М.	15.05.2024	<i>Досбаев</i>

Ғылыми жетекшісі

*Рахатбек* Рахатбек Д.

Тапсырманы орындауға алған білім алушы

*Оралтай* Оралтай Д. О.

Күні «13» желтоқсан 2023 ж.

## **АНДАТПА**

Дипломдық жұмыс «Байланыс жүйесіндегі антенналардың кеңістіктік-уақыттық кодтау әдістерін зерттеу» тақырыбында талданды. Жұмыстың мақсаты белгілі ғарыштық уақыт матрицаларын қолданатын МІМО жүйелерінің сипаттамасынан асатын шуылға қарсы сипаттамалары бар МІМО жүйелері үшін кеңістік-уақыт матрицаларын, оның ішінде үлкен өлшемді жобалау мен зерттеуден тұратын маңызды ғылыми мәселені шешу. Осы жұмыста мақсатқа жету үшін ортогональды және ортогональды емес кеңістіктік-уақыттық кодтарды салыстырмалы талдау, сондай - ақ белгілі кеңістіктік-уақыттық матрицаларға негізделген үлкен өлшемді кодтарды қалыптастыру әдістері талданды. Жаңа ортогональды емес кеңістіктік-уақыттық кодтарды әзірлеу және әртүрлі жағдайларда олардың шуылға төзімділігін талданды.

## **АННОТАЦИЯ**

Диссертация была проанализирована на тему «исследование методов пространственно-временного кодирования антенн в системе связи». Цель работы-решить важную научную проблему, заключающуюся в проектировании и изучении матриц пространства-времени, в том числе больших размеров, для систем МІМО с помехозащищенными характеристиками, выходящими за рамки характеристик систем МІМО, использующих известные матрицы пространства-времени. В настоящей работе был проанализирован сравнительный анализ ортогональных и неортогональных пространственно-временных кодов для достижения цели, а также Методы формирования многомерных кодов на основе известных пространственно - временных матриц. Была проанализирована разработка новых неортогональных пространственно-временных кодов и их помехоустойчивость в различных условиях.

## **ANNOTATION**

The thesis was analyzed on the topic "Methods of spatio-temporal coding of the transmitting antenna and the receiving antenna in the communication system". The aim of the work is to solve an important scientific problem, which consists in the development and research of space-time matrices, including large-dimensional ones, for MIMO systems with noise-resistant characteristics exceeding the characteristics of MIMO systems using known space-time matrices. To achieve this goal, a comparative analysis of orthogonal and orthogonal space-time codes, as well as Methods for the formation of large-dimensional codes based on known space-time matrices, were analyzed in this work.

## МАЗМҰНЫ

Кіріспе	10
1 Белгілі кеңістік-уақыт кодтары. Үлкен өлшем кодтарын құру принциптері	11
1.1 Көп сәулелі жүйелер. Шеннон Формуласы	11
1.2 МІМО математикалық моделі	13
1.3 Кеңістік-уақыт кодтау принциптері	14
1.4 Белгілі кеңістік-уақыт кодтары және олардың қасиеттері	15
1.5 Көп циклді жүйелер үшін МІМО сілтеме моделін виртуализациялау	22
1.6 Жоғары өлшемді кодтарды құрудың белгілі әдістері	22
1.7 Кеңістік-уақыт кодтарының оңтайлылық критерийлері	26
2 Үлкен өлшемді жаңа кеңістік-уақыт кодтары. Үлкен өлшемді кеңістік-уақыт кодының арнасының эквивалентті виртуалды матрицасын синтездеу әдістері.	28
2.1 Екіден көп антенналар саны үшін өзгертілген алтын кодты қалыптастыру	28
2.2 Сигнал шоқжұлдызының айналуымен модификацияланған кодты қалыптастыру	29
2.3 Голден типті код пен шоқжұлдыздың айналмалы коды үшін эквивалентті виртуалды арна матрицасын қалыптастыру	31
2.4 Жоғары өлшемді EVCM матрицасын синтездеу есебінің қойылымы	32
2.5 Антенналар саны екіден көп болған кезде өзгертілген алтын код үшін бір эквивалентті виртуалды арна матрицасын құрудың қайталанатын әдісі	34
2.6 EVCM матрицасын қалыптастырудың аналитикалық әдісі	37
2.7 Белгілі кеңістіктік үшін EVCM матрицалық синтезінің мысалдары-уақытша кодтар	39
2.8 Күрделі біріктірілген шамалар жағдайында EVCM матрицасын қалыптастырудың аналитикалық әдісін жалпылау	41
2.9 EVCM матрицасын синтездеудің мысалдары конъюгацияланған таңбалармен белгілі кеңістік - уақыт кодтары үшін	43
3 Кеңістік - уақыт матрицаларының оңтайлылығының жаңа өлшемі	46
3.1 Оңтайлы кодты құру мәселесін белгілеу	46
3.2 Кеңістік-уақыт кодтарының генеративті матрицаларының қасиеттері	46
3.3 Кеңістік-уақыт кодтарын синтездеудің жаңа өлшемін қалыптастыру міндетін белгілеу	48
3.4 Кеңістік-уақыт кодтарын синтездеу критерийі	48
3.5 Голден өлшемнің 2x2 кеңістік-уақыт коды үшін критерийді қолдану	50
3.6 Өлшемді 4x4 сигналдық шоқжұлдызының айналуымен кеңістік-уақыт коды үшін критерийді қолдану	54
3.7 Голден өлшемді 4x2 өзгертілген кеңістік-уақыт коды үшін критерийді қолдану	60

3.8	8x4 өлшемді сигнал шоқжұлдызының айналуымен модификацияланған кеңістік-уақыт коды үшін критерийді қолдану	63
3.9	Голден өлшемді 32x2 өзгертілген кеңістік-уақыт коды үшін критерийді қолдану	71
	Қорытынды	77
	Пайдаланылған әдебиеттер	78

## КІРІСПЕ

Дипломдық жұмыстың өзектілігі. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic forecast Update, 2017-2022 болжамына сәйкес, әлемдік мобильді трафик көлемі көрсетілген кезеңде 6 есе өседі және айына 77 эксабайтты құрайды [1, 2].

Мобильді трафиктің өсуі бірнеше тенденциялармен анықталады: мобильді қосылыстар санының 12,3 миллиардқа дейін өсуі, оның ішінде 8,5 миллиард жеке мобильді құрылғыларға, қалғаны машинааралық қосылыстарға түседі; ақпаратты беру жылдамдығының 2017 жылы 8,7 Мбит/с-тан 2022 жылы 28,5 Мбит/с-қа дейін өсуі. [2].

2017 жылдан бастап 2022 жылға дейін мобильді бейнені беру үшін пайдаланылатын деректер көлемінің өсуі 9 есе болады, бұл әлемдік мобильді трафиктің 79% құрайды. Пайдаланушылардың сымсыз байланыс қызметтеріне өсіп келе жатқан қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін байланыс операторлары 4G және 5G стандарттарын алмастыратын немесе толықтыратын 2G және 3G технологияларын қолданады. Cisco [2] болжамының нәтижелері бойынша 2022 жылға қарай барлық қосылыстардың 54% - дан астамы 4G желілеріне түседі, олар арқылы барлық мобильді деректер трафиінің 71% - дан астамы жіберіледі, мобильді трафиктің 11,8% - ы 5G желілері арқылы беріледі, алайда 5G желісіне қосылған бір құрылғы 4G желісіне қосылған құрылғыға қарағанда 2,6 есе көп трафик жасайды [1, 2].

4G/5G топтық технологиялары қабылдау және тарату жақтарында бірнеше антеннасы бар жүйелерді - MIMO (Multiple - Input-Multiple-Output) пайдалануды көздейді, бұл энергияның пайдасын жүзеге асыруға және байланыс жүйелерінің спектрлік тиімділігін жақсартуға мүмкіндік береді [3, 4, 5].

MIMO байланыс жүйелері тиімділігінің жоғары көрсеткіштеріне қол жеткізу үшін қабылдау кезінде сигналдарды беру мен өңдеу арасында тиісті келісімді ұйымдастыру қажеттілігі пайда болды [3, 6]. Бұған ғарыштық уақытты кодтау әдістерін қолдану арқылы қол жеткізіледі, оларды қолдану шуылға қарсы тұру мен спектрлік тиімділік арасындағы ақылға қонымды ымыраға қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Кеңістік-уақытша кодтау кодтардың екі класын қолданады – ортогональды және ортогональды емес [3].

Қазіргі байланыс жүйелерінде кодтардың екі класы да қолданылады. Қазіргі уақытта оларды қолдану ортогональды кодтар үшін таратушы антенналар саны - 2-мен шектелген, өйткені антенналар санының одан әрі артуы кеңістік-уақыт кодының кодтық жылдамдығының төмендеуіне әкеледі [3, 4].

Бесінші буынның перспективалы жүйелері large Scale MIMO (Large Scale Multiple-Input Multiple - Output кең ауқымды MIMO) технологиясын стандарттау мен пайдалануды ұсынады, онда антенналардың саны 128-ге жетуі мүмкін [7]. Осылайша, неортогональды немесе квази-гетерогональды кодтары бар жүйелер дамиды.



# 1 Белгілі кеңістік-уақыт кодтары. Үлкен өлшем кодтарын құру принциптері

## 1.1 Көп сәулелі жүйелер. Шеннон Формуласы

Ақпаратты берудің жоғары жылдамдығы, абоненттердің жоғары жылдамдығы және тығыз қала құрылысы әртүрлі кедергілерден сигналдардың сөнугі мен шағылысуынан туындаған сигналдарды қабылдау сапасының күрт нашарлауына әкеледі [2, 9]. Замираниямен күресу үшін әртүрлі қабылдаудың қарапайым әдістері белгілі [10, 11]. Шектеулі спектрде, нақты физикалық ортада жоғары жылдамдыққа қол жеткізу бізді байланыс жүйелерін дамытуда туындайтын негізгі проблемаға – жоғары спектрлік тиімділік пен жоғары энергия тиімділігі (шуылға қарсы тұру) арасындағы қарама-қайшылыққа әкеледі [9, 11, 12, 13, 15].

Өткізу қабілетінің теориялық шегі Шеннон формуласымен анықталады, ол логарифмдік тәуелділіктің өткізу қабілетін сигнал/шу қатынасына (OSH) байланыстырады, тіпті жоғары деңгейлі модуляциясы бар дискретті сигналдарды қолданғанда да, шуылға қарсы барлық мүмкін әдістер үшін арнаның өткізу қабілеттілігінің шегін белгілейді байланыс арнасында кодтау. Шеннонның формуласы [2, 14]:

$$C = F * \log_2 (1 + P_{\text{сигнал}} / P_{\text{шу}}) \quad (1.1)$$

мұндағы  $C$  – арнаның өткізу қабілеті, бит/с,  $F$  – арнаның өткізу қабілеті, Гц,

$P_{\text{сигнал}}$  - жалпы сигнал қуаты  $W$ ,  $P_{\text{шу}}$  - жалпы шу қуаты, Вт.

Шеннон формуласы байланыс жүйесінің өткізу қабілетін өткізу қабілеттілігі мен сигнал-шуыл қатынасымен шектейді. (1.1) формуламен сипатталған жүйенің сыйымдылығын арттыру үшін өткізу қабілеттілігін арттыруға немесе пайдалы сигналдың қуатын арттыруға болады. Шектеулі спектрлік ресурс пен байланыс арнасында шудың болуына байланысты екі тәсілді де жүзеге асыру мүмкін емес. Бірнеше таратушы антенналарды және бірнеше қабылдау антенналарын пайдалану (1.1) [3, 13, 16] формуласымен анықталған шекпен салыстырғанда байланыс жүйесінің өткізу қабілетін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді.

Ұялы байланыс жүйелерін дамытудың маңызды қадамы MIMO технологиясын техникалық енгізу мүмкіндігі болды, ол көптеген таратқыш және қабылдау антенналары бар жүйелерді пайдалануға негізделген [3, 4, 13, 16, 17, 18]. Бұл жағдайда көп антенналық жүйелер үшін Шеннон формуласының модификациясы антенналар арасында пайда болатын параллель SISO арналарының (бір жіберуші және бір қабылдаушы антеннасы бар бір кірісті бір шығыс жүйесі) сыйымдылықтарының қосындысы ретінде жүйенің мүмкін болатын өткізу қабілетін анықтайды. беру және қабылдау кезінде [3, 13, 17, 18].

Көп антенналық жүйелер жағдайында (1.1) бейнелеу келесідей болады:

$$C_{\text{жалпы}} = F \cdot \sum_{i=1}^M C_i \quad (1.2)$$

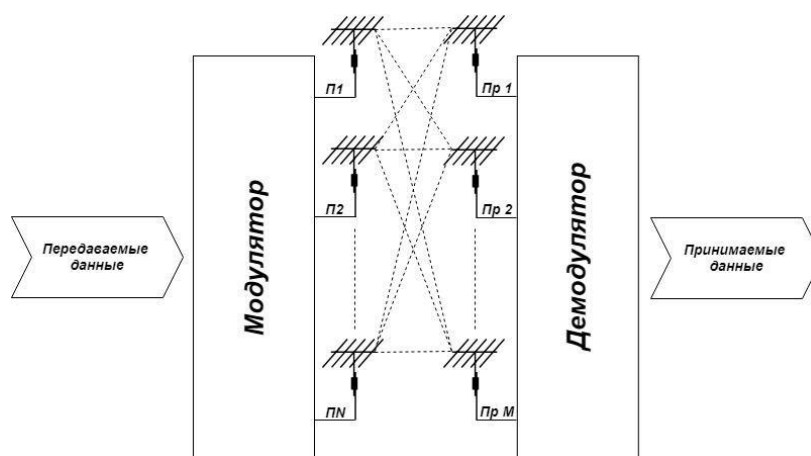
мұндағы  $C_{\text{жалпы}}$  – көп антенналық жүйенің жалпы өткізу қабілеті, бит/с,  $F$  – арна өткізу қабілеті, Гц,  $C_i$  –  $i$  SISO байланыс арнасының сыйымдылығы, бит/с,  $M$  – қабылдау антенналарының саны,  $N$  таратқыш антенналардың саны болып табылады.

Жүйенің жалпы сыйымдылығын арттыруға антенналар санын үнемі ұлғайту арқылы қол жеткізіледі, 4G стандартының қолданыстағы нұсқаларында 8 антеннаға дейін қолдау көрсетіледі, 5G стандарттары жіберудегі антенналар санын 128-ге дейін арттыруға мүмкіндік береді. Шеннонның модификациясы көп антенналық жүйелерге арналған теорема байланыс жүйелерінің максималды өткізу қабілеттілігін арттыруға мүмкіндік береді.

## 1.2 MIMO математикалық моделі

MIMO арналарын пайдалану мобильді байланыс жүйелерінің негізгі сипаттамаларын жақсартуға мүмкіндік береді, себебі олар энергияның өсуін де, ақпаратты беру жылдамдығын арттыруды да жүзеге асыруға мүмкіндік береді [3, 13].

Мұндай жүйеде таратушы жағындағы сигналдар бір уақытта және  $N$  таратқыш антенналар арқылы бір жиілік диапазонында шығарылады. Радиоарнадағы релеевтердің сөнуі және ҚАГШ (қоспалы ақ Гаусс шуы) әсерінен кейін жіберілген сигналдар  $M$  қабылдау антенналарына келеді.  $M$  қабылдағыш антенналардың әрқайсысы  $N$  берілетін сигналдардың аддитивті қоспасын алады [3, 4, 13, 16]. MIMO сымсыз байланыс жүйесінің үлгісі 1-суретте көрсетілген.



1.1- сурет - MIMO сымсыз байланыс жүйесінің моделі

Радиотолқындардың таралу жолында көп жолды эффектiнiң болуына

байланысты әрбір  $N$  сәулеленген сигнал жердегі әртүрлі объектілерден қайта-қайта шағылысып отырады, осылайша әрбір жіберуші мен әрбір қабылдаушы антенна арасында радиотолқындардың тәуелсіз траекториялары қалыптасады. МІМО технологиясы көп жолды эффектінің артықшылығын пайдалануға мүмкіндік береді [3, 8, 10, 13, 19].

МІМО жүйелерінің жоғары өнімділік көрсеткіштеріне қол жеткізу үшін қабылдауда сигналдарды беру мен өңдеу арасында сәйкес үйлестіруді ұйымдастыру қажет болды [19, 20]. Бұған шуға төзімділік пен спектрлік тиімділік арасында ақылға қонымды ымыраға қол жеткізуге мүмкіндік беретін кеңістік-уақыт кодтамасын қолдану арқылы қол жеткізіледі [3, 16, 19].

Жоғарыда 1.1-суретте берілген МІМО сымсыз байланыс жүйесінің моделі үшін кеңістік-уақыт кодтауын қолданатын бақылау моделі:

$$Y = H \cdot S + \Gamma, \quad (1.3)$$

мұндағы  $H$  –  $M \times N$  өлшемді байланыс арнасының матрицасы,  $\Gamma$  – математикалық күту нөлдік және корреляциялық матрицасы,  $2\sigma_n^2 I$ , болатын  $M \times 1$  өлшемді бақылау шуының күрделі кездейсоқ векторы,  $S$  – кеңістіктің матрицасы.  $N \times L$  өлшемі бар ақпараттық таңбаларды қамтитын уақыт коды, мұндағы  $L$  – ақпараттық таңбалардың толық жинағы жіберілетін уақыт слоттарының саны.

### 1.3 Кеңістік-уақыт кодтау принциптері

Кеңістік-уақыт кодтауы шуға төзімділікті және бір уақыт аралығында көбірек ақпаратты жіберу мүмкіндігін арттыру үшін бірнеше жіберу антенналары арқылы деректер ағынында МІМО жүйелеріндегі ақпаратты беру үшін қолданылады. Кеңістік-уақыт кодының шегінде ақпаратты беру құрылымы кеңістік-уақыттың әртүрлілігінің артықшылықтарын пайдалануға мүмкіндік береді және пайдалы ақпаратты жоғалу мен шу әсерінен қорғай отырып, бір символды бірнеше ақпараттық хабарламалар ішінде беруге мүмкіндік береді [3, 13, 19]. Кеңістік-уақыт құрылымы әр баған сәйкес антенналармен бір уақыт аралығымен берілетін ақпаратты қамтитын матрицалық картамен ыңғайлы түрде ұсынылған.

Кеңістік-уақыт кодтаудың ең қарапайым жағдайы келесідей: әрбір ұядағы әрбір  $j$  таратқыш антенна арқылы уақыт туралы ақпарат белгісі шығарылады  $i$ -ші антеннада қабылданған сигнал келесідей болады:  $\theta_j$ . Содан кейін демодулятордың кірісінде:

$$y_i = h_{i1}\theta_1 + h_{i2}\theta_2 + \dots + h_{ij}\theta_j + \dots + h_{iN}\theta_N + \eta_i, i = 1, \dots, M \quad (1.4)$$

Алынған сигналдар (1.4) теңдеулерден тұратын сызықтық теңдеулер жүйесімен сипатталады:

$$\begin{cases} y_1 = h_{11}\theta_1 + h_{12}\theta_2 + \dots h_{1N}\theta_N + \eta_1 \\ y_2 = h_{21}\theta_1 + h_{22}\theta_2 + \dots h_{2N}\theta_N + \eta_2 \\ \dots \\ y_M = h_{M1}\theta_1 + h_{M2}\theta_2 + \dots h_{MN}\theta_N + \eta_M \end{cases} \quad (1.5)$$

Күрделі сызықтық теңдеулер жүйесін (1.5) векторлық-матрицалық түрде көрсетуге болады. Белгілі бір кеңістік-уақыт матрицасын пайдалана отырып, сигналды кодтаудың бірнеше таратқыш антенналары болған кездегі сызықтық кеңістік-уақыт кодтаудың жалпы жағдайы күрделі сызықтық теңдеулер жүйесімен сипатталады.

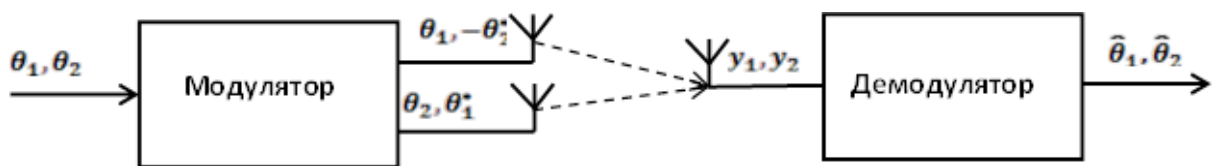
$$Y = H \cdot \theta + \eta, \quad (1.6)$$

мұндағы  $Y$  - қабылданған сигналдардың  $M$  - өлшемді комплексі баған векторы,  $H$  -  $N \times M$  өлшемінің арналық матрицасы,  $\theta$  -  $N$  - күрделі ақпараттық белгілердің өлшемдік баған векторы,  $\eta$  -  $M$  - өлшемді бақылау шуының векторы, ол нөлдік математикалық күту және корреляциялық  $2\sigma^2 I$  матрицасы бар.

#### 1.4 Белгілі кеңістік-уақыт кодтары және олардың қасиеттері

Ақпаратты беру әдісі мен ақпаратты қабылдау әдісін үйлестіру мәселесі әртүрлі кеңістік-уақыт кодтарын синтездеу қажеттілігін анықтайды. Шеннон формуласының (1.2) модификациясы мынаны көрсетеді: антенналар саны неғұрлым көп болса, жүйенің өткізу қабілеті соғұрлым жоғары болады.

1998 жылы Сиявуш Аламути бір қабылдау антеннасына екі тактілік циклде ақпаратты жіберетін екі антеннаның кодтау схемасын әзірледі [21]. Ұсынылған ортогональды кодтау моделі 1.2-суретте көрсетілген.



1.2- сурет - Аламути схемасы бойынша ортогональды кодтау

Модулятордағы тарату жағында ақпараттық символдар екі таңбадан тұратын блоктарға бөлінеді және өңделгеннен кейін екі уақыт аралығында екі антенна арқылы беріледі. Кеңістік-уақыт кодының матрицасы:

$$S_{Alamouti} = \begin{bmatrix} \theta_1 & -\theta_2 \\ \theta_2 & \theta_1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

мұндағы  $\theta_1, \theta_2$  – күрделі ақпараттық белгілер.

LTE Rel. 1.8, 1.9 төмен байланысты жіберу үшін Аламоути кодтау схемасының басқа түрі пайдаланылады, ол SFBC (Space Frequency Block Code) деп аталады [20]. Кеңістік жиілік кодының матрицасы:

$$S_{SFBC} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 \\ -\theta_2 & \theta_1 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Аламоути кодының бұл түрін қолдану LTE жүйелерінде бір тактілік циклде жіберу үшін жұп элементтер – жиілік пен уақыт бөлінуі керек екендігіне байланысты [3, 13].

Қолданыстағы желілердегі Аламоути матрицаларының бұл түрі тек «төмен» жіберу үшін қолданылады. Бұл бір антеннаны пайдалана алатын пайдаланушы жабдықтарындағы шектеулерге байланысты.

(1.7) және (1.8) типті кеңістік-уақыттық Аламути матрицаларын пайдаланған кезде осы кодтың келесі қасиеттері өзіне назар аударады: екі ақпараттық символ екі уақыт интервалында беріледі, осылайша кодтың символдық жылдамдығы бір және мұндай код толық мөлшерлеме деп аталады. Мұндай матрицада жолдар бір-біріне ортогональ, сонымен қатар бағандар бір-біріне ортогональ, сондықтан мұндай матрица ортогональ деп аталады.

$$S_1 \cdot S_2^* = [\theta_1 - \theta_2] \cdot [\theta_2 - \theta_1] = \theta_1 - \theta_2 - \theta_2 - \theta_1 = 0 \quad (1.9)$$

Көрсетілген ортогоналдылық қасиеті (1.9) демодуляция алгоритмінің қарапайымдылығы тұрғысынан өте маңызды, оның күрделілігі бұл жағдайда модельдегі антенналар санымен сызықтық қатынаспен байланысты [3, 4, 19].

Модельдеу SISO (бір кірісті бір шығыс) жүйелерімен салыстырғанда 7 дБ-ге жететін айтарлықтай энергия өсімін көрсетеді [3]. Қуаттың артуы алуан түрлілікті алу үшін ұқсас беру әртүрлілігінің арқасында қол жеткізіледі.

Антенналар санының ұлғаюымен код толық жылдамдық пен ортогональдық жағынан өзінің қасиеттерін жоғалтады [3, 4]. Аламоути схемасының кеңістік-уақыт код матрицасы WiMAX IEEE 802.16e стандартындағы, сондай-ақ 3GPP Rel.7 UMTS стандартындағы STTD схемасындағы төмен байланыс ақпаратының стандартты матрицасы болып табылады [13].

Ортогоналды кодтардың қасиеттерін пайдалану мүмкіндіктері таратқыш антенналардың санымен шектеледі. Көп антенналық жүйелер үшін Шеннон теоремасын әзірлеу мұндай байланыс жүйесінің сыйымдылығы қабылдау және жіберу антенналары арасындағы арналар санына байланысты екенін көрсетеді. Кодтың символдық жылдамдығын арттыру мәселесі ортогоналдылық шарты қанағаттандырылмайтын кеңістік-уақыт кодтары тобын құруды талап етті.

1996 жылы Bell зертханасының қызметкерлері кодтау схемасын ұсынды,

оған сәйкес деректер ағыны  $N$  таратушы антенналардың санына тең деректер ішкі ағындарына бөлінген [20]. Әрбір антенна арқылы бір тактілік интервалда бір ақпараттық таңба жіберілді. Бұл жағдайда кодтың кеңістік-уақыт матрицасы келесі пішінге ие болады:

$$S_{BLAST} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dots \\ \theta_N \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

BLAST кеңістік-уақыт матрицасы (1.10) WiMAX IEEE 802.16e стандартында екі, үш және төрт төмен қарай жіберу антенналары үшін [16], сондай-ақ UMTS стандартының 3GPP Rel.8 стандартында [17, 18] қолданылады.

BLAST (1.10) кеңістік-уақыт матрицасы бар байланыс жүйесі үшін бақылау моделі келесідей пішінге ие:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N} \\ \dots & \dots & \dots \\ h_{M1} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dots \\ \theta_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \dots \\ \eta_N \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

мұндағы  $y_i, i = 1 \dots M$  – қабылданған сигналдардың күрделі баған векторының мәндері,  $h_{ij}, i = 1 \dots M, j = 1 \dots N$  –  $M \times N$  өлшемінiң  $N$  байланыс арнасының матрицасының коэффициенттерінің мәндері,  $\theta_j, j = 1 \dots N$  – күрделі ақпараттық белгілердің векторлық бағанының мәндері,  $\eta_i, i = 1 \dots M$  – бақылау шуының кездейсоқ кешенді баған векторының мәндері.

Ортогональды емес кодтауды қолдану таңба жылдамдығын арттыру арқылы спектрлік тиімділікті арттыруға мүмкіндік береді, алайда символдық жылдамдықтың жоғарылауы қабылдау жағында сигналды өңдеудің қиындауына әкеледі, бұл есептеу күрделілігінің артуына әкеледі. демодуляция алгоритмдері.

BLAST типті код өзінің жоғары спектрлік тиімділігіне байланысты таратушы антенналардың көп саны бар жүйелерде қолданылады [2, 20]. Дегенмен, жоғары өлшемді кодтарды жасаудың басқа жолдары бар.

Екі таратқыш антеннасы бар WiMAX жүйелері үшін IEEE 802.16e стандарты таңба жиілігі екі болатын Алтын типті кодты ұсынды [19, 10]. Кеңістік-уақыт кодының матрицасы:

$$r = \frac{-1+\sqrt{5}}{2} S_{алтын} = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \begin{bmatrix} \theta_1 + jr\theta_4 & r\theta_2 + \theta_3 \\ \theta_2 - r\theta_3 & jr\theta_1 + \theta_4 \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Ұсынылған код толық жылдамдықты ортогональды емес код болып табылады. Бір уақыт аралығы ішінде екі антеннадан төрт ақпараттық таңба беріледі. Генерациялайтын BLAST матрицасымен салыстырғанда зерттеулермен



расталған энергия өсімі BPSK, QPSK модуляция әдістерімен 1,2 -1,5 дБ [21] құрайды. Алынған әсер шуылға төзімділіктің жақсы сипаттамалары бар жоғары өлшемді кодтарды қалыптастырудың негізі ретінде Алтын типті кодты қарастыруға мүмкіндік береді [3].

Квази-ортогональды кеңістік-уақыт кодтарын генерациялайтын жүйелерде максималды қашықтыққа жету жолдарының бірі сигнал шоғырын айналдыру болып табылады. Бұл әдісті қолдану сигнал шоқжұлдызының нүктелері арасындағы кодтық арақашықтықтарды ұлғайту арқылы генерацияланған сигналдың шу иммунитетінің сипаттамаларын жақсартады. [3,]. Сигнал шоқжұлдызының айналуы генерациялайтын матрицаға қосымша мультипликаторды енгізу арқылы жүзеге асырылады. Кейбір белгілі кеңістік-уақыт кодтық матрицаларын қарастырайық. Төрт таратқыш антеннаға арналған бірнеше Аламути блоктарынан құрылған матрица келесі пішінге ие [19]:

$$S_{J4Rot} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 e^{-j\varphi} & \theta_4 e^{j\varphi} \\ -\theta_2 & \theta_1 & -\theta_4 e^{-j\varphi} & \theta_3 e^{-j\varphi} \\ -\theta_3 e^{-j\varphi} & -\theta_4 e^{-j\varphi} & \theta_1 & \theta_2 \\ \theta_4 e^{j\varphi} & -\theta_3 e^{-j\varphi} & -\theta_2 & \theta_1 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Сондай-ақ төрт таратқыш антеннаның матрицасы белгілі [3]:

$$S_{CPS4} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \\ \xi\theta_2 & \theta_1 & \xi\theta_4 & \theta_3 \\ -\theta_3 & -\xi\theta_4 & \theta_1 & \xi\theta_2 \\ -\theta_4 & -\theta_3 & \theta_2 & \theta_1 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

мұндағы  $\xi = j$  QAM жағдайында және  $\xi = e^{j2\pi L}$  L-PSK жағдайында.

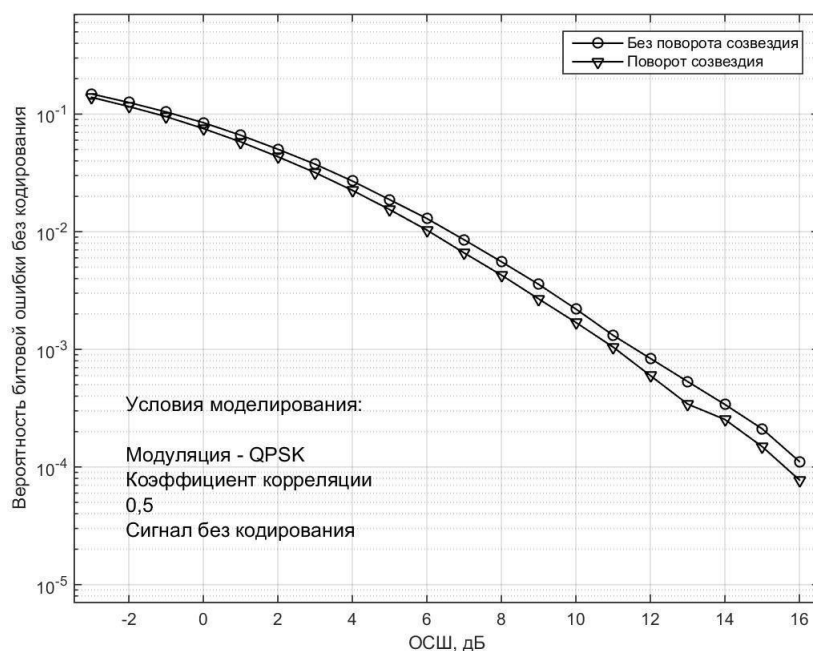
Сигнал шоқжұлдызының айналуымен матрицаның (1.14) және сигнал шоқжұлдызының айналуынсыз бірдей матрицаның (1.14) шуға төзімділігінің сипаттамаларын зерттеу үшін симуляциялық статистикалық модельдеу жүргізілді. Модельдеу келесі шарттарда орындалды (1.1 кестені қараңыз).

Кесте 1.1 - Модельдеу шарттары

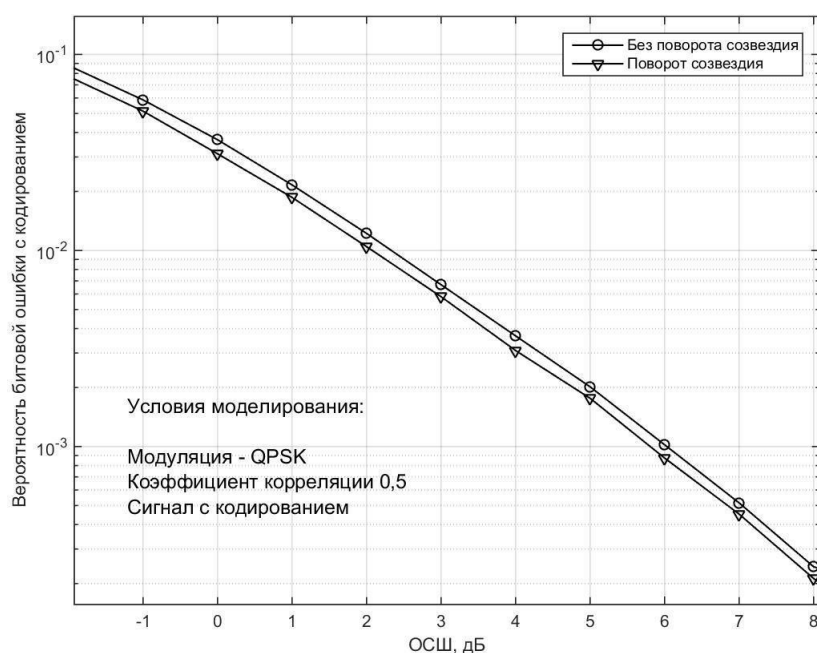
Қолданылған кеңістік-уақыт матрицалары және олардың өлшемдері	$\xi = 1$ сигналдық шоқжұлдызының айналуынсыз және сигнал шоқжұлдызының айналуымен $4 \times 4$ өлшемді матрица (1.14) $\xi = e^{j\pi 2}$
Арнаның өшетін үлгісі	Релеевтік өшуі және жіберу корреляция коэффициенті 0,5 және қабылдау корреляция коэффициенті 0,5 болатын Кронекер өшетін моделі
Модуляция түрі	QPSK, 16-QAM

Демодуляция әдісі	MMSE
Кодтау әдісі	Қатені түзетпейтін кодтаусыз және параметрлері бар турбокодты пайдаланусыз: кодтау жылдамдығы 1/2, код шектеуінің ұзындығы 16

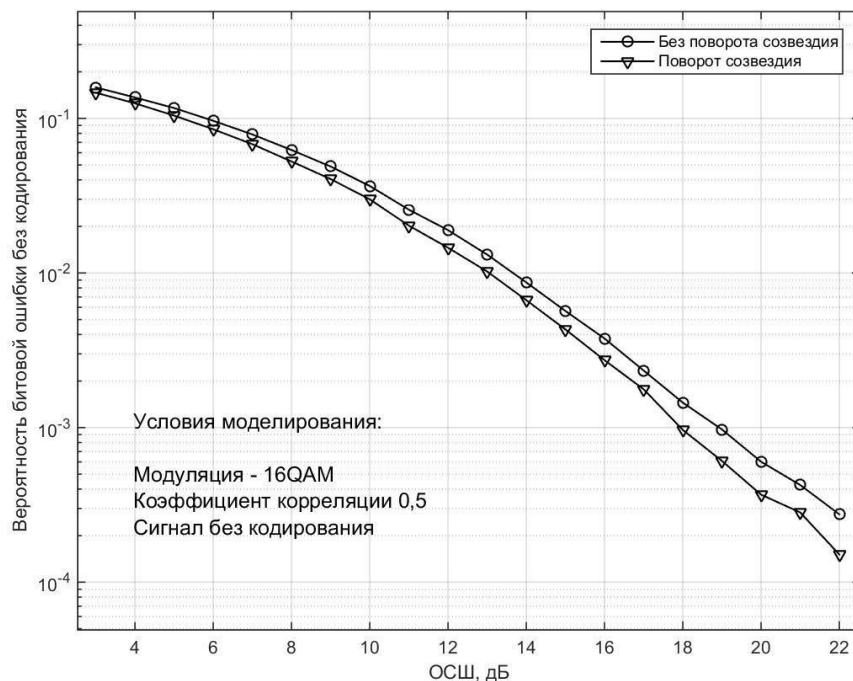
Шуға төзімділікті салыстыруға арналған модельдеу нәтижелері 1.3, 1.4, 1.5, 1.6-суреттерде келтірілген:



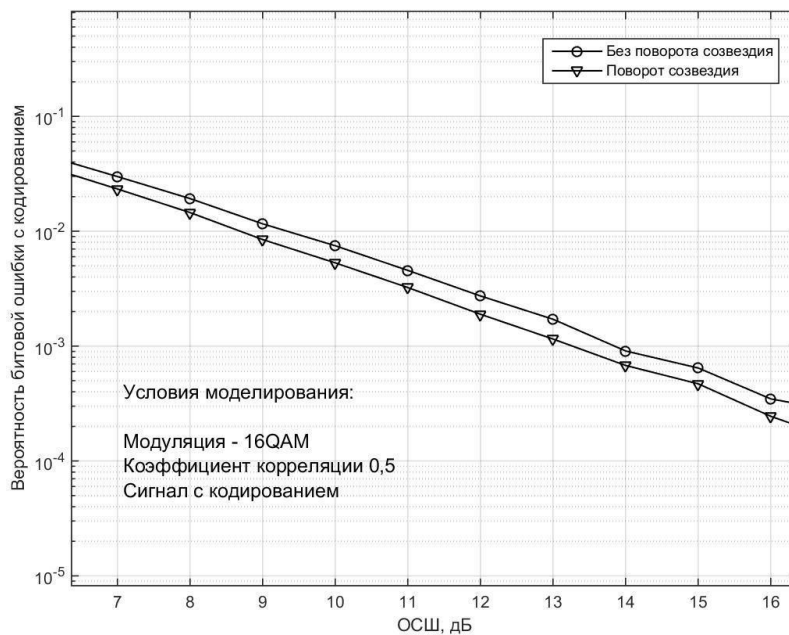
1.3- сурет - Шокжұлдыздың айналуы жоқ және шокжұлдыздың айналуы бар жүйелердің шуға төзімділігін салыстыру. QPSK модуляциясы, кодтаусыз, арна корреляциясы.



1.4- сурет - Шоқжұлдыздың айналуы жоқ және шоқжұлдыздың айналуы бар жүйелердің шуға төзімділігін салыстыру. QPSK модуляциясы, кодтау бар, арна корреляциясы.



1.5- сурет - Шоқжұлдыздың айналуы жоқ және шоқжұлдыздың айналуы бар жүйелердің шуға төзімділігін салыстыру. Модуляция 16-QAM, кодтау жоқ, арна корреляциясы.



1.6- сурет - Шоқжұлдыздың айналуы жоқ және шоқжұлдыздың айналуы бар жүйелердің шуға төзімділігін салыстыру. Модуляция 16-QAM, кодтау бар, арна корреляцияланған.

Алынған нәтижелер корреляциялық арна үшін шоқжұлдыздың айналуымен генератор матрицасы үшін шуға төзімділіктің жақсарғанын көрсетеді. Шоқжұлдыздың айналуын пайдаланудан алынатын энергия 0,3 - 1 дБ. Модельдеу нәтижелері 1.2-кестеде берілген.

Кесте 1.2 - Модельдеу нәтижелері

Имитациялық модельдеу:	Модульдік түрі	Тасымалдау/қабылдау бойынша корреляция коэффициенті	Кодтау	Энергияның өсуі, дБ
сур 3	QPSK	0,5/0,5	жоқ	0,8
сур 4	QPSK	0,5/0,5	бар	0,3
сур 5	16-QAM	0,5/0,5	жоқ	0,75
сур 6	16-QAM	0,5/0,5	бар	1

Сигнал шоқжұлдызының айналуына негізделген жаңа матрицаларды құру тәсілі жақсартылған жоғары өлшемді сипаттамалары бар жаңа кеңістік-уақыт кодтарын жасау үшін пайдаланылуы мүмкін.

### 1.5 Көп циклді жүйелер үшін MIMO сілтеме моделін виртуализациялау

Аламоути матрицасы бар MIMO жүйесін қарастырайық. Мұндай жүйеде бір қабылдау антеннасы және екі жіберуші антенна пайдаланылады, беру екі тактілік циклде жүзеге асырылады, ал берілетін ақпараттық белгілердің саны екіге тең [21, 22].

Қабылданған сигналды әрбір тактілік циклге сәйкес уақыт санауымен жазайық, содан кейін қабылдаушы антеннадағы қабылданған сигнал бір уақытта келесідей болады:

$$y_1 = h_{11}\theta_1 + h_{21}\theta_2 + \eta_1 \quad (1.15)$$

Екінші уақытта қабылданған сигнал келесідей болады:

$$Y_2 = -h_{11}\theta_2' + h_{21}\theta_1' + \eta_2 = h_{21}\theta_1' - h_{11}\theta_2' + \eta_2 \quad (1.16)$$

Екінші үлгідегі сигнал формасын сипаттайтын (1.16) өрнектің конъюгациясын орындап, (1.15), (1.16) өрнектерді векторлық-матрицалық түрде қайта жазайық. Сонда

бақылау моделі келесідей болады:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{21} & h_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Алынған сигнал үшін алынған векторлық-матрицалық теңдеу (1.17) BLAST типті кеңістік-уақыт коды үшін (кеңістіктік мультиплексирлеуді жүзеге асыру) векторлық-матрицалық теңдеу (1.11) сияқты пішінге ие [3, 20]. Бұл жағдайда (1.17) теңдеулер жүйесі үшін арна коэффициенттерінің матрицасы эквивалентті виртуалды арна матрицасы (MIMO) деп аталады. EVCM пайдаланылатын кеңістік-уақыт кодтау әдісі туралы ақпаратты, сондай-ақ MIMO байланыс арнасының қасиеттерін қамтиды. [21] Оның өлшемі жіберу жүзеге асырылатын жіберуші антенналар мен уақыт слоттарының санына байланысты. Тасымалдау бірнеше уақыт аралықтарында бірнеше антенналар арқылы жүзеге асырылатын жүйені (1.17) типті виртуалды бақылау үлгісі ретінде көрсетуге болады [3].

## 1.6 Жоғары өлшемді кодтарды құрудың белгілі әдістері

Жоғары өлшемді кодтардың қалыптасуы қабылдау және жіберу антенналарының санының артуына тікелей байланысты. 5G және одан кейінгі генерация стандарттарында екі жағындағы антенналардың саны 128-ге жететін Large Scale MIMO жүйесін пайдалану жоспарлануда [20]. Құрылған кодтар жоғары спектрлік тиімділікке және жоғары шуға төзімділікке ие болуы керек, сонымен қатар қолайлы есептеу күрделілігі бар демодуляция алгоритмдерін қолдануға мүмкіндік беруі керек [3, 19]. Ортогоналды кодтардың комбинациясы [14] жоғары өлшемді кодтарды қалыптастырудың негізгі бағыты болды.

Ортогональды Аламути коды екі символды екі уақыт интервалында беруге мүмкіндік береді, толық жылдамдықты және генерациялаушы матрицаның қасиеттеріне байланысты демодуляция тапсырмасын айтарлықтай жеңілдетеді [21]. Бұл кодты үлкен өлшемді кодтарды құру үшін пайдалану бірнеше қалыптастыру әдістерінің пайда болуына әкелді: AB, ABBA және ABCD [3, 4].

AB пішіндеу әдісі IEEE 802.11.n стандартында [11] пайдаланылады және төрт жіберу антеннасы үшін келесі матрицаны пайдаланады:

$$S_{AB} = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{12} \\ S_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 \\ -\theta_2 & \theta_1 \\ \theta_3 & \theta_4 \\ -\theta_4 & \theta_3 \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

ABBA қалыптастыру әдісі төрт Аламути типті матрицалардың комбинациясын пайдаланады [16]. Төрт жіберу антеннасының кодтық

матрицасы келесідей:

$$S_{ABBA} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{12} & S_{34} \\ S_{34} & S_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \\ \theta_2 & -\theta_1 & \theta_4 & -\theta_3 \\ \theta_3 & \theta_4 & \theta_1 & \theta_2 \\ \theta_4 & -\theta_3 & \theta_2 & -\theta_1 \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

(1.19) тармағында төрт символ төрт уақыт аралықтарында беріледі.

Ұқсас дизайнды белгілерге сәйкес матрицаларды ауыстыру арқылы кез келген антенналар санына дейін кеңейтуге болады. Осылайша, 8 антеннаға арналған ABBA матрицасы:

$$S^8_{ABBA} = \begin{bmatrix} S_{12} & S_{34} & S_{56} & S_{78} \\ S_{34} & -S_{12} & S_{78} & -S_{56} \\ S_{56} & S_{78} & S_{12} & S_{34} \\ S_{78} & -S_{56} & S_{34} & -S_{12} \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

Аламоути матрицаларын (1.17) ауыстыра отырып, біз: (1.20) кеңістік-уақыт матрицалары бойынша  $S_{ij}$  аламыз.

$$S^8_{ABBA} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 & \theta_5 & \theta_6 & \theta_7 & \theta_8 \\ \theta_2 & -\theta_1 & \theta_4 & -\theta_3 & \theta_6 & -\theta_5 & \theta_8 & -\theta_7 \\ \theta_3 & \theta_4 & -\theta_1 & -\theta_2 & \theta_7 & \theta_8 & -\theta_5 & -\theta_6 \\ \theta_4 & -\theta_3 & -\theta_2 & \theta_1 & \theta_8 & -\theta_7 & -\theta_6 & \theta_5 \\ \theta_5 & \theta_6 & \theta_7 & \theta_8 & \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \\ \theta_6 & -\theta_5 & \theta_8 & -\theta_7 & \theta_2 & -\theta_1 & \theta_4 & -\theta_3 \\ \theta_7 & \theta_8 & -\theta_5 & -\theta_6 & \theta_3 & \theta_4 & -\theta_1 & -\theta_2 \\ \theta_8 & -\theta_7 & -\theta_6 & \theta_5 & \theta_4 & -\theta_3 & -\theta_2 & \theta_1 \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

ABBA схемасын қолданудың нұсқалары бар, олардың біреуін Джафархани ұсынған және кеңейтілген Аламоути коды деп аталады, бұл жағдайда төрт антеннаның кодтық матрицасы келесідей болады:

$$S_{EA} = \begin{bmatrix} S_{12} & S_{34} \\ S_{34} & -S_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \\ \theta_2 & -\theta_1 & \theta_4 & -\theta_3 \\ \theta_3 & \theta_4 & -\theta_1 & -\theta_2 \\ \theta_4 & -\theta_3 & -\theta_2 & \theta_1 \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Код құрылымын антенналардың көбірек санына дейін кеңейту жоғарыда сипатталған принципке сәйкес орындалуы мүмкін (1.19).

ABCD қалыптастыру әдісі [20] төрт Аламоути типті матрицалардың



комбинациясын пайдаланады. Төрт жіберу антеннасының кодтық матрицасы IEEE 802.16е стандартының бөлігі болып табылады және келесідей:

$$S_{ABCD} = \begin{bmatrix} A & C \\ B & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{12} & S_{56} \\ S_{34} & S_{78} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 & -\theta_2 & \theta_5 & -\theta_7 \\ \theta_2 & \theta_1 & \theta_6 & -\theta_8 \\ \theta_3 & -\theta_4 & \theta_7 & \theta_5 \\ \theta_4 & \theta_3 & \theta_8 & \theta_6 \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

Осылайша, Аламоути кодының көрнекті қасиеттері екі уақыт аралықтарында ақпараттық белгілерді жіберуге мүмкіндік береді, үлкен өлшемдердің кеңістіктік-уақыттық матрицаларын қалыптастыруда қолдануға болатыны көрсетілген. АВ, АВВА және ABCD матрицаларын құрудың сипатталған процедураларын басқа генерациялайтын матрицаларға қолдануға болады [20].

Үлкен өлшемді кодтарды құру бағыттарының бірі алуға мүмкіндік беретін матрицалық факторларды пайдалану болды.

«Сирек» (нөлдік элементтердің айтарлықтай санын қамтитын) кеңістік-уақыт матрицалары [20].

Әдістердің бірінде 1 және -1 элементтерінен тұратын және  $2 \times 2$  өлшемі үшін келесі пішіні бар белгілі Адамара матрицасы қолданылады :

$$HAD_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

Адамара матрицасының маңызды қасиеті келесі өрнекпен сипатталады [18]:

$$HAD_{n \times n} \times HAD_{n \times n}^T = n \cdot I_{n \times n}, \quad (1.25)$$

мұндағы I – сәйкестік матрицасы.

Матрица өлшемін одан әрі ұлғайту алдыңғы өлшемнің матрицасының элементтерінің әрқайсысының орнына  $2 \times 2$  өлшемді Адамара матрицасын ауыстыру есебінен орын алады. Осылайша,  $4 \times 4$  өлшемді Адамара матрицасы келесі түрге ие:

$$HAD_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

Төрт таратқыш антеннасы бар жүйе үшін үлкен өлшемді матрицаны құру тәсілдерінің бірі (1.26) көрсетілген принципті қолдана отырып, [10] ұсынылған генерациялаушы матрицаны құруға әкеледі. Генераторлық матрица негіз ретінде

алынады, ол Адамара матрицасы (1.24) принципі бойынша екі жіберуші антенна үшін:

$$S_{HAD_{2 \times 2}} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 \\ \theta_3 & -\theta_4 \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

Құрылымнан (1.27) төрт таратқыш антенналар үшін құрастырылған матрица келесі пішінге ие:

$$S_{HAD_{4 \times 4}} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_9 & \theta_{10} \\ \theta_3 & -\theta_4 & \theta_{11} & -\theta_{12} \\ \theta_5 & \theta_6 & -\theta_{13} & -\theta_{14} \\ \theta_7 & -\theta_8 & -\theta_{15} & \theta_{16} \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

Адамара матрицасын қолдану нұсқаларының бірі бастапқы матрицаны Адамара матрицасына көбейту арқылы кодтың шуға төзімділігін арттыру болып табылады [16] (1.24). Осындай құрылыстың бір мысалы - Аламоути кодының белгілі матрицасын Адамара матрицасына көбейту:

$$S_{HAD_{2 \times 2}} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 \\ \theta_2 & -\theta_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 + \theta_2 & \theta_2 - \theta_1 \\ \theta_1 - \theta_2 & \theta_2 + \theta_1 \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

Антенналардың көп санын пайдалану қажет болса, жоғарыда сипатталған (1.18) АВ әдісін қолдануға болады:

$$S_{HAD_4} = \begin{bmatrix} S^1_{HAD_{2 \times 2}} \\ S^2_{HAD_{2 \times 2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 + \theta_2 & \theta_2 - \theta_1 \\ \theta_1 - \theta_2 & \theta_2 + \theta_1 \\ \theta_3 + \theta_4 & \theta_4 - \theta_3 \\ \theta_3 - \theta_4 & \theta_4 + \theta_3 \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

Кодтың қасиеттерін жақсарту және өлшемін ұлғайту үшін сирек кеңістік-уақыт кодтау матрицаларына қатысты әдістер қолданылады [11]. Сиректікке нөлдер мен бірліктерден тұратын матрицалық факторларды қолдану арқылы қол жеткізіледі. Мұндай матрицалар IEEE 802.16.e және 3GPP Release 8.9 стандарттары үшін ортогоналды кодтарды құрайды [12]:

$$S^1_{AlamoutiSpread} = \begin{bmatrix} \theta_1 - \theta_2 & 0 & 0 \\ \theta_2 & \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_3 - \theta_4 \\ 0 & 0 & \theta_4 & \theta_3 \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

$$S^2_{AlamoutiSpread} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\theta_4 & \theta_3 \\ -\theta_2 & \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_3 & \theta_4 \\ \theta_1 & \theta_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

## 1.7 Кеңістік-уақыт кодтарының оңтайлылық критерийлері

Кеңістік-уақыт кодтарын синтездеудің аналитикалық әдістерін құру маңызды мәселе болып табылады [15]. Ортогоналды код демодуляцияның есептеу күрделілігі тұрғысынан оңтайлы болып табылады [3]. Барлық жаңа кеңістік-уақыт кодтары толық жылдамдықпен болмайды, яғни. олардың кодтау жылдамдығы оңтайлы кодқа қарағанда төмен болады [14].

Кеңістік-уақыт кодтарын синтездеудің аналитикалық әдістері генерациялайтын матрицалардың рангі мен анықтаушысына қойылатын талаптарға негізделген [20].

Оңтайлылық дәрежесінің критерийі қабылдау және жіберу антенналарының сандарының көбейтіндісіне тең максималды әртүрлілік тәртібіне жету болып табылады [3]. Деңгейлік критерийді пайдалану үшін келесі түрдегі айырмашылық матрицасын пайдалану қажет:

$$B(\theta, \hat{\theta}) = \begin{bmatrix} \theta(1) - \hat{\theta}(1) & \dots & \theta_N(1) - \hat{\theta}_N(1) \\ \vdots & & \vdots \\ \theta_1(\rho) - \hat{\theta}_1(\rho) & \dots & \theta_N(\rho) - \hat{\theta}_N(\rho) \end{bmatrix} \quad (1.33)$$

мұндағы  $\theta$  – күрделі ақпараттық символдардың тасымалданатын векторы,  $\hat{\theta}$  – алынған кешенді ақпараттық белгілердің бағалау векторы. Осылайша, берілген және қабылданған векторлардың барлық жұптары үшін B матрицасының рангін азайту қажет.

$$\min(\text{rank}(B(\theta, \hat{\theta}))) \quad (1.34)$$

Айта кету керек, бұл минимум кеңістік-уақыт кодының параметрлерінің өзгеруіне байланысты біркелкі өзгере алмайды және көп дәрежеде матрицаның ішкі құрылымын және ондағы нөлге жақын элементтердің санын көрсетеді.

Анықтаушы критерийді қолданғанда үздіксіз функцияның максимумын анықтау қажет. Критерий келесі түрдегі матрицалық анықтаушыны есептеуді талап етеді [3]:

$$A(\theta_i, \theta_j) = S(\theta_i \cdot r) \cdot S(\theta_j \cdot r) \quad (1.35)$$

мұндағы S – кеңістік-уақыт кодының генерациялаушы матрицасы, күрделі ақпараттық символдар векторының  $\theta_i$ -  $i$ -ші комбинациясы,  $\theta_j$  – күрделі

ақпараттық символдар векторының  $j$  – ші комбинациясы,  $r$  – вектор, ол тудырушы матрицаның қасиеттерімен анықталады.

Анықтаушы критерий  $r$  векторының әрбір мәні үшін  $\theta_i, \theta_j$  барлық мүмкін болатын өзара комбинацияларды санау және өзара комбинациядағы максималды анықтауышты, ал әрбір мәні үшін алынғандардың ішіндегі ең үлкен анықтауышты анықтау арқылы (1.35) матрицаның анықтаушысын есептеуден тұрады.

## **2 Үлкен өлшемді жаңа кеңістік-уақыт кодтары. Үлкен өлшемді кеңістік-уақыт кодының арнасының эквивалентті виртуалды матрицасын синтездеу әдістері**

МІМО жүйесінің өткізу қабілеті параллель арналар санына тікелей тәуелді екені белгілі, ол өз кезегінде жіберуші және қабылдаушы антенналардың санымен анықталады. [3, 4, 13, 16] Осылайша, байланыс жүйелеріндегі ақпаратты беру жылдамдығына талаптардың өсуі қабылдау және жіберу антенналарының санына өсіп келе жатқан талаптарды қояды.

Қазіргі уақытта LTE-advanced стандартындағы антенналардың саны 8-ге жетуі мүмкін, ал бесінші буын стандарттарының перспективалы тобында Large Scale MIMO технологиясын стандарттау және пайдалану ұсынылады, антенналар саны 128-ге жетуі мүмкін [3, 6].

Ақпаратты беру мүмкіндігі бар жаңа кеңістік-уақыт кодтарын құру кезек күттірмейтін мәселе болып табылады, олар бір циклде ақпараттық белгілердің барлық жиынтығын қамтиды, ал келесі циклде бірдей белгілер жиынтығын қамтитын бірдей ақпаратты қамтиды. Бұл механизм шуға қарсы иммунитетті жақсарту және MIMO жүйесінің спектрлік тиімділігін арттыру үшін қолданылады [3, 4, 13].

Жаңа кеңістік-уақыт кодтары ретінде Алтын типті кодтың генерациялаушы матрицасына (1.12) және сигнал шоқжұлдызының айналуы бар кодқа (1.14) негізделген екі кодты пайдалану ұсынылады.

### **2.1 Екіден көп антенналар саны үшін өзгертілген Алтын кодты қалыптастыру**

Алтын матрицаны зерттеу нәтижелері қарапайым BLAST кодтарымен салыстырғанда айтарлықтай артықшылықтарды анықтады [3]. Екі таратқыш антенна арқылы екі уақыт слотындағы символдар комбинациясын берумен байланысты кодқа енгізілген қасиеттер басқа кодтардан артықшылығын сақтай отырып, үлкен өлшемді кеңістік-уақыт кодын құра алады [9].

Алтын кеңістік-уақыт кодының генераторлық матрицасы (1.12) формасына ие. АВ қалыптастыру әдісін қолданып, бірнеше Алтын типті матрицалардан құрастырылған жоғары өлшемді матрицаны құруды қарастыру ұсынылады [22]. Матрицаның дизайны екі антенна топтары үшін орын алады, осылайша, жеке Алтын матрицалардан тұратын модификацияланған Алтын типті жалпылама матрица келесі пішінге ие:

$$S_{\text{Алтын Жалпы}} = \begin{bmatrix} S_{\text{Алтын}}^1 \\ S_{\text{Алтын}}^2 \\ \vdots \\ S_{\text{Алтын}}^{N \setminus 2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 + jr\theta_4 & r\theta_2 + \theta_3 \\ \theta_2 - r\theta_3 & jr\theta_1 + \theta_4 \\ \theta_5 + jr\theta_8 & r\theta_6 + \theta_7 \\ \theta_6 - r\theta_7 & jr\theta_5 + \theta_8 \\ \vdots & \vdots \\ \theta_{2N-3} + jr\theta_{2N} & r\theta_{2N-2} + \theta_{2N-1} \\ \theta_{2N-2} - r\theta_{2N-1} & jr\theta_{2N-3} + \theta_{2N} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

мұндағы  $S_{\text{Алтын Жалпы}}$  - өзгертілген Алтын түрінің кодтық матрицасы,  $S_{\text{Алтын}}^{1,2..N \setminus 2}$  - екі антеннаға арналған алтын код матрицасы (1.12) [20]. 8 жіберу антеннасы бар қолданыстағы жүйелер үшін төрт Алтын типті матрицаларды дәйекті пайдалану қажет және кеңістік-уақыт матрицасы:

$$S_{\text{Алын}}^{STx} = \begin{bmatrix} \theta_1 + jr\theta_4 & r\theta_2 + \theta_3 \\ \theta_2 - r\theta_3 & jr\theta_1 + \theta_4 \\ \theta_5 + jr\theta_8 & r\theta_6 + \theta_7 \\ \theta_6 - r\theta_7 & jr\theta_5 + \theta_8 \\ \theta_9 + jr\theta_{12} & r\theta_{10} + \theta_{11} \\ \theta_{10} - r\theta_{11} & jr\theta_9 + \theta_{12} \\ \theta_{13} + jr\theta_{16} & r\theta_{14} + \theta_{15} \\ \theta_{14} - r\theta_{15} & jr\theta_{13} + \theta_{16} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

## 2.2 Сигнал шоқжұлдызының айналуымен модификацияланған кодты қалыптастыру

Төрт антеннаға арналған сигнал шоқжұлдызының (1.14) айналуымен белгілі матрица үлкен өлшемді АВ кодын генерациялау әдісін пайдалана отырып, үлкен өлшемді генерациялаушы матрицаны құру үшін негіз ретінде пайдаланылуы мүмкін [20], содан кейін Төртке бөлінетін таратқыш антенналар санының өзгертілген коды:

$$S_{\text{CPS-N}} = \begin{bmatrix} S_{\text{CPS4}}^1 \\ S_{\text{CPS4}}^2 \\ \vdots \\ S_{\text{CPS4}}^{N \setminus 4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \\ \xi\theta_2 & \theta_1 & \xi\theta_4 & \theta_3 \\ -\theta_3 & -\xi\theta_4 & \theta_1 & \xi\theta_2 \\ -\theta_4 & -\theta_3 & \theta_2 & \theta_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta_{N-3} & \theta_{N-2} & \theta_{N-1} & \theta_N \\ \xi\theta_{N-2} & \theta_{N-3} & \xi\theta_N & \theta_{N-1} \\ -\theta_{N-1} & -\xi\theta_N & \theta_{N-3} & \xi\theta_{N-2} \\ -\theta_N & -\theta_{N-1} & \theta_{N-2} & \theta_{N-3} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$



Мұндағы  $S_{CPS-N}$  – өзгертілген шоқжұлдыздың айналдырылған кодтық матрицасы,  $S_{CPS4}^{1.2..N\setminus 4}$  – төрт антеннаға арналған шоқжұлдыздың айналдырылған кодтық матрицасы. 8 антеннасы бар қолданыстағы жүйелер үшін екі матрицаны дәйекті пайдалану қажет, ал кеңістік-уақыт матрицасы:

$$S_{CPS}^{8TЖ} = \begin{bmatrix} S_{CPS4}^1 \\ S_{CPS4}^2 \\ \vdots \\ S_{CPS4}^{N\setminus 4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \\ \xi\theta_2 & \theta_1 & \xi\theta_4 & \theta_3 \\ -\theta_3 & -\xi\theta_4 & \theta_1 & \xi\theta_2 \\ -\theta_4 & -\theta_3 & \theta_2 & \theta_1 \\ \theta_5 & \theta_6 & \theta_7 & \theta_8 \\ \xi\theta_6 & \theta_5 & \xi\theta_5 & \theta_7 \\ -\theta_7 & -\xi\theta_5 & \theta_5 & \xi\theta_6 \\ -\theta_8 & -\theta_5 & \theta_6 & \theta_5 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Жоғары өлшемді кодтың нұсқаларының бірі ауыстырылған матрица (1.14) негізіндегі код болуы мүмкін. Содан кейін, АВ әдісін қолдана отырып, төрт антеннасы бар жүйе үшін генераторлық матрица:

$$S_{CPS-N} = \begin{bmatrix} S_{CPS4}^1 \\ S_{CPS4}^2 \\ \vdots \\ S_{CPS4}^{N\setminus 4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \xi\theta_2 & -\theta_3 & -\theta_4 \\ \theta_2 & \theta_1 & -\xi\theta_4 & -\theta_3 \\ \theta_3 & \xi\theta_4 & \theta_1 & \xi\theta_2 \\ -\theta_4 & -\theta_3 & \theta_1 & \theta_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta_{N-3} & \xi\theta_{N-2} & -\theta_{N-1} & -\theta_N \\ \theta_{N-2} & \theta_{N-3} & -\xi\theta_N & -\theta_{N-1} \\ \theta_{N-1} & \xi\theta_N & \theta_{N-3} & \theta_{N-2} \\ \theta_N & \theta_{N-1} & \xi\theta_{N-2} & \theta_{N-3} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

8 антеннасы бар қолданыстағы жүйелер үшін екі матрицаны дәйекті пайдалану қажет, ал кеңістік-уақыт матрицасы:

$$S_{CPS}^{8TЖ} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \xi\theta_2 & -\theta_3 & -\theta_4 \\ \theta_2 & \theta_1 & -\xi\theta_4 & -\theta_3 \\ \theta_3 & \xi\theta_4 & \theta_1 & \theta_2 \\ \theta_4 & \theta_3 & \xi\theta_2 & \theta_1 \\ \theta_5 & \xi\theta_6 & -\theta_7 & -\theta_8 \\ \theta_6 & \theta_5 & -\xi\theta_5 & -\theta_7 \\ \theta_7 & \xi\theta_5 & \theta_5 & \theta_6 \\ \theta_8 & \theta_7 & \xi\theta_6 & \theta_5 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

### 2.3 Голден типті код пен шоқжұлдыздың айналмалы коды үшін эквивалентті виртуалды арна матрицасын қалыптастыру

Кеңістік-уақыт Алтын матрицаларын (1.12) [2] пайдаланып, екі жіберуші және екі қабылдаушы антеннасы бар жүйені қарастырайық.

Бірінші уақыт интервалында (1 уақыт нүктесі)  $\theta_1 + jr\theta_4$  символдарының комбинациясы 1-антенна арқылы, ал  $\theta_2 - r\theta_3$  2-антенна арқылы беріледі. Екінші интервалда (2-уақыт) комбинация 1-антенна арқылы беріледі  $\theta_2 - r\theta_3$ , және  $jr\theta_1 + \theta_4$  антенна 2 арқылы беріледі.

Осылайша, 1-ші уақытта қабылдаушы антенна 1 қабылдайды пішіннің сигналы

$$y_{11} = h_{11} \cdot (\theta_1 + jr\theta_4) + h_{21} \cdot (\theta_2 - r\theta_3) + \eta_{11} = h_{11}\theta_1 + h_{21}\theta_2 + rh_{21}\theta_3 + jrh_{11}\theta_4 + \eta_{11}.$$

2-уақытта пішіннің сигналы қабылдау антеннасына 1 келеді

$$jrh_{21}\theta_1 + rh_{11}\theta_2 + h_{11}\theta_3 + h_{21}\theta_4 + \eta_{12}.$$

$$y_{12} = h_{11} \cdot (r\theta_2 + \theta_3) + h_{21} \cdot (jr\theta_1 + \theta_4) + \eta_{12}$$

1-уақыт сәтінде пішіннің сигналы қабылдау антеннасына 2 келеді

$$y_{21} = h_{12}jr\theta_4 + h_{22} \cdot (\theta_2 - r\theta_3) + \eta_{21} = h_{12}\theta_1 + h_{22}\theta_2$$

2-уақытта пішіннің сигналы қабылдау антеннасына 2 келеді

$$y_{22} = h_{12} \cdot (r\theta_2 + \theta_3) + h_{22} \cdot (jr\theta_1 + \theta_4) + \eta_{22} = jrh_{22}\theta_1 + rh_{12}\theta_2 + h_{12}\theta_3 + h_{22}\theta_4 + \eta_{22}$$

Алынған өрнектерді матрицалық түрде қайта жазайық, сонда бақылау моделі келесідей болады:

$$\begin{bmatrix} y_{11} \\ y_{12} \\ y_{21} \\ y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & -rh_{21} & jrh_{11} \\ jrh_{21} & rh_{11} & h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} & -rh_{22} & jrh_{12} \\ jrh_{22} & rh_{12} & h_{12} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Эквивалентті виртуалды арна матрицасы [3] пішініне ие:

$$EVCM_{\text{АЛТЫН}}^{2TX} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & -rh_{21} & jrh_{11} \\ jrh_{21} & rh_{11} & h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} & -rh_{22} & jrh_{12} \\ jrh_{22} & rh_{12} & h_{12} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

(2.7), (2.8) тармақтарындағы белгі (1.3), (1.12), (1.17) белгілеріне сәйкес келеді.

Сигнал шоқжұлдызының (1.14) айналуымен транспозицияланған кеңістік-уақыт матрицасын пайдаланатын төрт жіберуші және төрт қабылдаушы антеннасы бар байланыс жүйесін қарастырайық.

1 уақыт мезетінде қабылдау антенналары 1, 2, 3, 4 түрдегі сигналдарды қабылдайды.

$$\begin{aligned} y_{11} &= h_{11}\theta_1 + h_{21}\theta_2 + h_{31}\theta_3 + h_{41}\theta_4 + \eta_{11} \\ y_{21} &= h_{12}\theta_1 + h_{22}\theta_2 + h_{32}\theta_3 + h_{42}\theta_4 + \eta_{21} \\ y_{31} &= h_{13}\theta_1 + h_{23}\theta_2 + h_{33}\theta_3 + h_{43}\theta_4 + \eta_{31} \\ y_{41} &= h_{14}\theta_1 + h_{24}\theta_2 + h_{34}\theta_3 + h_{44}\theta_4 + \eta_{41} \end{aligned} \quad (2.9)$$

2 уақытта қабылдау антенналары 1, 2, 3, 4 түрдегі сигналдарды қабылдайды.

$$\begin{aligned} y_{12} &= h_{11}\xi\theta_2 + h_{21}\theta_1 + h_{31}\xi\theta_4 + h_{41}\theta_3 + \eta_{12} = h_{21}\theta_1 + h_{11}\xi\theta_2 + h_{41}\theta_3 + h_{31}\xi\theta_4 + \eta_{12} \\ y_{22} &= h_{12}\xi\theta_2 + h_{22}\theta_1 + h_{32}\xi\theta_4 + h_{42}\theta_3 + \eta_{22} = h_{22}\theta_1 + h_{12}\xi\theta_2 + h_{42}\theta_3 + h_{32}\xi\theta_4 + \eta_{22} \\ y_{32} &= h_{13}\xi\theta_2 + h_{23}\theta_1 + h_{33}\xi\theta_4 + h_{43}\theta_3 + \eta_{32} = h_{23}\theta_1 + h_{13}\xi\theta_2 + h_{43}\theta_3 + h_{33}\xi\theta_4 + \eta_{32} \\ y_{42} &= h_{14}\xi\theta_2 + h_{24}\theta_1 + h_{34}\xi\theta_4 + h_{44}\theta_3 + \eta_{42} = h_{24}\theta_1 + h_{14}\xi\theta_2 + h_{44}\theta_3 + h_{34}\xi\theta_4 + \eta_{42} \end{aligned} \quad (2.10)$$

3-уақыт нүктесінде пішіннің сигналдары 1, 2, 3, 4 қабылдау антенналарына келеді.

$$\begin{aligned} y_{13} &= h_{11}\xi\theta_2 + h_{21}\theta_1 + h_{31}\xi\theta_4 + h_{41}\theta_3 + \eta_{12} = h_{21}\theta_1 + h_{11}\xi\theta_2 + h_{41}\theta_3 + h_{31}\xi\theta_4 + \eta_{12} \\ y_{23} &= h_{12}\xi\theta_2 + h_{22}\theta_1 + h_{32}\xi\theta_4 + h_{42}\theta_3 + \eta_{22} = h_{22}\theta_1 + h_{12}\xi\theta_2 + h_{42}\theta_3 + h_{32}\xi\theta_4 + \eta_{22} \\ y_{33} &= h_{13}\xi\theta_2 + h_{23}\theta_1 + h_{33}\xi\theta_4 + h_{43}\theta_3 + \eta_{32} = h_{23}\theta_1 + h_{13}\xi\theta_2 + h_{43}\theta_3 + h_{33}\xi\theta_4 + \eta_{32} \\ y_{43} &= h_{14}\xi\theta_2 + h_{24}\theta_1 + h_{34}\xi\theta_4 + h_{44}\theta_3 + \eta_{42} = h_{24}\theta_1 + h_{14}\xi\theta_2 + h_{44}\theta_3 + h_{34}\xi\theta_4 + \eta_{42} \end{aligned} \quad (2.11)$$

4-уақытта пішіннің сигналдары 1, 2, 3, 4 қабылдау антенналарына келеді.

$$\begin{aligned} y_{14} &= h_{11}\xi\theta_2 + h_{21}\theta_1 + h_{31}\xi\theta_4 + h_{41}\theta_3 + \eta_{12} = h_{21}\theta_1 + h_{11}\xi\theta_2 + h_{41}\theta_3 + h_{31}\xi\theta_4 + \eta_{12} \\ y_{24} &= h_{12}\xi\theta_2 + h_{22}\theta_1 + h_{32}\xi\theta_4 + h_{42}\theta_3 + \eta_{22} = h_{22}\theta_1 + h_{12}\xi\theta_2 + h_{42}\theta_3 + h_{32}\xi\theta_4 + \eta_{22} \\ y_{34} &= h_{13}\xi\theta_2 + h_{23}\theta_1 + h_{33}\xi\theta_4 + h_{43}\theta_3 + \eta_{32} = h_{23}\theta_1 + h_{13}\xi\theta_2 + h_{43}\theta_3 + h_{33}\xi\theta_4 + \eta_{32} \\ y_{44} &= h_{14}\xi\theta_2 + h_{24}\theta_1 + h_{34}\xi\theta_4 + h_{44}\theta_3 + \eta_{42} = h_{24}\theta_1 + h_{14}\xi\theta_2 + h_{44}\theta_3 + h_{34}\xi\theta_4 + \eta_{42} \end{aligned} \quad (2.12)$$

(2.11), (2.12) теңдеулерінің екі жағын біріктірейік. Содан кейін, ұқсастық бойынша, эквивалентті виртуалды арна матрицасы келесі пішінге ие болады:

$$\mathbf{EVCM}_{CPS4}^{4TX} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & h_{31} & h_{41} \\ h_{12} & h_{22} & h_{32} & h_{42} \\ h_{13} & h_{23} & h_{33} & h_{43} \\ h_{14} & h_{24} & h_{34} & h_{44} \\ h_{21} & h_{11}\xi & h_{414} & h_{31}\xi \\ h_{22} & h_{12}\xi & h_{42} & h_{32}\xi \\ h_{32} & h_{13}\xi & h_{43} & h_{33}\xi \\ h_{42} & h_{14}\xi & h_{44} & h_{34}\xi \\ h_{31} & h_{41}\xi & -h_{11} & -h_{21}\xi \\ h_{32} & h_{42}\xi & -h_{12} & -h_{22}\xi \\ h_{33} & h_{43}\xi & -h_{13} & -h_{23}\xi \\ h_{34} & h_{44}\xi & -h_{14} & -h_{24}\xi \\ h_{41} & h_{31} & -h_{21} & -h_{11} \\ h_{42} & h_{32} & -h_{22} & -h_{12} \\ h_{43} & h_{33} & -h_{23} & -h_{13} \\ h_{44} & h_{34} & -h_{24} & -h_{14} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

## 2.4 Жоғары өлшемді EVCM матрицасын синтездеу есебінің қойылымы

MIMO жүйесінің өткізу қабілеті параллельді арналар санына тікелей байланысты екені белгілі, ол өз кезегінде жіберуші және қабылдаушы антенналардың санымен анықталады [3, 13].

Бір қызығы, EVCM матрицасын құру әрбір қабылдау антеннасындағы қабылданған сигнал үшін өрнектерді біршама қиын алгебралық түрлендіруді талап етеді [13]. Кеңістік-уақыт матрицасының өлшемі аз болған жағдайда мұндай түрлендірулерді (2.9), (2.12) өрнектері арқылы оңай жүзеге асыруға болады.

8 жіберу антеннасы бар қолданыстағы жүйелер төрт Алтын матрицаның дәйекті қолданылуын немесе 16 тұжырымдалған теңдеу жүйесін талап етеді; 128 антенна үшін 256 теңдеу қажет. Осылайша, EVCM матрицасын құру арқылы осы типтегі кеңістік-уақыт матрицасын BLAST схемасына түрлендіру мәселесі алға шығады.

## 2.5 Антенналар саны екіден көп болған кезде өзгертілген Алтын код үшін бір эквивалентті виртуалды арна матрицасын құрудың қайталанатын әдісі

Төрттен астам антенналар саны үшін модификацияланған Алтын кодтың генераторлық матрицасын пайдалану EVCM аналитикалық түрде құруға мүмкіндік беретін математикалық аппаратты құруды талап етеді.

Алтын код үшін EVCM матрицасын рекурсивті құруға мүмкіндік беретін тәсілді қарастырайық [17].

Екі таратқыш антеннаға арналған Алтын матрицаның құрылымы (1.12) пішініне ие.

Осы матрицаның элементтерін былай белгілейік:

$$\begin{aligned} G_1^{11} &= \frac{\theta_1 + Jr\theta_4}{\sqrt{1+r^2}} \\ G_1^{21} &= \frac{\theta_2 - r\theta_3}{\sqrt{1+r^2}} \\ G_1^{12} &= \frac{r\theta_2 + \theta_3}{\sqrt{1+r^2}} \\ G_1^{22} &= \frac{jr\theta_1 + \theta_4}{\sqrt{1+r^2}} \end{aligned} \quad (2.14)$$

(2.14) элементтерінің үстінгі белгісі екі санның тіркесімі болып табылады: бірінші сан – таратқыш антеннаның нөмірі, екінші сан – уақыт аралығының нөмірі. Қолданылатын матрицаның нөмірі. Осылайша, түрлендірілген Алтын типті матрицаны келесідей көрсетуге болады:  $S_{Жалпы}^{Алтын}$  (2.1) және (2.14) ескере отырып.

$$S_{Жалпы}^{Алтын} = \begin{bmatrix} G_1^{11} & G_1^{12} \\ G_1^{21} & G_1^{22} \\ G_2^{11} & G_2^{12} \\ G_2^{21} & G_2^{22} \\ \vdots & \\ G_{N\setminus 2}^{11} & G_{N\setminus 2}^{12} \\ G_{N\setminus 2}^{21} & G_{N\setminus 2}^{22} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

EVCM құру үшін әрбір қабылдау антеннасында қабылданған сигналдардың қосындысын жасау керек. Қосынды жіберілген сигналды арнаның қасиеттерін анықтайтын коэффициентке көбейту арқылы қалыптасады. Бірінші қабылдау антеннасының бірінші сағатындағы MIMO жүйесіндегі қабылданған сигналды былай жазайық:

$$y_{11} = G_1^{11} \cdot h_{11} + G_1^{21} \cdot h_{21} + G_2^{11} \cdot h_{31} + G_2^{21} \cdot h_{41} + \dots + G_{N \setminus 2}^{11} \cdot h_{(N-1)1} + G_{N \setminus 2}^{21} \cdot h_{N1} + \eta_{11} \quad (2.16)$$

мұнда қабылданған сигналдың индекстері келесі түрде қалыптасады: бірінші индекс - қабылдау антеннасының нөмірі, екінші индекс - циклдің нөмірі. Күрделі арнаның беріліс факторлары  $h_{nm}$ , индекстері бар:  $n$  - жіберуші антенна нөмірі,  $m$  - қабылдау антеннасының нөмірі. Екінші қабылдау антеннасындағы екінші тактілік циклде сигналдың өрнегі келесідей:

$$y_{12} = G_1^{12} \cdot h_{11} + G_1^{22} \cdot h_{21} + G_2^{12} \cdot h_{31} + G_2^{22} \cdot h_{41} + \dots + G_{N \setminus 2}^{12} \cdot h_{(N-1)1} + G_{N \setminus 2}^{22} \cdot h_{N1} + \eta_{12} \quad (2.17)$$

(2.16) және (2.17) өрнектерді жалпылай отырып, бірінші және екінші тактілік циклдардағы қабылдау антеннасындағы сигналдарды сипаттай отырып, теңдеулер жүйесін аламыз:

$$\begin{cases} y_{m1} = \sum_{j=1}^{N \setminus 2} (G_j^{11} \cdot h_{(2j-1)m} + G_j^{21} \cdot h_{2jm}) + \eta_{m1} \\ y_{m2} = \sum_{j=1}^{N \setminus 2} (G_j^{12} \cdot h_{(2j-1)m} + G_j^{22} \cdot h_{2jm}) + \eta_{m2} \end{cases} \quad m = 1; 2 \dots M \quad (2.18)$$

$S_{\text{Жалпы}}^{\text{Алтын}}$  матрицасының элементтері үшін өрнектерді (2.14) пайдаланып, келесі түрде жазамыз:

$$\begin{aligned} G_j^{11} &= \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \cdot (\theta_{4j-3} + jr\theta_{4j}) \\ G_j^{12} &= \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \cdot (\theta_{4j-2} + jr\theta_{4j-1}) \\ G_j^{21} &= \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \cdot (\theta_{4j-2} - jr\theta_{4j-1}) \\ G_j^{22} &= \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \cdot (\theta_{4j-3} + jr\theta_{4j}) \end{aligned} \quad j = 1; 2 \dots m \quad (2.19)$$

(2.19) өрнектерін (2.18) орнына қойып, бізде:

$$\begin{cases} y_{m1} = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \sum_{j=1}^{N \setminus 2} ((\theta_{4j-3} + jr\theta_{4j})h_{2j-1,m} + (\theta_{4j-1} - r\theta_{4j-1}) \cdot h_{2j,m}) + \eta_{m1} \\ y_{m2} = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \sum_{j=1}^{N \setminus 2} ((r\theta_{4j-2} + \theta_{4j-1})h_{2j-1,m} + (jr\theta_{4j-3} + \theta_{4j}) \cdot h_{2j,m}) + \eta_{m2} \end{cases} \quad (2.20)$$

(2.20) өрнектегі жақшаларды ашып, берілген таңбаларға қатысты терминдерді топтасақ, келесі түрдегі теңдеулер жүйесін аламыз:



$$\begin{cases} y_{m1} = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \sum_{j=1}^{N/2} (h_{2j-1,m} \cdot \theta_{4j-3} + h_{2j,m} \cdot \theta_{4j-2} - r \cdot h_{2j,m} \cdot \theta_{4j-1} + jr \cdot h_{2j-1,m} \cdot \theta_{4j}) + \eta_{m1} \\ y_{m2} = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \sum_{j=1}^{N/2} (jr h_{2j,m} \cdot \theta_{4j-3} + r h_{2j-1,m} \cdot \theta_{4j-2} + h_{2j-1,m} \cdot \theta_{4j-1} + h_{2j,m} \cdot \theta_{4j}) + \eta_{m2} \end{cases} \quad (2.21)$$

(2.21) өрнектері екі антеннаға арналған Голден кодының EVCM матрицаларынан тұратын  $2N \times 2N$  өлшемді EVCM матрицасын бөлуге мүмкіндік береді:

$$\mathbf{EVCM}_{General}^{Golden} = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{EVCM}_{n=1,2}^{m=1,2} & \mathbf{EVCM}_{n=3,4}^{m=1,2} & \dots & \mathbf{EVCM}_{n=(N-1),N}^{m=1,2} \\ \mathbf{EVCM}_{n=1,2}^{m=3,4} & \mathbf{EVCM}_{n=3,4}^{m=3,4} & \dots & \mathbf{EVCM}_{n=(N-1),N}^{m=3,4} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{EVCM}_{n=1,2}^{m=(M-1),M} & \mathbf{EVCM}_{n=3,4}^{m=(M-1),M} & \dots & \mathbf{EVCM}_{n=(N-1),N}^{m=(M-1),M} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

EVCM жалпыланған матрицасы Голден код түріндегі EVCM матрицаларынан тұрады:

$$\mathbf{EVCM}_{n=n-1,n}^{m=m-1,m} = \begin{bmatrix} h_{2n-1,m} & h_{2n,m} & -r h_{2n,m} & j r h_{2n-1,m} \\ j r h_{2n,m} & r h_{2n-1,m} & h_{2n-1,m} & h_{2n,m} \\ h_{2n-1,m+1} & h_{2n,m+1} & -r h_{2n,m+1} & j r h_{2n-1,m+1} \\ j r h_{2n,m+1} & r h_{2n-1,m+1} & h_{2n-1,m+1} & h_{2n,m+1} \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

$n=1 \dots N/2, m=1 \dots M-1$

Бұл матрицалар құрылымнан екі қабылдағыш және екі таратушы антенналары бар MIMO виртуалды жүйелерінің матрицалары ретінде қабылданады, олар қабылдағыш және таратушы антенналар жұптарының барлық мүмкін комбинацияларын қолданады.

EVCM матрицасын құрудың баяндалған әдісі өзгертілген Голден код құрылымына байланысты әдіс болып табылады және EVCM матрицасы код құрылымы мен канал моделінің қасиеттерін біріктіретін матрица болғандықтан, алынған әдіс қолданылатын кеңістік - уақытша кодқа пайдалы қосымша болып табылады [15].

## 2.6 EVCM матрицасын қалыптастырудың аналитикалық әдісі

Жоғарыда айтылғандай, BLAST жүйесінің матрицасынан басқа кеңістік-уақыттық матрицасын қолдану күрделі EVCM матрицасының құрылысын қажет етеді [14]. 2.5-параграфта өзгертілген Голден коды үшін (2.22) әдіс ұсынылды, бұл кодтың қайталану қасиеттеріне байланысты бір эквивалентті матрицаны құруға мүмкіндік береді. Алайда, бұл әдіс генеративті матрицаға және үлкен өлшемді кодты қалыптастыру әдісіне байланысты, оны басқа жағдайларда толық пайдалану мүмкін емес [15]. Осылайша, еркін өлшемнің кеңістіктік-уақыттық коды үшін EVCM матрицасын құрудың аналитикалық әдісін жасау қажет.

Бірнеше таратушы және қабылдағыш антенналар болған кезде және сигнал

белгілі бір кеңістік-уақыт матрицасының көмегімен кодталған кезде кеңістіктік-уақыттық кодтаудың жалпы жағдайы векторлық-матрицалық (1.6) теңдеумен сипатталады. Кеңістіктік-уақыттық кодтау матрицасын матрицаның кез-келген элементі барлық берілетін ақпараттық таңбаларға тәуелді болатын жалпы түрде елестетіп көріңіз:

$$\mathbf{S}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} S_{11}(\theta_1, \theta_2 \dots \theta_Q) & \dots & S_{1L}(\theta_1, \theta_2 \dots \theta_Q) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{N1}(\theta_1, \theta_2 \dots \theta_Q) & \dots & S_{NL}(\theta_1, \theta_2 \dots \theta_Q) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Енді (2.24) формуладағы  $\mathbf{S}(\boldsymbol{\theta})$  матрицасының  $S_{i,j}(\theta_1, \theta_2 \dots \theta_Q)$  еркін элементін келесі түрде елестетіп көріңіз:

$$S_{i,j}(\theta_1, \theta_2 \dots \theta_Q) = \sum_{q=1}^Q \alpha_{i,j}(q) \cdot \theta_q$$

$$i=1;2;\dots N, j=1;2;\dots L, \quad (2.25)$$

мұндағы  $\alpha_{i,j}(q)$  - жалпы жағдайда қолданылатын кеңістік-уақыт матрицасының түрімен анықталатын комплексті коэффициенттер.

(2.25)-ты (2.24)-ға қойғанда аламыз

$$\mathbf{S}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \sum_{q=1}^Q \alpha_{11}(q) \cdot \theta_q & \dots & \sum_{q=1}^Q \alpha_{1L}(q) \cdot \theta_q \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{q=1}^Q \alpha_{N1}(q) \cdot \theta_q & \dots & \sum_{q=1}^Q \alpha_{N,L}(q) \cdot \theta_q \end{bmatrix} =$$

$$\sum_{q=1}^Q \begin{bmatrix} \alpha_{11}(q) & \dots & \alpha_{1L}(q) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{N1}(q) & \dots & \alpha_{N,L}(q) \end{bmatrix} \cdot \theta_q \quad (2.26)$$

(2.26) өрнекті ықшам векторлық-матрицалық түрде қайта жазамыз:

$$\mathbf{S}(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{q=1}^Q \mathbf{A}_q \cdot \theta_q,$$

мұндағы  $\mathbf{A}_q = \begin{bmatrix} \alpha_{11}(q) & \dots & \alpha_{1L}(q) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{N1}(q) & \dots & \alpha_{NL}(q) \end{bmatrix} \quad q=1;2;\dots Q$  (2.27)

$\mathbf{A}_q$  матрицаларының түрі кеңістік-уақыт кодының бастапқы  $\mathbf{S}(\boldsymbol{\theta})$  матрицасының құрылымымен бірегей түрде анықталатынын ескеріңіз.

Модельді жеңілдету үшін баламалы виртуалды байланыс арнасының матрицасы (EVCM матрицасы) қолданылады. Бұл сізге виртуалды байланыс жүйесін енгізуге мүмкіндік береді, ол үшін ақпараттық таңбалардың әрқайсысы бір сағат ішінде бір виртуалды таратушы антенна арқылы шығарылады.

EVCM матрицасы бар виртуалды бақылау моделі келесі түрге ие:

$$y = H_{EVCM} \cdot \theta + \eta, \quad (2.27)$$

мұндағы  $H_{EVCM}$ -қажетті EVCM матрицасы, өлшемі  $N \times L \times N$ , мұндағы  $L$  - уақыт үлгілерінің саны;  $\eta$  - бақылау шуының эквивалентті векторы, өлшемі  $N \times L \times 1$ ;  $y$  - бақыланатын сигналдың эквивалентті векторы, өлшемі  $N \times L \times 1$ .

Әрі қарай ойлау (1.3) бақыланатын сигналдың бастапқы моделін (2.27) түрге түрлендіруді мақсат етеді. Бастапқы (1.3) матрицалық модельдің векторлануын түрлендіреміз:

$$vec(Y) = vec(H \cdot S(\theta)) + vec(\Gamma), \quad (2.28)$$

мұндағы  $vec(A)$  –  $A$  матрицасын  $A$  матрицасының бағандарынан дәйекті түрде құрылған баған векторына түрлендіру операциясы. Бұл операция  $A$  матрицасының векторлау операциясы деп аталады.

Матрицалардың көбейтіндісін векторландыру үшін келесі көрініс белгілі [17]:

$$vec(A \cdot B) = (1 \otimes A) \cdot vec(B), \quad (2.29)$$

мұндағы  $\otimes$ -матрицаларды көбейту операциясы;  $A$  -  $M \times N$  өлшемді матрица;  $B$  -  $N \times L$  өлшемді матрица;  $1$  -  $L \times L$  өлшемді бірлік матрица.

(2.28) өрнегін (2.29) көмегімен келесі түрге түрлендіруге болады:

$$Y = (1 \otimes H) \cdot vec(S(\theta)) + \eta, \quad (2.30)$$

Бұдан әрі (2.26) ескере отырып, кеңістік - уақыт матрицасы үшін келесі өрнек бар:

$$vec(S(\theta)) = vec\left(\sum_{q=1}^Q A_q * \theta_q\right) = \sum_{q=1}^Q \theta_q * vec(A_q), \quad (2.31)$$

матрицалық векторлау амалының айқын сызықтық қасиеттері ескерілген жерде.

Өрнек (2.31) келесі түрде ұсынылуы мүмкін:

$$vec(S(\theta)) = [vec(A_1) \quad vec(A_2) \quad \dots \quad vec(A_Q)] \cdot \theta, \quad (2.32)$$

(2.32) формуланы (2.30) қойып, біз аламыз:

$$Y = (1 \otimes H) \cdot [vec(A_1) \quad vec(A_2) \quad \dots \quad vec(A_Q)] \cdot \theta + \eta, \quad (2.33)$$

Алынған өрнек (2.33) - бұл (3) бақылау моделінің көрінісі, қабылдау және

тарату антенналарының еркін саны және BLAST типіндегі mimo виртуалды жүйесі түрінде тарату циклдерінің еркін саны. (2.26) және (2.33) негізінде EVCM матрицасы үшін түпкілікті аналитикалық өрнекті жазу қиын емес:

$$H_{EVCM} = (1 \otimes H) \cdot T, \text{ где } T = [\text{vec}(A_1) \quad \text{vec}(A_2) \quad \dots \quad \text{vec}(A_Q)] \quad (2.34)$$

Алынған өрнекте (2.34) EVCM матрицасы үшін **H** матрицасы MIMO байланыс арнасының қасиеттерін анықтайды, **T** матрицасы қолданылатын кеңістік-уақыт кодының қасиеттерін анықтайды. Осылайша,  $H_{EVCM}$  матрица байланыс арнасының қасиеттеріне де, кеңістік - уақыт кодының қасиеттеріне де байланысты.

## 2.7 Белгілі кеңістіктік үшін EVCM матрицалық синтезінің мысалдары- уақытша кодтар

EVCM матрицасы үшін (2.34) өрнектің қолданылуын кеңістік-уақыт кодтарының белгілі түрлерінің – BLAST (1.10) және Golden (1.12) мысалдарында көрсетеміз. [20]

Төрт қабылдағыш ( $m=4$ ) және төрт таратушы антенна ( $N=4$ ) жағдайында BLAST жүйесін қарастырыңыз. Мұндай жүйеде тек бір беріліс сағаты бар ( $L=1$ -тармақ), ал берілетін ақпараттық таңбалардың саны төртке тең ( $Q=4$ -тармақ), содан кейін кеңістік-уақыт матрицасы  $S_{BLAST}(\theta)$  (2.33) өрнекті ескере отырып, келесі түрде ұсынылуы мүмкін:

$$S_{BLAST}(\theta) = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \theta_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \theta_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \theta_3 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \theta_4 = A_1 \cdot \theta_1 + A_2 \cdot \theta_2 + A_3 \cdot \theta_3 + A_4 \cdot \theta_4 \quad (2.35)$$

BLAST жағдайында **t** матрицасы келесідей:

$$T_{BLAST} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

(2.36) (2.34) ауыстыру арқылы біз BLAST кодымен байланыс жүйесінің EVCM матрицасы үшін өрнек аламыз:

$$H_{EVCM.BLAST} = (1 \times H) \cdot T_{BLAST} = H \quad (2.35)$$

мұндағы  $1 = 1$ -ші жол-бұл жағдайда бірлікке тең болатын 1-ден 1-ге дейінгі өлшемнің бірлік матрицасы.

(2.35) BLAST жүйесі үшін EVSM матрицасы MIMO арна матрицасына

сәйкес келетіні анық және белгілі факт.

Енді Алтын матрицасы бар МІМО жүйесін қарастырыңыз (12). Мұндай жүйеде екі қабылдағыш антенна (  $M=2$  ) және екі таратушы антенна (  $N=2$  ) қолданылады, беріліс екі циклде жүзеге асырылады (  $L=2$  ), ал берілетін ақпараттық таңбалардың саны төртке тең (  $Q=4$  ). Мұндай жүйеде өрнектерді ескере отырып, кеңістік-уақыт матрицасы  $S_{Golden} = (\theta)$  (68) келесі түрге ие:

$$S_{Golden} = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \cdot \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & jr \end{bmatrix} \cdot \theta_1 + \begin{bmatrix} 0 & r \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \theta_2 + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -r & 0 \end{bmatrix} \cdot \theta_3 + \begin{bmatrix} jr & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \theta_4 \right) \quad (2.36)$$

(2.36) матрицалар  $A_1 A_2 A_3$  и  $A_4$  келесідей сипатталғанын көруге болады:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & jr \end{bmatrix} \\ A_2 &= \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \begin{bmatrix} 0 & r \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\ A_3 &= \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -r & 0 \end{bmatrix} \\ A_4 &= \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \begin{bmatrix} jr & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.37)$$

(2.37) ескере отырып, Алтын кодты қолданған жағдайда  $T$  матрицасы келесідей болады:

$$T_{Golden} = [vec(A_1) \quad vec(A_2) \quad vec(A_3) \quad vec(A_4)] = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & jr \\ 0 & 1 & -r & 0 \\ 0 & r & 1 & 0 \\ jr & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Нәтижесінде (76) (70) ауыстыру арқылы біз алтын кодымен байланыс жүйесінің EVCM матрицасы үшін өрнек аламыз:

$$H_{EVCM, Golden} = (1 \times H) \cdot T_{Golden} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & -rh_{21} & jrh_{11} \\ h_{12} & h_{22} & -rh_{22} & jrh_{12} \\ jrh_{21} & rh_{11} & h_{11} & h_{21} \\ jrh_{22} & rh_{12} & h_{12} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

мұндағы  $1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  - өлшем бірлігі матрицасы  $2 \times 2$ ;  $H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} \end{bmatrix}$

МІМО байланыс арнасының матрицасы 2 өлшем 2. Бұл жерде матрица элементінің бірінші индексі таратушы антеннаның нөмірі, ал екінші индексі қабылдау антеннасының нөмірі екенін атап өткен жөн.

Формула (2.39) арқылы алынған EVCM матрицасының өрнегі Алтын уақыт матрицасымен (1.12) теңдеулер жүйесін түрлендіру арқылы алынған теңдеулер жүйесінің матрицасына (2.9) сәйкес келеді.

Көрсетілген мысалдар кеңістіктік уақытты кодтайтын әртүрлі MIMO жүйелері үшін (2.32) түрінде балама виртуалды арна матрицасын ұсынудың әділдігін көрсетеді.

## 2.8 Күрделі біріктірілген шамалар жағдайында EVCM матрицасын қалыптастырудың аналитикалық әдісін жалпылау

Олардың құрылымында бірқатар кеңістіктік-уақыттық кодтар тек берілген таңбалардың мәндерін ғана емес, сонымен қатар олардың жан-жақты жұптасқан мәндерін де пайдаланады. Мұндай кодтаудың бір мысалы-жалпы Аламоути коды (1.7), сонымен қатар оның схемасына негізделген үлкен өлшемді жүйелер үшін кодтау схемалары. EVCM матрицасын қалыптастыру үшін күрделі конъюгативті шамалардың құрылымында болудың осы факторын ескеретін әдісті ұсыну қажет.

Құрылған құрылымда сандары бар бағандар қатары бар делік  $l_1, l_2 \dots l_k, 1 \leq k \leq L$  онда тек біріктірілген таңбалар бар. Мұндай болжам белгілі генеративті матрицалардың оларды белгілі бір бағанда ғана қамтитынына сүйене отырып мүмкін болады [3].

Қабылданған сигналдар матрицасындағы кез-келген циклге сәйкес келетін жеке бағанның түрін қарастырыңыз. Мұндай баған сыртқы түрі бар:

$$y_n = H_n * S_n(\theta) + \eta_n, \quad n = 1 \dots L, \quad (2.40)$$

Егер  $n \in \{l_1, l_2 \dots l_k\}$  яғни, қабылданған сигналдар матрицасындағы баған күрделі конъюгацияланған таңбаларды қамтитын генеративті код бағанынан қалыптасады, содан кейін (2.24) көрініске (2.40) ауыстырамыз:

$$y_n = H_n \cdot \begin{bmatrix} \sum_{q=1}^Q \alpha_{1n}(q) \cdot \theta'_q \\ \vdots \\ \sum_{q=1}^Q \alpha_{Nn}(q) \cdot \theta'_q \end{bmatrix} + \eta_n, \quad \text{егер } n \in \{l_1, l_2 \dots l_k\} \quad y_n = H_n \cdot \begin{bmatrix} \sum_{q=1}^Q \alpha_{1n}(q) \cdot \theta_q \\ \vdots \\ \sum_{q=1}^Q \alpha_{Nn}(q) \cdot \theta_q \end{bmatrix} + \eta_n$$

Барлық  $n \in \{l_1, l_2 \dots l_k\}$  біз жұптасамыз. Сонда біз аламыз:

$$y'_n = \begin{bmatrix} \sum_{q=1}^Q \alpha_{1n}(q) \cdot \theta_q \\ \vdots \\ \sum_{q=1}^Q \alpha_{Nn}(q) \cdot \theta_q \end{bmatrix} + \eta'_n \quad (2.41)$$

Біз элемент болатын жаңа бақылау векторын құрамыз  $y_n$ , онда  $n \in \{l_1, l_2 \dots l_k\}$  ауыстырылады  $y'_n$ , содан кейін матрицаларды қалыптастыру кезінде  $A_q$  тиісті бағандар олардың жұптасқандарына ауыстырылады, осылайша бізде түрлендірілген матрицаның бұл түрі бар  $\tilde{A}_q$ :

$$\tilde{\mathbf{A}}_q = \begin{pmatrix} \alpha_{11}(q) & \dots & \alpha_{1,j_1}(q) & \dots & \alpha_{1,j_k}(q) & \dots & \alpha_{1L}(q) \\ \alpha_{21}(q) & \dots & \alpha_{2,j_1}(q) & \dots & \alpha_{2,j_k}(q) & \dots & \alpha_{2L}(q) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{M1}(q) & \dots & \alpha_{M,j_1}(q) & \dots & \alpha_{M,j_k}(q) & \dots & \alpha_{ML}(q) \end{pmatrix}$$

Осылайша, конъюгацияны ескере отырып, векторланған бақылау моделі келесідей болады:

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \tilde{\Delta} \cdot [\text{vec}(\tilde{\mathbf{A}}_1) \dots \text{vec}(\tilde{\mathbf{A}}_q)] \cdot \tilde{\boldsymbol{\theta}} + \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \quad (2.42)$$

$$\text{Онда } \tilde{\mathbf{Y}} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{21} \dots & y_{L,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{1,l_1} & y_{2,l_1} \dots & y_{L,l_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{1,L_k} & y_{2,L_k} \dots & y_{L,L_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{1,M} & y_{2,M} \dots & y_{L,M} \end{pmatrix}, \tilde{\Delta} = (\mathbf{1} \otimes \mathbf{H})' = \begin{pmatrix} A_1 \\ \vdots \\ \text{conj}(\Delta_l) \\ \vdots \\ \text{conj}(\Delta_{L_k}) \\ \vdots \\ \Delta_N \end{pmatrix}, \tilde{\boldsymbol{\theta}} = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_{l_1} \\ \vdots \\ \theta_{L_k} \\ \vdots \\ \theta_N \end{pmatrix} \text{ және шу } \tilde{\boldsymbol{\eta}} = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \vdots \\ \eta_{l_1} \\ \vdots \\ \eta_{L_k} \\ \vdots \\ \eta_M \end{pmatrix}$$

корреляциялық матрицамен  $2\sigma_\eta^2 \cdot \mathbf{I}$ .

Осылайша, генеративті матрицадағы конъюгацияланған таңбалар жағдайында (70) өрнек пайда болады:

$$\mathbf{H}_{\text{EVCM}} = \mathbf{A} \cdot [\text{vec}(\mathbf{A}_1) \dots \text{vec}(\mathbf{A}_a)] \quad (2.43)$$

## 2.9 EVCM матрицасын синтездеудің мысалдары конъюгацияланған таңбалармен белгілі кеңістік - уақыт кодтары үшін

Алынған әдісті белгілі Аламоти матрицасы үшін қолданамыз (1.7). Бұл код үшін қабылдағыш антенналардың саны  $M=1$ , таратушы антенналардың саны  $N=2$ , уақыт санауларының саны  $L=2$ , шығарылған таңбалардың саны  $Q=2$ . (2.41) сәйкес  $\mathbf{A}_q$  матрицаларын қалыптастырамыз.

$$\tilde{\mathbf{A}}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{A}}_2 = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

T матрицасын құрыңыз

$$T_{\text{Alamouti}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Аламоути коды үшін  $h$  арна моделі келесідей:  $H_{Alamouti} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \end{bmatrix}$ , онда

$$\Delta_{Alamouti} = 1 \otimes H_{Alamouti} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes H_{Alamouti} = \begin{bmatrix} H_{Alamouti} & 0 \\ 0 & H_{Alamouti} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Delta}_{Alamouti} = \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & \text{conj}(H) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{h}_1 & \hat{h}_2 \end{bmatrix}$$

$$EVCM_{Alamouti} = \tilde{\Delta}_{Alamouti} \cdot T_{Alamouti} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{h}_1 & \hat{h}_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ \hat{h}_2 & -\hat{h}_1 \end{bmatrix}$$

Осылайша, әзірленген аналитикалық әдіспен синтезделген (2.46) балама виртуалды арна матрицасы арна коэффициенттерінің матрицасына сәйкес келеді.

EVCM матрицасын (1.14) сигнал шоқжұлдызының айналуымен іздеуді көрсетеміз.

Төрт таратушы және төрт қабылдағыш антеннасы бар жүйе үшін біз келесі белгілерді қабылдаймыз: қабылдағыш антенналардың саны  $M=4$ , таратушы антенналар  $N=4$ , уақыт санағы  $L=4$ , шығарылған таңбалар саны  $Q=4$ .

(2.44) формулага сәйкес  $A_q$  матрицаларын қалыптастырамыз, содан кейін:

$$\tilde{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tilde{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & \xi & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \xi & 0 \end{bmatrix}, \tilde{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{A}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -\xi & 0 \\ 0 & \xi & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$T$  матрицасын құрыңыз:

$$T_{Rot} = [\text{vec}(\tilde{A}_1) \text{vec}(\tilde{A}_2) \text{vec}(\tilde{A}_3) \text{vec}(\tilde{A}_4)]$$



$$T_{Rot} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \xi & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \xi \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\xi \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \xi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{Rot} = 1 \otimes H = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \otimes H \begin{vmatrix} H & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H \end{vmatrix}$$

Ондығы матрица

$$H = \begin{vmatrix} h_{11} & h_{21} & h_{31} & h_{41} \\ h_{12} & h_{22} & h_{32} & h_{42} \\ h_{13} & h_{23} & h_{33} & h_{43} \\ h_{14} & h_{24} & h_{34} & h_{44} \end{vmatrix} 0 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Онда жазайық:

$$\tilde{\Delta}_{Rot} = \begin{pmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \text{conj}(\mathbf{H}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \text{conj}(\mathbf{H}) \end{pmatrix}$$

$$\tilde{\Delta}_{Rot} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{21} & h_{31} & h_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_{12} & h_{22} & h_{32} & h_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_{13} & h_{23} & h_{33} & h_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_{14} & h_{24} & h_{34} & h_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_{11} & h_{21} & h_{31} & h_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_{12} & h_{22} & h_{32} & h_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_{13} & h_{23} & h_{33} & h_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_{14} & h_{24} & h_{34} & h_{44} & \dot{h}_{11} & \dot{h}_{21} & \dot{h}_{31} & \dot{h}_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{h}_{12} & \dot{h}_{22} & \dot{h}_{32} & \dot{h}_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{h}_{13} & \dot{h}_{23} & \dot{h}_{33} & \dot{h}_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{h}_{14} & \dot{h}_{24} & \dot{h}_{34} & \dot{h}_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{h}_{11} & \dot{h}_{21} & \dot{h}_{31} & \dot{h}_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{h}_{12} & \dot{h}_{22} & \dot{h}_{32} & \dot{h}_{42} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{h}_{13} & \dot{h}_{23} & \dot{h}_{33} & \dot{h}_{43} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{h}_{14} & \dot{h}_{24} & \dot{h}_{34} & \dot{h}_{44} \end{pmatrix}$$

$$EVCM_{Rot} = \tilde{\Delta}_{Rot} \cdot T_{Rot} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{21} & h_{31} & h_{41} \\ h_{12} & h_{22} & h_{32} & h_{42} \\ h_{13} & h_{23} & h_{33} & h_{43} \\ h_{14} & h_{24} & h_{34} & h_{44} \\ h_{21} & h_{11}\xi & h_{41} & h_{31}\xi \\ h_{22} & h_{12}\xi & h_{42} & h_{32}\xi \\ h_{23} & h_{13}\xi & h_{43} & h_{33}\xi \\ h_{24} & h_{14}\xi & h_{44} & h_{34}\xi \\ h'_{31} & h'_{41}\xi & -h'_{11} & -h'_{21}\xi \\ h'_{32} & h'_{42}\xi & -h'_{12} & -h'_{22}\xi \\ h'_{33} & h'_{43}\xi & -h'_{13} & -h'_{23}\xi \\ h'_{34} & h'_{44}\xi & -h'_{14} & -h'_{24}\xi \\ h'_{41} & h'_{31} & -h'_{21} & -h'_{11} \\ h'_{42} & h'_{32} & -h'_{22} & -h'_{12} \\ h'_{43} & h'_{33} & -h'_{23} & -h'_{13} \\ h'_{44} & h'_{34} & -h'_{24} & -h'_{14} \end{pmatrix} \quad (2.44)$$

Әзірленген әдіс (2.43) арқылы алынған (2.44) нәтиже әрбір уақытша есептеу үшін әрбір антеннада қабылданатын сигнал үшін алынған нәтижеге сәйкес келеді.

### 3 Кеңістік - уақыт матрицаларының оңтайлылығының жаңа өлшемі

#### 3.1 Оңтайлы кодты құру мәселесін белгілеу

Оңтайлы кеңістік-уақыт кодтарын құру негізінде келесі талаптар жатыр [3]:

- MIMO байланыс жүйесінің жоғары спектрлік тиімділігін қамтамасыз ету;
- MIMO байланыс жүйесінің жоғары шу иммунитетін қамтамасыз ету;
- Демодуляция алгоритмінің практикалық іске асырылуы үшін қолайлы есептеу күрделілігі.

Оңтайлы кодтарға қойылатын бұл талаптар бір-біріне қайшы келеді, сондықтан белгілі бір жүйеде қолдануға жарамды квази-оңтайлы кеңістік-уақыт кодтарын синтездеу мәселесі өте өзекті. Бұл мәселені шешу максималды ықтималдылық критерийі бойынша оңтайлы демодуляторды пайдалану кезінде жоғары өлшемді MIMO жүйелері үшін кеңістік-уақыт кодының матрицасын табуға дейін азаяды [18]. [3] еңбектерінде көрсетілгендей, тек осындай демодулятор байланыс жүйесінің шуылға қарсы тұрақтылығын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Оңтайлы кеңістік-уақыт кодтарына қойылатын талаптарды келесідей тұжырымдауға болады [9]:

1. Кодтың кеңістік-уақыт матрицасы сигнал шоқжұлдызының еркін формасымен туылмауы керек.
2. Қуат излучаемые барлық передающими антенналары болжануда бірдей.
3. Антенналардың саны кодтың уақыт аралықтарының санына тең — кеңістік-уақыт коды толық жылдамдықта болады деп болжанады.

Квази-оптималды кодтың мысалы-алтын код [3] екі қабылдағышы бар MIMO жүйелері үшін және кеңістік-уақыт матрицасы бар таратушы антенналар (12). Бұл код толық жылдамдықты және жоғары спектрлік тиімділікке ие, екі таратушы антеннасы бар BLAST жүйесінің спектрлік тиімділігіне сәйкес келеді және оңтайлы кодқа қойылатын барлық талаптарға жауап береді.

#### 3.2 Кеңістік-уақыт кодтарының генеративті матрицаларының қасиеттері

3.1-параграфта көрсетілген оңтайлы қасиеттері бар кеңістік-уақыттық кодтардың бірі-Аламоти схемасы үшін қолданылатын (1.7) матрицасы бар код[21]. Аламоти схемасы (1.17) үшін балама виртуалды арна матрицасының қасиетін қарастырыңыз

$$EVCM_{Alamouti} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h'_{21} & h'_{11} \end{bmatrix};$$

$$EVCM'_{Alamouti} EVCM_{Alamouti} = EVCM_{Alamouti} EVCM'_{Alamouti} = h^2 I, \quad (3.1)$$

мұндағы  $I$  - өлшемнің бірлік матрицасы  $2 \times 2$ , а  $h^2 = |h_{11}|^2 + |h_{21}|^2$ . Бұл қасиет аламоути генеративті матрицасының ортогоналдылығымен байланысты (7).

Осылайша, ортогональды емес матрицалар үшін (3.1) өрнек келесі түрге ие болады  $EVCM \cdot EVCM' = \sum_{j=1}^M |h_j|^2 J$ , онда  $J$  - негізгі диагоналі бірліктермен толтырылған сирек матрица, кем дегенде  $M^2/2$  қалған элементтер нөлдермен толтырылған, ал қалған элементтердің модульдері  $+1$  аспайды.

Осылайша, жұмыс неғұрлым жақын болса  $EVCM' \cdot EVCM$  диагональды матрицаға, генеративті матрицаның қасиеттері толық жылдамдықты ортогональды кодтың қасиеттеріне жақынырақ [21].

АЛАМОУТИ АВВА (1.19) кодына, Аламоутидің кеңейтілген кодына (1.22) және Хадамара матрицасын (1.29) қолдана отырып, белгілі үлкен өлшемді код конструкцияларына арналған (3.1) өнімнің сипаттамаларын қарастырыңыз.

АВВА (1.19) генеративті матрицасы үшін біз өнімді жазамыз:

$$G_{ABBA} = S'_{ABBA} S_{ABBA} = \theta^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & X_{ABBA} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & X_{ABBA} \\ X_{ABBA} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & X_{ABBA} & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

Онда

$$X_{ABBA} = \frac{2\text{Re}(\theta_1\theta_3 + \theta_2\theta_4)}{\theta^2}, \theta^2 = |\theta_1|^2 + |\theta_2|^2 + |\theta_3|^2 + |\theta_4|^2 \quad (3.2)$$

Аламотидің кеңейтілген коды үшін (1.22) жазыңыз:

$$G_{EA} = S'_{EA} S_{EA} = \theta^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{EA} \\ 0 & 1 & -X_{EA} & 0 \\ 0 & -X_{EA} & 1 & 0 \\ X_{EA} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Онда

$$X_{EA} = \frac{2\text{Re}(\theta_1\theta_4 + \theta_2\theta_3)}{\theta^2} \quad (3.3)$$

Хадамара матрицасын қолданатын Код үшін (1.24):

$$G_{HAD} = S'_{HAD} S_{HAD} = 2 \cdot \begin{bmatrix} X_{HAD} & 0 \\ 0 & X_{HAD} \end{bmatrix},$$

Онда

$$X_{HAD} = |\theta_1|^2 + |\theta_2|^2. \quad (3.4)$$

Шамалардың мәндері (3.1), (3.4) алынған матрицаның ортогональды толық жылдамдық кодтарының қасиеттері бар матрицаларға жақындығын сипаттаңыз. Шамалардың мәндерін талдау(3.5), (85), (86) бір мәнді критерий құруға әкелмейді, алайда кеңістік - уақыт кодтарына тағы бір талап қалыптастыра алады [11].

### 3.3 Кеңістік-уақыт кодтарын синтездеудің жаңа өлшемін қалыптастыру міндетін белгілеу

Кеңістіктік-уақыттық кодтарды синтездеудің аналитикалық өлшемін қалыптастыру маңызды міндет болып табылады, өйткені ол оптимизмге жету үшін генеративті матрицаның ішкі құрылымын басқаруға мүмкіндік береді. Белгілі дәреже (1.32), (1.33) және детерминантты (1.34) критерийлер генераторлық матрицаның үлкен өлшемдерінде оларды пайдалану мүмкін еместігіне, сондай-ақ оларды шығару кезінде қолданылған болжамдарға байланысты синтез мәселесі үшін кең қолданылмады. Атап айтқанда, детерминантты критерийдің тұжырымы оңтайлы демодуляторды қолдануға негізделген, бұл нақты жағдайда критерийді қолдануға әсер етеді.

Жасалған оптималдылық критерийі қасиеттерді, кодтың кеңістік-уақыт матрицасын, арна моделін және пайдаланылған демодуляторды ескеруі керек. Оңтайлы кодтарды синтездеудің аналитикалық әдістерін іздеу кеңістіктік уақытты кодтаудың теориялық негіздерін дамытудың органикалық әдісі болып табылады және кодтың қасиеттерін шуылға қарсы сипаттамамен байланыстыру арқылы басқару тәсілдерін табуға мүмкіндік береді [21].

### 3.4 Кеңістік-уақыт кодтарын синтездеу критерийі

(2.28) өрнегімен сипатталатын виртуалды арналардың эквивалентті матрицасын қолдана отырып, жүйені басқару моделін қарастырыңыз. EVCM (2.35) матрицасы үшін алынған аналитикалық өрнек матрица түрінің байланыс арнасының қасиеттеріне де, кеңістік - уақыт кодының қасиеттеріне де тәуелділігін көрсетеді [3, 16, 22].

Сигналды демодуляциялаудың ең көп қолданылатын әдісі-RMS қатесінің минималды әдісі[3, 10, 16, 22]. Бақылау моделі үшін демодулятордың шығысындағы ақпараттық таңбалар векторын бағалау үшін өрнек жазамыз (63):

$$\hat{\theta} = (H'_{EVCM}H_{EVCM} + 2\sigma_{\eta}^2 1)^{-1} \cdot H'_{EVCM} \cdot Y \quad (3.5)$$

мұнда қабылданған шартты белгілер қолданылады(1.3), (1.32), (2.29).

Бұл жағдайда демодуляция сапасының критерий  $\theta_i$  демодуляция

қателерінің корреляциялық матрицасының диагоналінде орналасқан  $\theta$  векторының  $I$ -нің әр символы үшін демодуляция қателіктерінің дисперсиясы болып табылады  $R_{MMSE}$ .

$$R_{MMSE} = 2\sigma^2 \cdot (H'_{EVCM}H_{EVCM} + 2\sigma^2 \cdot 1)^{-1} \quad (3.6)$$

Вектор компоненттері арасында демодуляция қатесінің максималды дисперсиясын критерий ретінде таңдаймыз  $\theta$ . Бұл таңдау қатенің соңғы ықтималдығына вектордың  $\theta$  компонентінің дисперсиясының ең үлкен әсер ететіндігіне байланысты, ол максималды [3]. Демодуляция сапасының арна моделіне тәуелділігін анықтайтын  $f$  сандық функциясын енгіземіз  $\mathbf{H}_{EVCM}$  және пайдаланылатын  $r$  кеңістік-уақыт матрицасының өзгермелі параметр векторы

$$\varphi(\mathbf{R}_{MMSE}) = \max(\text{diag}\mathbf{R}_{MMSE}) = f(\mathbf{H}_{EVCM}, \mathbf{r}) \quad (3.7)$$

(3.7) функциясы (3.6) сілтеме каналына байланысты, оның қасиеттері  $H_{EVCM}$  (2.35) матрицасы мен  $r$  векторының ішінде анықталады, ол код матрицасының қасиеттерімен анықталады. Функцияның (3.7) кеңістік-уақыт кодының құрылымына тәуелділігін анықтау үшін функция түрін алу арқылы арна матрицасы бойынша орташа функцияны орындау қажет:

$$\psi(r) = \int_{H_{EVCM}} f(H_{EVCM}, r) \cdot \rho(H_{EVCM}) \cdot dH_{EVCM},$$

мұндағы орташалау (2.35) ескере отырып,  $h$  арнасының матрицасын кездейсоқ бөлу бойынша жүргізіледі.,  $\rho(\mathbf{H}_{EVCM})$  – таралу тығыздығы  $\mathbf{H}_{EVCM}$ .

Орташа функцияны вектормен азайту керек

$$\psi(r) \quad (3.8)$$

вектордың оңтайлы мәнін табу үшін параметрлер векторын азайту керек параметрлері  $r$ .

$$\min_r(\psi(r)) \quad (3.9)$$

(3.8), (3.9) өрнектері кеңістік-уақыт кодтарының генеративті матрицаларын оңтайландыру критерийлерін анықтайды [19]. Орташа алғанда (3.8) арна матрицасының элементтері арасындағы корреляцияның болуы ескеріледі.

Осы алгоритмді (3.8), (3.9) белгілі матрицалар үшін (1.12) және (1.14), сондай-ақ жаңадан синтезделген матрицалар үшін (2.1) және (2.3) қолдануды қарастырыңыз.

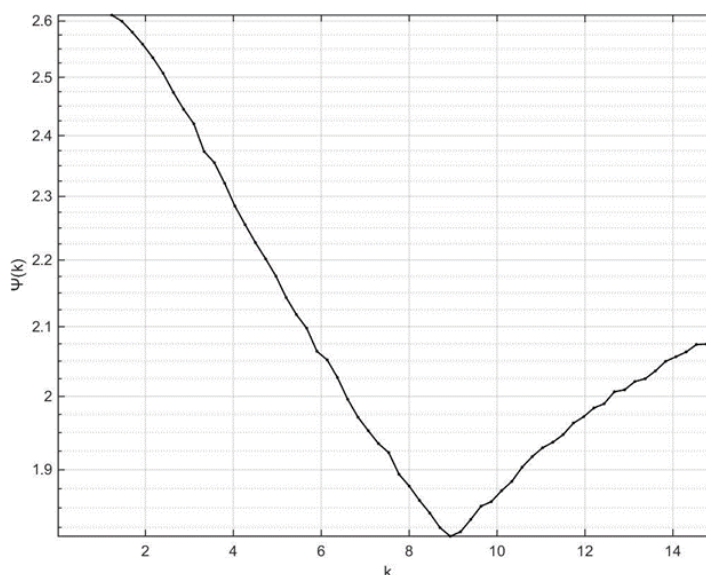
### 3.5 Голден өлшемнің 2x2 кеңістік-уақыт коды үшін критерийді қолдану

Ұсынылған критерий (3.8), (3.9) Голден кеңістік - уақыт коды үшін қолданылады (1.12). Интегралды (3.8) аналитикалық әдістермен есептеу мүмкін емес. Ол үшін модельдеу қолданылады. Өзгеретін параметр-өрнектегі скаляр  $k$   $r = \frac{-1+\sqrt{k}}{2}$  Голден коды (1.12). Модельдеу шарттары 3.1-кестеде келтірілген.

Кесте 3.1 - Модельдеу шарттары

Пайдаланылатын кеңістік-уақыт матрицалары және олардың өлшемдері	Өлшем матрицасы (1.12) 2 x 2.
Арнадағы мұздату моделі	Кронеккердің реле үзілістерімен және 0,5 берілісіндегі корреляция коэффициентімен және коэффициентімен мұздату моделі қабылдаудағы корреляциялар 0,5; релеевским замираниями жоқ корреляция беру және қабылдау
Эксперименттер саны	1000000

Жүргізілген модельдеу нәтижелері 3.1-суретте көрсетілген.



3.1- сурет - Голден кодқа тәуелділік  $\psi(k)$ .

R оңтайлы мәні келесі өрнекпен анықталады:

$$r = \frac{-1 + \sqrt{9}}{2} = 1$$

Голден (1.12) стандартты Код үшін R параметрінің мәні мәнмен анықталады:

$$r = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}$$

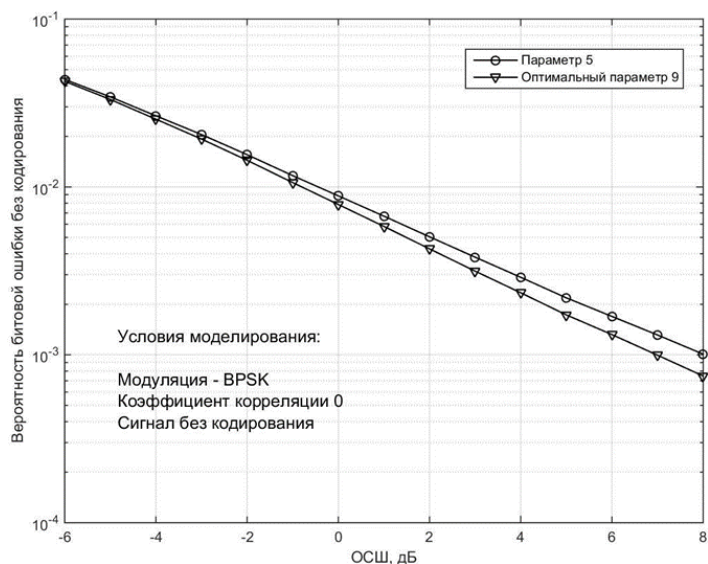
Салыстырайық сипаттамалары сыртқы әсерге тұрақтылығы кеңістік-уақытша код Голден с параметрі  $r = \frac{-1 + \sqrt{9}}{2}$  Өлшем (3.8), (3.9) және стандартты параметр арқылы алынған  $r = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}$ .

Модельдеу келесі жағдайларда жүргізілді (3.2-кестені қараңыз).

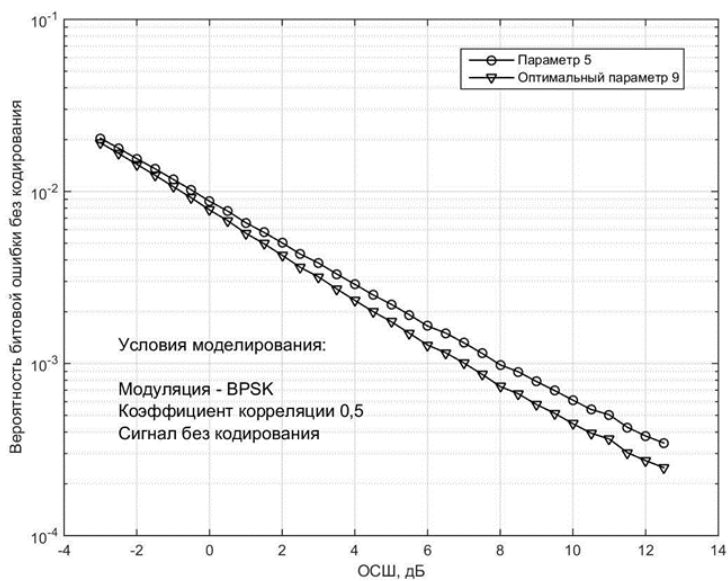
Кесте 3.2 - Модельдеу шарттары

Пайдаланылатын кеңістік-уақыт матрицалары және олардың өлшемдері	Өлшем матрицасы (1.12) 2 кезек x2 r параметрінің мәндері: $r = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}$ $r = \frac{-1 + \sqrt{9}}{2}$
Арнадағы мұздату моделі	Кронеккердің замирания моделі, реле үзілістерімен және 0,5 берілістегі корреляция коэффициентімен және 0,5 қабылдаудағы корреляция коэффициентімен; реле үзілістерімен, берілістегі және қабылдаудағы корреляциясыз
Модуляция түрі	BPSK, QPSK
Демодуляция әдісі	MMSE
Кодтау әдісі	Шуылға төзімді кодтау жоқ

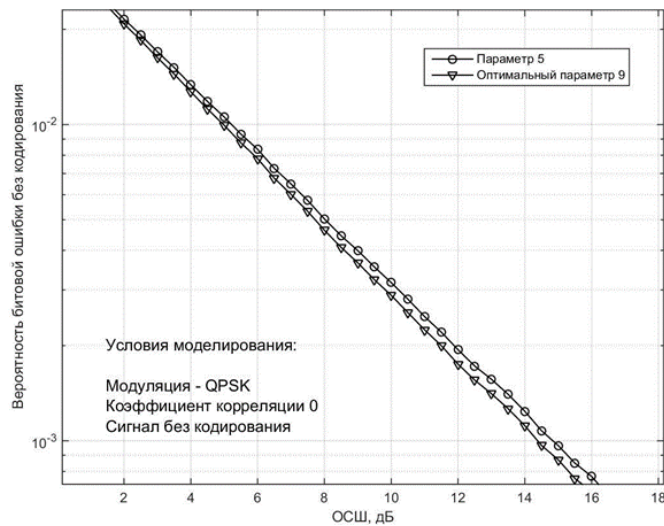




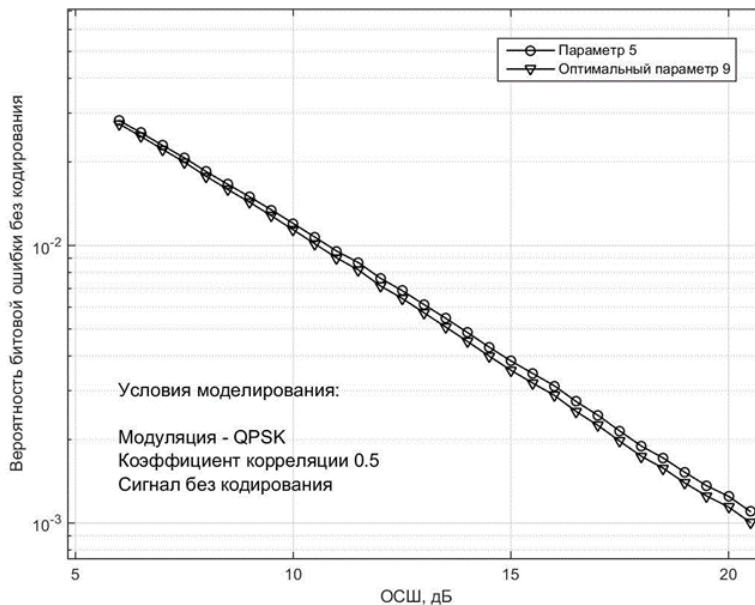
3.2- сурет - Голден кодты әртүрлі параметрлермен қолданатын жүйелердің шуылға төзімділігін салыстыру. BPSK модуляциясы, кодтау жоқ, арна түзетілмеген.



3.3- сурет - Голден кодты әртүрлі параметрлермен қолданатын жүйелердің шуылға төзімділігін салыстыру. BPSK модуляциясы, кодтау жоқ, арна корреляцияланған.



3.4- сурет - Голден кодты әртүрлі параметрлермен қолданатын жүйелердің шуылға төзімділігін салыстыру К. QPSK модуляциясы, кодтау жоқ, арна түзетілмеген.



3.5- сурет - Голден кодты әртүрлі параметрлермен қолданатын жүйелердің шуылға төзімділігін салыстыру К. QPSK модуляциясы, кодтау жоқ, арна корреляцияланған

Модельдеу кезінде алынған нәтижелер (3.2, 3.3, 3.4, 3.5-суреттерді қараңыз) (3.8), (3.9) критерий арқылы алынған  $r$  параметрінің оңтайлы мәнін пайдалану кезінде энергияның айтарлықтай пайдасын көрсетеді.

Жүйені кодтаусыз пайдаланған жағдайда модуляция түріне және байланыс арнасында кеңістіктік корреляцияның болуына байланысты энергия ұтысы 0,1 – 1 дБ құрайды. Модельдеу нәтижелері 3.3-кестеде келтірілген.

Кесте 3.3 - Модельдеу нәтижелері

Модельдеу:	Модуляция түрі	Беру/қабылдау корреляция коэффициенті	Кодтау	Энергетикалық ұтыс, дБ
суретте 8	BPSK	0/0	жоқ	0,25
суретте 9	BPSK	0,5/0,5	жоқ	1,0
суретте 10	QPSK	0/0	жоқ	0,1
суретте 11	QPSK	0,5/0,5	жоқ	0,25

Ұсынылған критерийді пайдалану (3.8), (3.9) кеңістік-уақыт матрицасының параметрін оңтайлы таңдау арқылы қосымша энергия пайдасын алуға мүмкіндік береді.

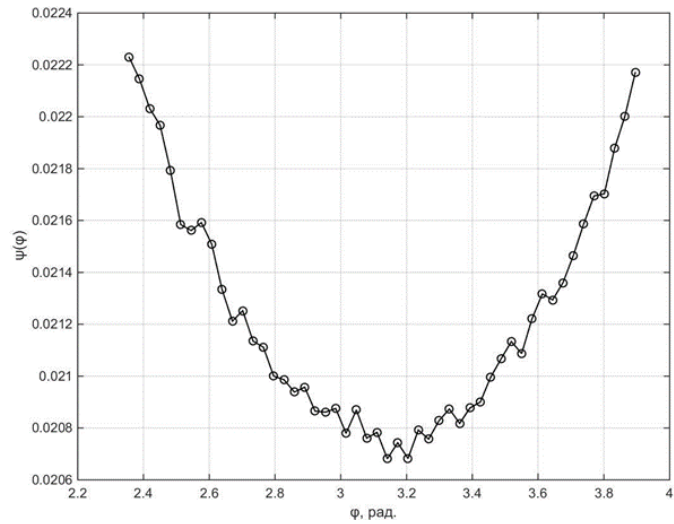
### 3.6 Өлшемді 4x4 сигналдық шоқжұлдызының айналуымен кеңістік-уақыт коды үшін критерийді қолдану

Сигнал шоқжұлдызының айналуымен кеңістік - уақыт коды үшін (3.8), (3.9) ұсынылған критерийді қолданамыз (14). (3.8), (3.9) критерийі бойынша оңтайландыру, 3.5 параграфындағыдай, статистикалық модельдеу арқылы жүзеге асырылады. Айнымалы параметр-бұл сигнал шоқжұлдызының бұрылысы бар код графигі (1.14), параметр  $\xi = e^{j\phi}$  үшін өрнектегі  $\phi$  бұрышы. Модельдеу шарттары 3.14-кестеде келтірілген.

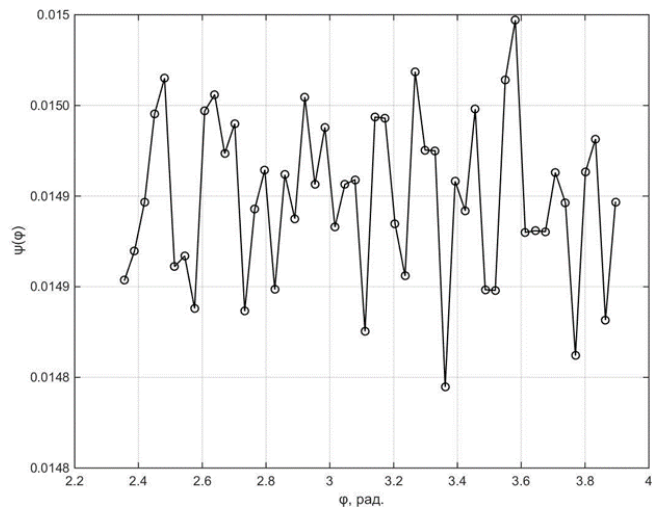
Кесте 3.4 - Модельдеу шарттары

Пайдаланылатын кеңістік-уақыт матрицалары және олардың өлшемдері	Өлшем матрицасы (1.14) 4X4 .
Арнадағы мұздату моделі	Кронеккердің замирания моделі, реле үзілістерімен және 0,7 берілістегі корреляция коэффициентімен және 0,7 қабылдаудағы корреляция коэффициентімен; реле үзілістерімен, берілістегі және қабылдаудағы корреляциясыз
Эксперименттер саны	1000000

Жүргізілген Имитациялық модельдеу нәтижелері 3.5, 3.6-суреттерде ұсынылған.



3.6- сурет - Сигнал шоқжұлдызының бұрылысы бар Код үшін  $\psi(\varphi)$  тәуелділігі . Арна корреляцияланған.



3.7- сурет - Сигнал шоқжұлдызының бұрылысы бар Код үшін  $\psi(\varphi)$  тәуелділігі. Арна түзетілмеген.

Модельдеу нәтижелері с параметрінің оңтайлы мәнін анықтайды . 3.7- суретте көрсетілген график көрсеткендей, генеративті матрица  $\varphi$  параметріне сезімтал емес. Демодуляция қатесінің дисперсиясының минимумы қалыптаспайды және модельдеу кезіндегі эксперименттер санының соңғы мәніне байланысты кездейсоқ шама болып табылады. Ғарыштық уақыттың шуылға қарсы иммунитетінің сипаттамаларын салыстырайық стандартты параметрі бар сигнал шоқжұлдызының бұрылысы бар код (1.14)  $\varphi = \pi/2$  және критерий арқылы алынған параметр(3.8), (3.9)

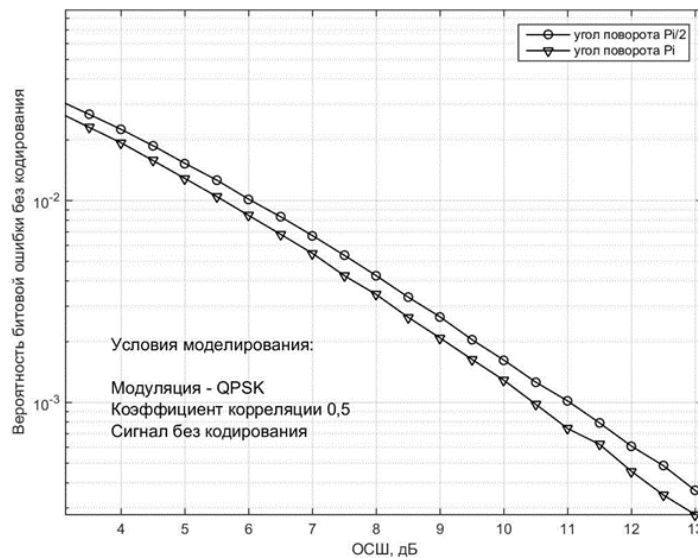
$$\varphi = \pi .$$

Модельдеу келесі жағдайларда жүргізілді (3.5-кестені қараңыз).

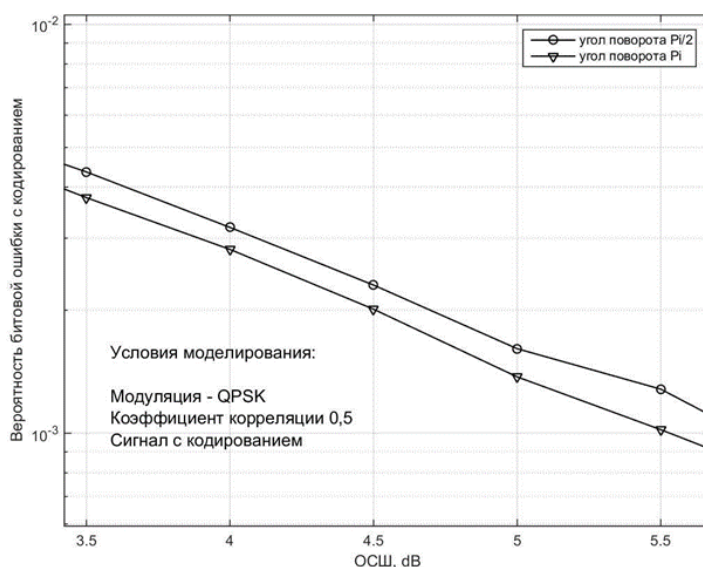
Кесте 3.5 - Модельдеу шарттары

Пайдаланылатын кеңістік-уақыт матрицалары және олардың өлшемдері	(1.14) Өлшем матрицасы 4X4 Сигналдық шоқжұлдыздың бұрылысы, параметр мәні
Арнадағы мұздату моделі	Кронеккердің реле үзілістерімен және 0,5 берілістегі корреляция коэффициентімен және қабылдаудағы корреляция коэффициентімен, 0,5
Модуляция түрі	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Демодуляция әдісі	MMSE
Кодтау әдісі	Кодтаусыз және параметрлермен турбокодты пайдалану: кодтау жылдамдығы 1/2, код шектеуінің ұзындығы 16

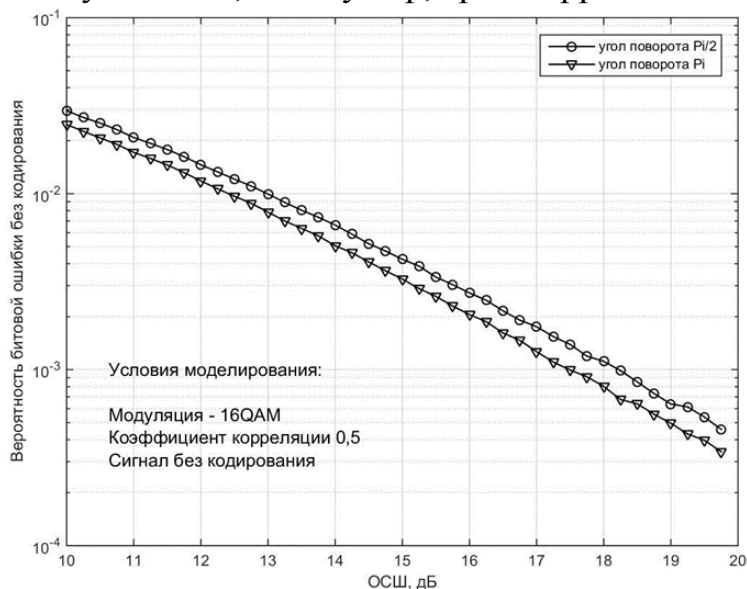
Салыстырмалы модельдеу кезінде алынған нәтижелер суретте көрсетілген 3.8-3.14 аралығындағы суреттер модуляцияның әртүрлі әдістері үшін, кодтаусыз және кодтаусыз жағдайлар үшін.



3.8- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айналу бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айналуымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . QPSK модуляциясы, кодтау жоқ, арна корреляцияланған.

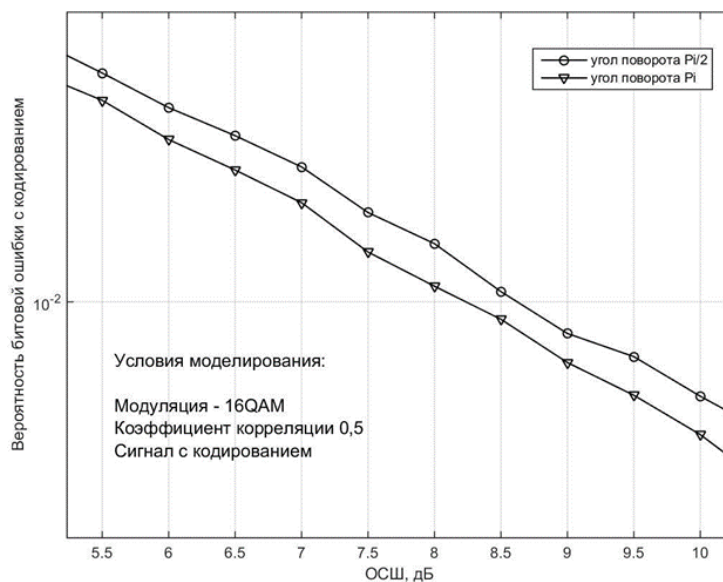


3.9- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айналудың бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айналудымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . QPSK модуляциясы, кодтау бар, арна корреляцияланған.

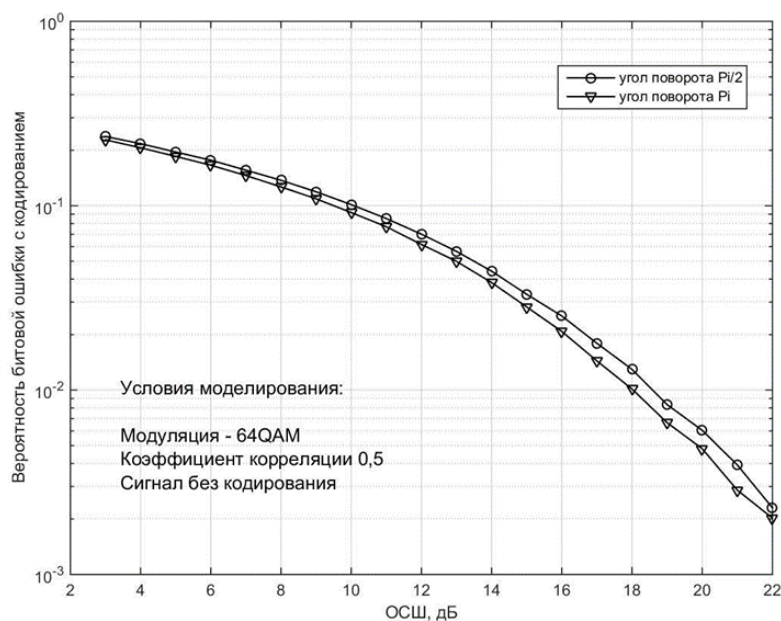


3.10- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айналудың бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айналудымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . Модуляция 16-QAM, кодтау жоқ, арна корреляцияланған.

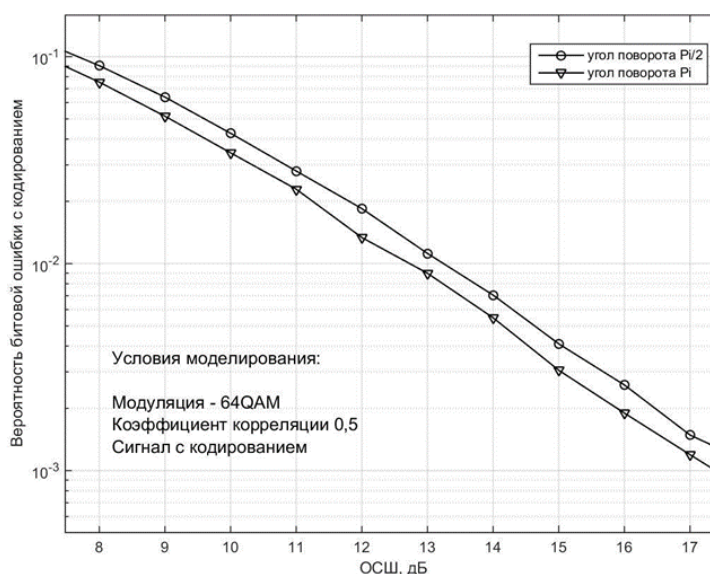




3.11- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айналуды бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айналудымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . Модуляция 16-QAM, кодтау бар, арна корреляцияланған.



3.12- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айналуды бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айналудымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . 64-QAM модуляциясы, кодтау жоқ, арна корреляцияланған.



3.13- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айналу бұрыштарында сигнал шокжұлдызының айналуымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . 64-QAM модуляциясы, кодтау бар, арна корреляцияланған.

Модельдеу кезінде алынған нәтижелер (суреттер 14, 15, 16, 17, 18, 19), осы параметрдің стандартты мәні  $\varphi = \pi/2$ -ге қарағанда генеративті матрица үшін (14)  $\varphi = \pi$  параметрінің оңтайлы мәнін қолданған кезде айтарлықтай энергия пайдасын көрсетіңіз. Жүйені кодтаусыз пайдаланған жағдайда энергия ұтысы 0,5 дБ құрайды. Кодталған жүйе жағдайында 0,5-0,8 дБ. Модельдеу нәтижелері 3.6-кестеде келтірілген.

Кесте 3.6 - Модельдеу нәтижелері

Модельдеу:	Модуляция түрі	Беру/қабылдау корреляция коэффициенті	Кодтау	Энергетикалық ұтыс, дБ
суретте 3.14	QPSK	0,5/0,5	жоқ	0,5
суретте 3.15	QPSK	0,5/0,5	бар	0,5
суретте 3.16	16-QAM	0,5/0,5	жоқ	0,5
суретте 3.17	16-QAM	0,5/0,5	бар	0,5
суретте 3.18	64-QAM	0,5/0,5	жоқ	0,7
суретте 3.19	64-QAM	0,5/0,5	бар	0,8

Ұсынылған критерийді пайдалану (3.8), (3.9) кеңістік-уақыт матрицасының параметрін оңтайлы таңдау арқылы қосымша энергия пайдасын алуға мүмкіндік береді.



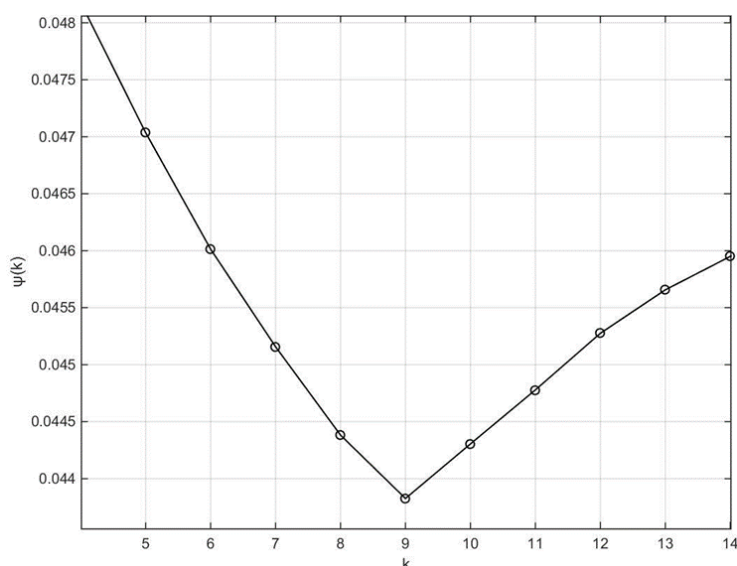
### 3.7 Голден өлшемді 4x2 өзгертілген кеңістік-уақыт коды үшін критерийді қолдану

Ұсынылған критерий (3.8), (3.9) модификацияланған Голден түріндегі кеңістік - уақыт коды үшін (2.1) МІМО байланыс жүйесі үшін өлшемі 4x4 Оңтайландырылған параметр-өрнектегі скаляр k параметр үшін  $r = \frac{-1+\sqrt{k}}{2}$  код өзгертілген Голден (2.1). Модельдеу шарттары 3.7-кестеде келтірілген.

Кесте 3.7 - Модельдеу шарттары

Пайдаланылатын кеңістік-уақыт матрицалары және олардың өлшемдері	Өлшем матрицасы (37) 4x 2.
Арнадағы мұздату моделі	Кронеккердің замирения моделі, реле үзілістерімен және 0,5 берілістегі корреляция коэффициентімен және 0,5 қабылдаудағы корреляция коэффициентімен; реле үзілістерімен, берілістегі және қабылдаудағы корреляциясыз
Эксперименттер саны	1000000

Жүргізілген модельдеу нәтижелері 3.14-суретте көрсетілген.



3.14- сурет - Кодқа тәуелділік  $\psi(k)$  өзгертілген Голден

R оңтайлы мәні келесі өрнекпен анықталады:

$$r = \frac{-1 + \sqrt{9}}{2} = 1$$

Өзгертілген (2.2) Голден коды үшін R параметрінің стандартты мәні мәнмен анықталады:

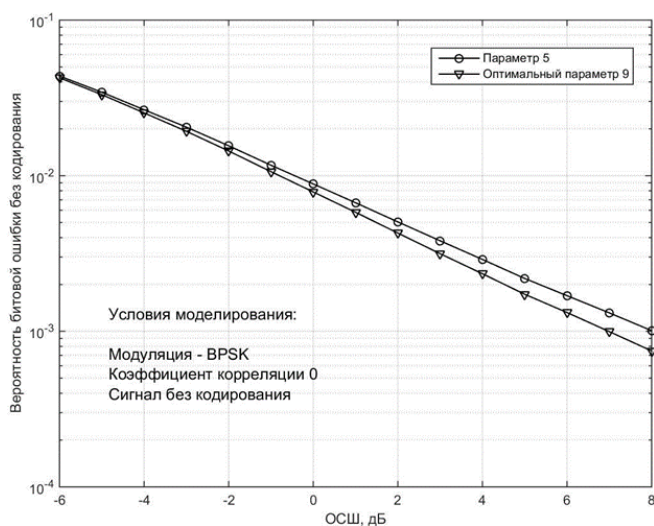
$$r = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}$$

Салыстырайық сипаттамалары сыртқы әсерге тұрақтылығы кеңістік-уақытша код Голден параметрі  $r = \frac{-1 + \sqrt{9}}{2}$  Өлшем (3.8), (3.9) және стандартты параметр арқылы алынған  $r = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}$ .

Модельдеу келесі жағдайларда жүргізілді (3.8-кестені қараңыз).

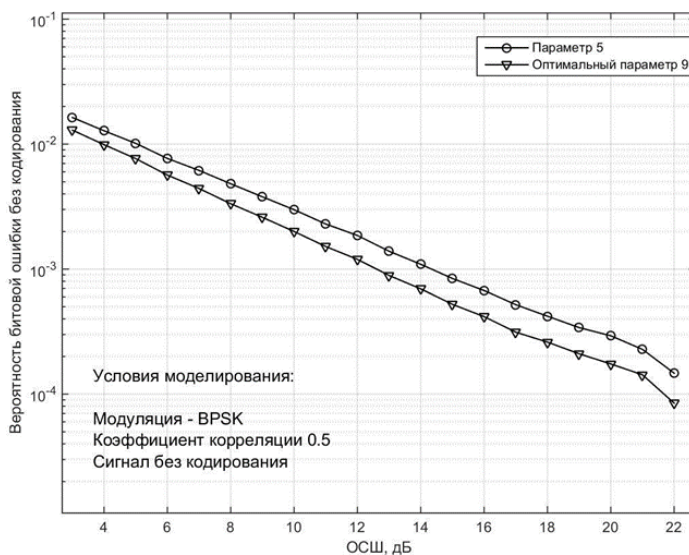
Кесте 3.8 - Модельдеу шарттары

Кеңістіктік уақыт матрицалары және олардың өлшемдері -	өлшемінің матрицасы (37) параметр мәндерімен $4 \times 2$ $r: r = \frac{-1 + \sqrt{9}}{2}$ $r = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}$
Арнадағы мұздату моделі	Кронеккердің замирания моделі, реле үзілістерімен және 0,5 берілістегі корреляция коэффициентімен және 0,5 қабылдаудағы корреляция коэффициентімен; реле үзілістерімен, берілістегі және қабылдаудағы корреляциясыз
Модуляция түрі	BPSK, QPSK
Демодуляция әдісі	MMSE
Кодтау әдісі	Шуылға төзімді кодтау жоқ



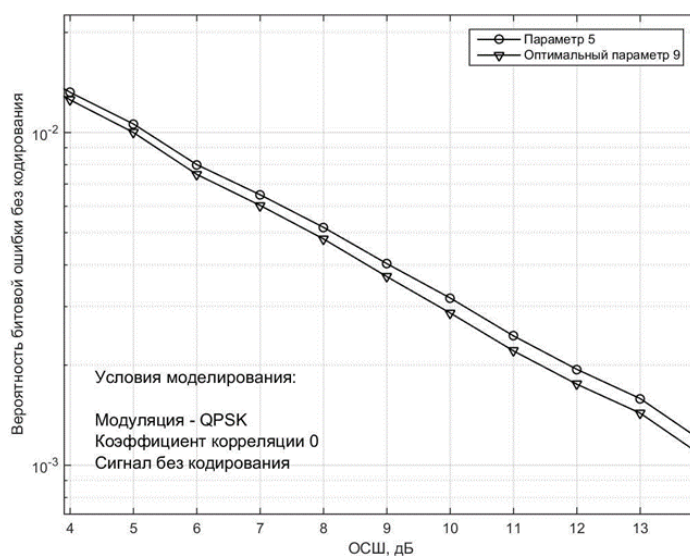
3.15- сурет - Өзгертілген Алтын кодын қолданатын жүйелердің шуылға қарсы иммунитетін салыстыру, өлшемі 4 x2 әр түрлі параметрлермен к.

BPSK модуляциясы, кодтау жоқ, арна түзетілмеген



3.16- сурет - Өзгертілген Алтын кодын қолданатын жүйелердің шуылға қарсы иммунитетін салыстыру, өлшемі 4 x2 әр түрлі параметрлермен к.

BPSK модуляциясы, кодтау жоқ, арна корреляцияланған.



3.17- сурет - Өзгертілген Алтын кодын қолданатын жүйелердің шуылға қарсы иммунитетін салыстыру, өлшемі 4 x2 әр түрлі параметрлермен к.

QPSK модуляциясы, кодтау жоқ, арна түзетілмеген.

Модельдеу кезінде алынған нәтижелер (3.15, 3.16, 3.17-суреттерді қараңыз) (3.8), (3.9) критерий арқылы алынған  $r$  параметрінің оңтайлы мәнін пайдалану кезінде энергияның айтарлықтай пайдасын көрсетеді.

Жүйені кодтаусыз пайдаланған жағдайда модуляция түріне және байланыс арнасында кеңістіктік корреляцияның болуына байланысты энергия ұтысы 0,5 – 1,0 дБ құрайды. Модельдеу нәтижелері 3.9-кестеде келтірілген.

Кесте 3.9 - Модельдеу нәтижелері

Модельдеу:	Модуляция түрі	Беру/қабылдау корреляция коэффициенті	Кодтау	Энергетикалық ұтыс, дБ
Сурет 3.15	BPSK	0/0	жоқ	0,5
Сурет 3.16	BPSK	0,5/0,5	бар	1,0
Сурет 3.17	QPSK	0/0	жоқ	0,5

Ұсынылған критерийді (88), (89) пайдалану кеңістік-уақыт матрицасының параметрін оңтайлы таңдау арқылы қосымша энергия пайдасын алуға мүмкіндік береді.

### 3.8 8x4 өлшемді сигнал шоқжұлдызының айналуымен модификацияланған кеңістік-уақыт коды үшін критерийді қолдану

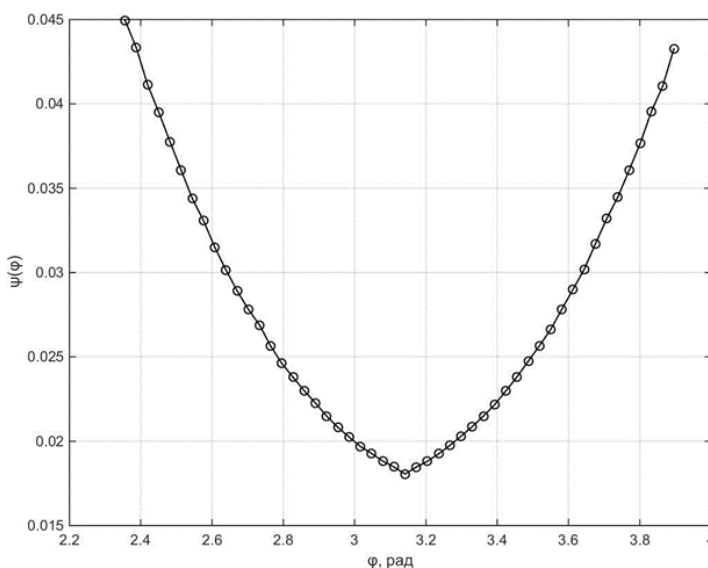
Сигнал шоқжұлдызының айналуымен кеңістік - уақыт коды үшін (3.8), (3.9) ұсынылған критерийді қолданамыз (2.7). (3.8), (3.9) критерийі бойынша оңтайландыру, 3.5 параграфындағыдай, статистикалық модельдеу арқылы

жүзеге асырылады. Айнымалы параметр-параметр үшін өрнектегі  $\varphi$  бұрышы  $\xi = e^{j\varphi}$  сигнал шоқжұлдызының айналуымен код (2.7). Модельдеу шарттары 12-кестеде келтірілген.

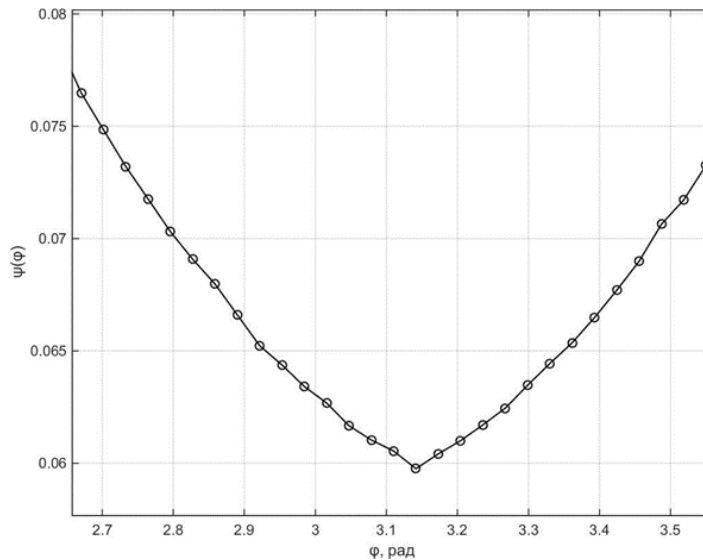
Кесте 12. Модельдеу шарттары

Пайдаланылатын кеңістік-уақыт матрицалары және олардың өлшемдері	Өлшем матрицасы (2.7) $8 \times 4$ .
Арнадағы мұздату моделі	Кронеккердің замирания моделі, реле үзілістерімен және 0,7 берілістегі корреляция коэффициентімен және 0,7 қабылдаудағы корреляция коэффициентімен; реле үзілістерімен, берілістегі және қабылдаудағы корреляциясыз
Эксперименттер саны	1000000

Жүргізілген Имитациялық модельдеу нәтижелері 3.18, 3.19 - суреттерде ұсынылған.



3.18- сурет - Сигнал шоқжұлдызының бұрылысы бар Код үшін  $\psi(\varphi)$  тәуелділігі. Арна түзетілмеген.



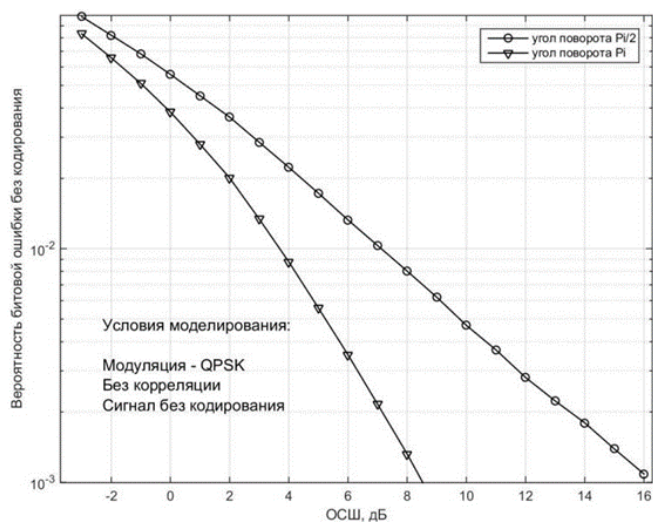
3.19- сурет - Сигнал шоқжұлдызының бұрылысы бар Код үшін  $\psi(\varphi)$  тәуелділігі. Арна корреляцияланған.

Модельдеу нәтижелері параметрдің оңтайлы мәнін анықтайды  $\varphi = \pi$ . Ғарыштық уақыт кодының шуылға қарсы иммунитетінің сипаттамаларын сигнал шоқжұлдызының айналуымен (2.7) стандартты параметрмен  $\varphi = \pi/2$  және (3.8), (3.9) критерийі арқылы алынған параметрмен анықталады  $\varphi = \pi$ . Модельдеу келесі жағдайларда жүргізілді (3.11 -кестені қараңыз).

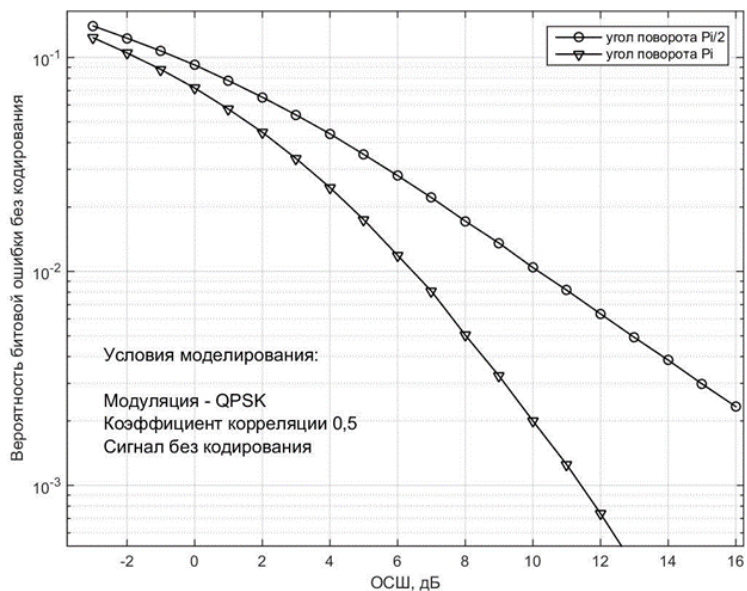
Кесте 3.11 - Модельдеу шарттары

Пайдаланылатын кеңістік-уақыт матрицалары және олардың өлшемдері	Сигнал шоқжұлдызының айналу өлшемі (41) $8 \times 4$ с матрицасы, параметр мәні $\xi = e^{j\pi/2}$ және $\xi = e^{j\pi}$ .
Арнадағы мұздату моделі	Кронеккердің замирания моделі, реле үзілістерімен және 0,5 берілісіндегі корреляция коэффициентімен және 0,5 қабылдаудағы корреляция коэффициентімен
Модуляция түрі	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Демодуляция әдісі	MMSE
Кодтау әдісі	Кодтаусыз және параметрлермен турбо-кодты пайдалану: кодтау жылдамдығы 1/2, код шектеуінің ұзындығы 16

Модельдеу нәтижелері суретте көрсетілген 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.28, 3.29, 3.30.

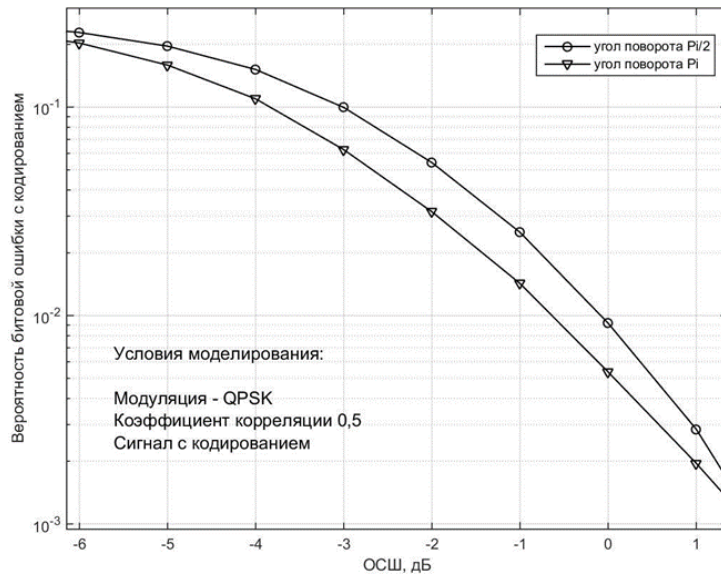


3.20- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айналудың бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айалуымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . QPSK модуляциясы, кодтау жоқ, арна түзетілмеген.

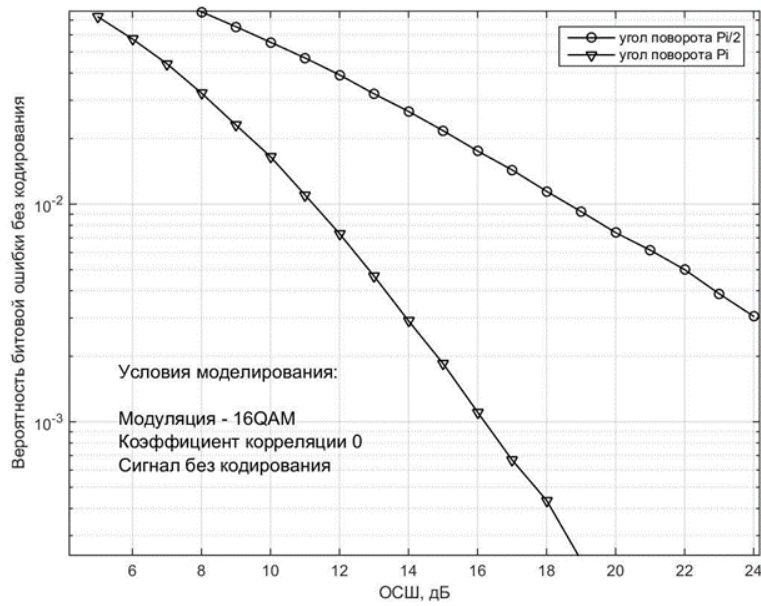


3.21- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айналудың бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айалуымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . QPSK модуляциясы, кодтау жоқ, арна корреляцияланған.



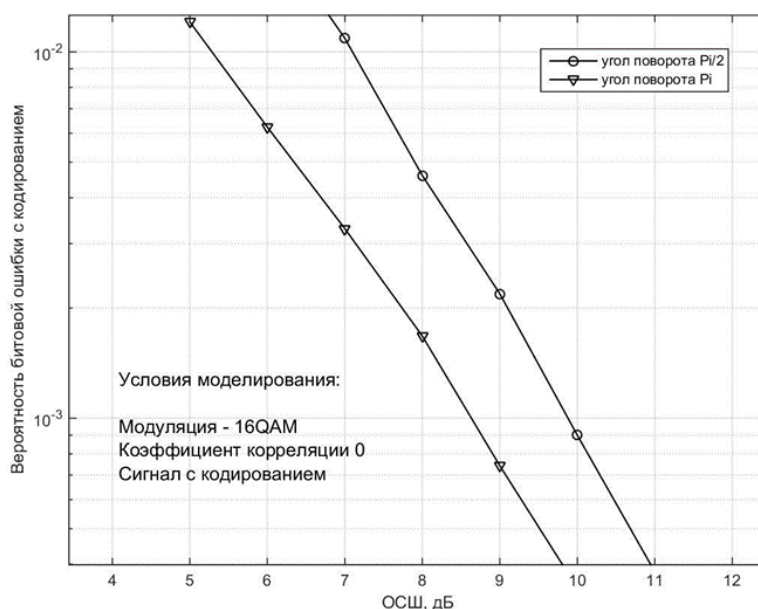


3.22- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айналудың бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айналудымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . QPSK модуляциясы, кодтау бар, арна корреляцияланған

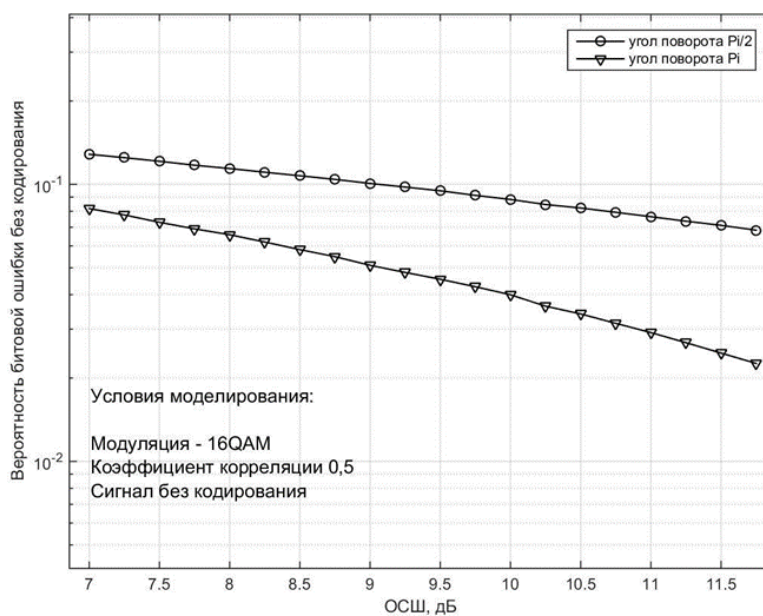


3.23- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айналудың бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айналудымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . Модуляция 16-QAM, кодтау жоқ, арна түзетілмеген.

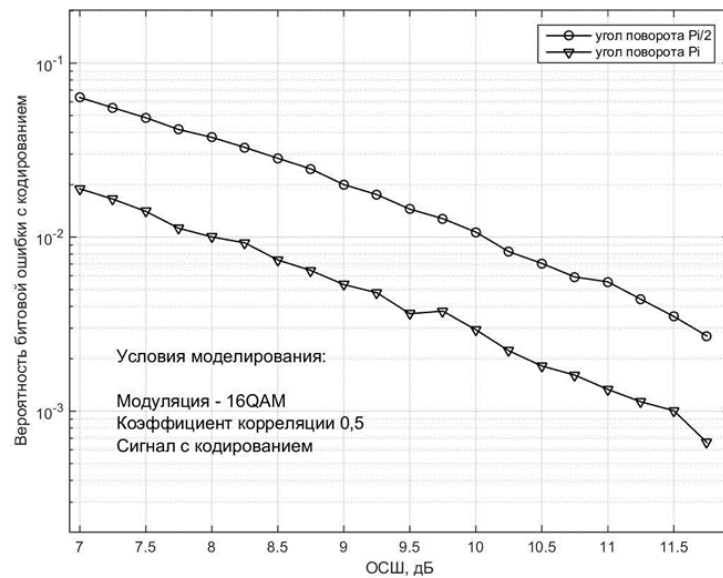




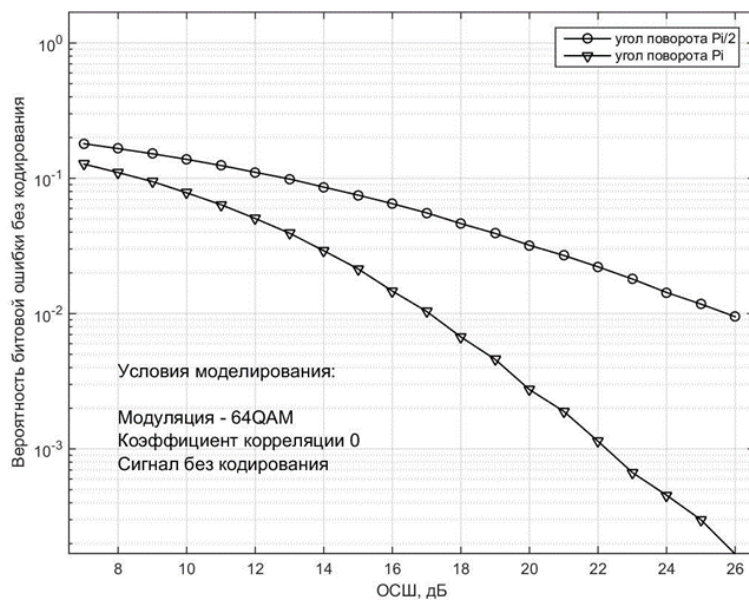
3.24- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айталу бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айталуымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . Модуляция 16-QAM, кодтау бар, арна түзетілмеген.



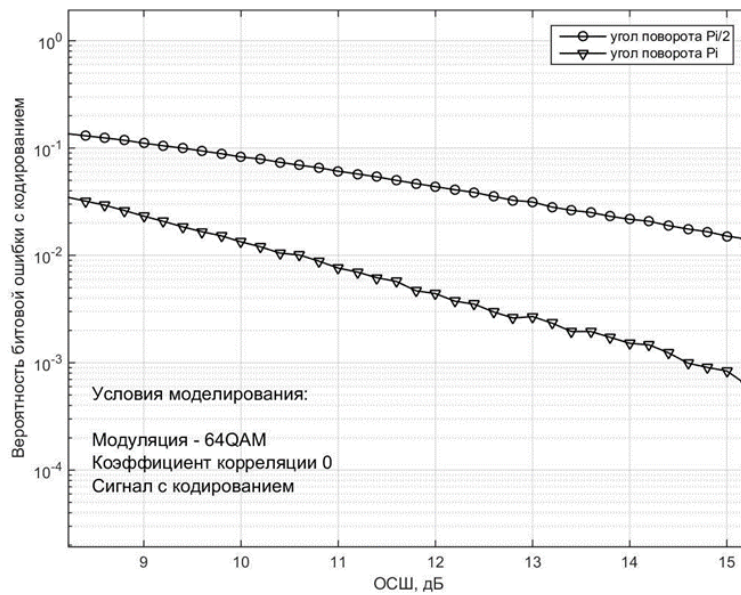
3.25- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айталу бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айталуымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . Модуляция 16-QAM, кодтау жоқ, арна корреляцияланған.



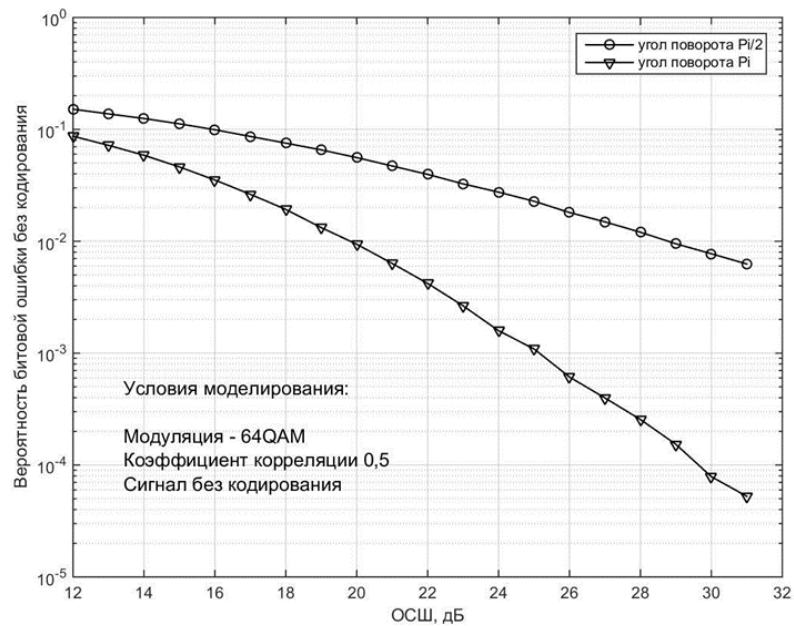
3.26- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айналудың бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айналудымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . Модуляция 16-QAM, кодтау бар, арна корреляцияланған.



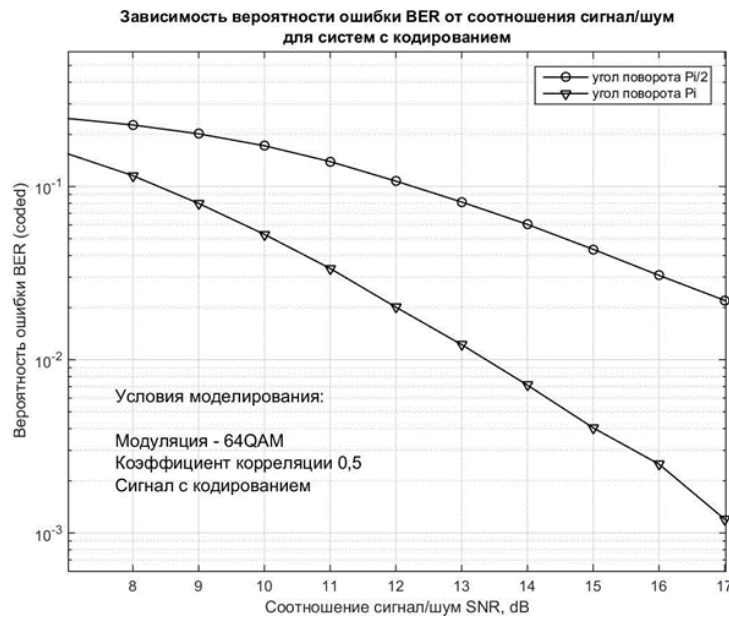
3.27- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айналудың бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айналудымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . Модуляция 64-QAM, кодтау жоқ, арна түзетілмеген.



3.28- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айталу бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айталуымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . Модуляция 64-QAM, кодтау бар, арна түзетілмеген.



3.29- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айталу бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айталуымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . 64-QAM модуляциясы, кодтау жоқ, арна корреляцияланған.



3.30- сурет - Жүйелердің шуылға қарсы тұрақтылығын айналуды бұрыштарында сигнал шоқжұлдызының айналуымен салыстыру  $\varphi = \pi$  және  $\varphi = \pi / 2$ . 64-QAM модуляциясы, кодтау бар, арна корреляцияланған.

Модельдеу кезінде алынған нәтижелер (суреттерді қараңыз 3.20-3.30 аралығы), осы параметрдің стандартты мәні  $\varphi = \pi/2$ -ге қарағанда генеративті матрица үшін (37)  $\varphi = \pi$  параметрінің оңтайлы мәнін қолданған кезде айтарлықтай энергия пайдасын көрсетіңіз. Жүйені кодтаусыз пайдаланған жағдайда энергияның пайдасы 2,7 – 8,5 дБ құрайды. Кодталған жүйе жағдайында 0,7-6,3 дБ. Модельдеу нәтижелері 3.12-кестеде келтірілген.

Кесте 3.12 - Модельдеу нәтижелері

Модельдеу:	Модуляция түрі	Беру/қабылдау корреляция коэффициенті	Кодтау	Энергия ұтысы, дБ
Сурет 3.20	QPSK	0/0	жоқ	2,7
Сурет 3.21	QPSK	0,5/0,5	жоқ	3,8
Сурет 3.22	QPSK	0,5/0,5	бар	0,7
Сурет 3.23	16-QAM	0/0	жоқ	7,0
Сурет 3.24	16-QAM	0/0	бар	1,8
Сурет 3.25	16-QAM	0,5/0,5	жоқ	3,8
Сурет 3.26	16-QAM	0,5/0,5	бар	1,8
Сурет 3.27	64-QAM	0/0	жоқ	9,5
Сурет 3.28	64-QAM	0/0	бар	5,9
Сурет 3.29	64-QAM	0,5/0,5	жоқ	8,5
Сурет 3.30	64-QAM	0,5/0,5	бар	6,3

Ұсынылған критерийді пайдалану (3.8), (3.9) кеңістік-уақыт

матрицасының параметрін оңтайлы таңдау арқылы қосымша энергия пайдасын алуға мүмкіндік береді.

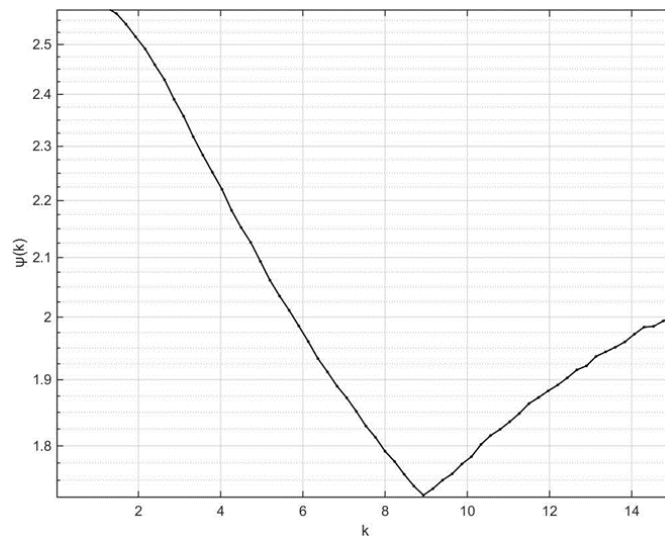
### 3.9 Голден өлшемді 32x2 өзгертілген кеңістік-уақыт коды үшін критерийді қолдану

Өлшемі 32 x 32 MIMO байланыс жүйесі үшін түрлендірілген Голден (36) типті кеңістік - уақыт коды үшін (3.8), (3.9) ұсынылған критерийді қолданамыз. Оңтайландырылған параметр-бұл параметр үшін өрнектегі скаляр  $k$   $r = \frac{-1+\sqrt{k}}{2}$  код өзгертілген Голден (2.2). Модельдеу шарттары 3.13-кестеде келтірілген.

Кесте 3.13 - Модельдеу шарттары

Пайдаланылатын кеңістік-уақыт матрицалары және олардың өлшемдері	Өлшем матрицасы (2.2) 32x2 .
Арнадағы мұздату моделі	Кронеккердің замирания моделі, реле үзілістерімен және 0,5 берілістегі корреляция коэффициентімен және 0,5 қабылдаудағы корреляция коэффициентімен; реле үзілістерімен, берілістегі және қабылдаудағы корреляциясыз
Эксперименттер саны	1000000

Жүргізілген модельдеу нәтижелері 3.31-суретте көрсетілген



3.31- сурет - Кодка тәуелділік  $\psi(k)$  өзгертілген Голден



R оңтайлы мәні келесі өрнекпен анықталады:

$$r = \frac{-1 + \sqrt{9}}{2} = 1$$

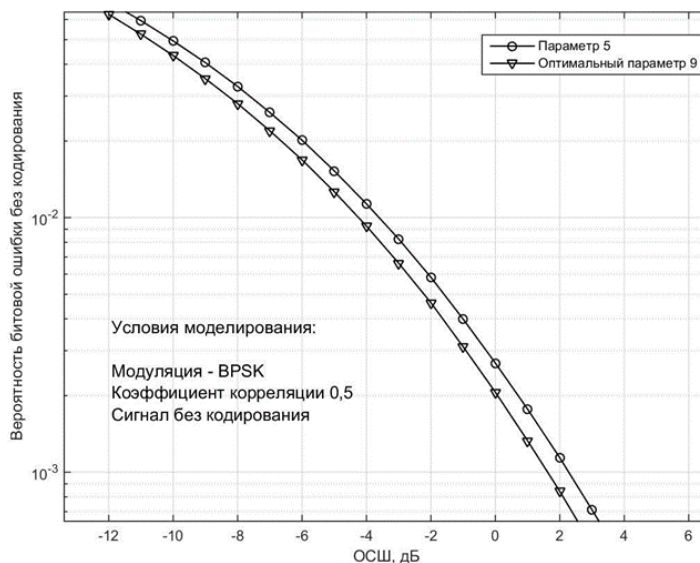
Өзгертілген Голден (2.2) коды үшін R параметрінің стандартты мәні мәнмен анықталады:

$$r = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}$$

Салыстырайық сипаттамалары сыртқы әсерге тұрақтылығы кеңістік-уақытша код Голден параметрі  $r = \frac{-1 + \sqrt{9}}{2}$ . Өлшем (3.8),(3.9) және стандартты параметр арқылы алынған  $r = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}$ . Модельдеу 3.14-кестеде келтірілген жағдайларда жүргізілді.

Кесте 3.14 - Модельдеу шарттары

Пайдаланылатын кеңістік-уақыт матрицалары және олардың өлшемдері	Өлшем матрицасы (36) 32x2 r параметрінің мәні бар : $r = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2} \quad r = \frac{-1 + \sqrt{9}}{2}$
Арнадағы құлдырау моделі	Кронеккердің кату моделі, реле үзілістерімен және 0,5 берілістегі корреляция коэффициентімен және 0,5 қабылдаудағы корреляция коэффициентімен.
Модуляция түрі	BPSK
Демодуляция әдісі	MMSE
Кодтау әдісі	Кодтау жоқ



3.32- сурет - Модификацияланған Голден кодын қолданатын жүйелердің

шуылға төзімділігін салыстыру, өлшемі  $32 \times 2$  түрлі параметрлермен  $k$ . BPSK модуляциясы, кодтау жоқ, арна корреляцияланған.

Модельдеу кезінде алынған нәтижелер (3.32-суретті қараңыз) (3.8), (3.9) өлшемімен алынған  $r$  параметрінің оңтайлы мәнін пайдалану кезінде айтарлықтай энергия пайдасын көрсетеді.

Жүйені кодтаусыз пайдаланған жағдайда, bpsk модуляциясы және байланыс арнасында кеңістіктік корреляция болған кезде энергия ұтысы  $0,3 - 0,4$  дБ құрайды.

Ұсынылған критерийді (3.6), (3.7) пайдалану кеңістік-уақыт матрицасының параметрін оңтайлы таңдау арқылы қосымша энергия пайдасын алуға мүмкіндік береді.

Кесте 3.15 - Модельдеу шарттары

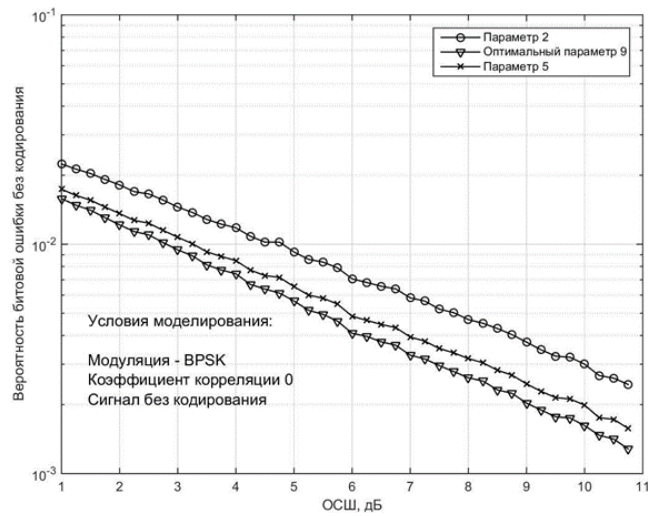
Пайдаланылатын кеңістік-уақыт матрицалары және олардың өлшемдері	(1.12) Өлшем матрицасы $r$ параметрінің мәні бар $2 \times 2$
Каналдағы замирания моделі	Кронеккердің замирания моделі, реле үзілістерімен және $0,5$ берілістегі корреляция коэффициентімен және $0,5$ қабылдаудағы корреляция коэффициентімен; реле үзілістерімен, берілістегі және қабылдаудағы корреляциясыз
Модуляция түрі	BPSK
Демодуляция әдісі	MMSE
Кодтау әдісі	Кодтаусыз және параметрлермен турбо-кодты пайдалану: кодтау жылдамдығы $1/2$ , код шектеуінің ұзындығы $16$

Синтез өлшемінің (3.7), (3.8) сәйкестігін тексеру үшін имитациялық модельдеуді қолдану ұсынылады. Голден (1.12) кодына арналған  $k$  String by-нің тәуелділігін  $\psi(k)$  қарастырыңыз (7-суретті қараңыз). График максималды дисперсияның минимумының  $0$ -ден оңтайлы  $9$ -ға дейін төмендеуін және функцияның оңтайлы  $9$ -дан максималды есептелген мәндерге дейін өсуін көрсетеді.

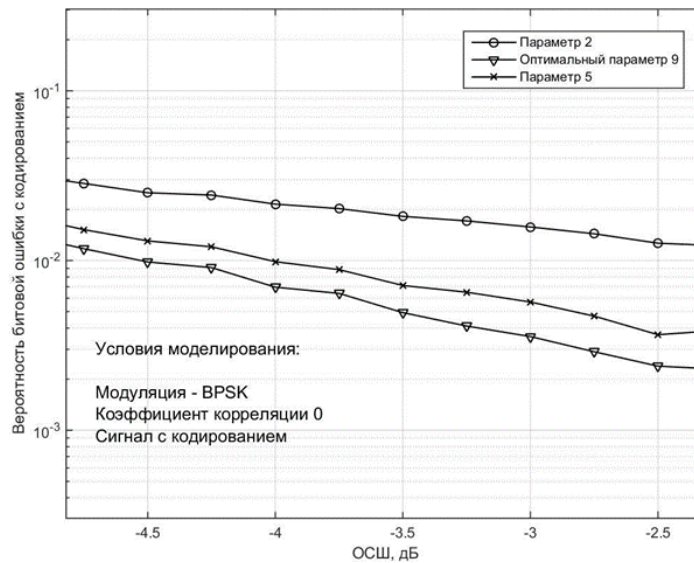
Алынған нәтижелерге сүйене отырып, критерийдің барабарлығы жағдайында (3.7), (3.8) ММО байланыс жүйесінің шуылға қарсы иммунитетінің сипаттамалары  $k$  параметрі  $1$ -ден  $k$  оңтайлы мәніне дейін өзгерген кезде жақсаруы керек  $9$ -тармақ, тиісінше  $k$  параметрі  $9$ -дан ММО байланыс жүйесінің шуылға қарсы сипаттамасының ұлғаюы жағына қарай өзгерген кезде нашарлауы

тиіс.

Гипотезаны растау үшін модельдеу жүргіземіз. Модельдеу 3.15-кестеде келтірілген жағдайларда жүргізілді.

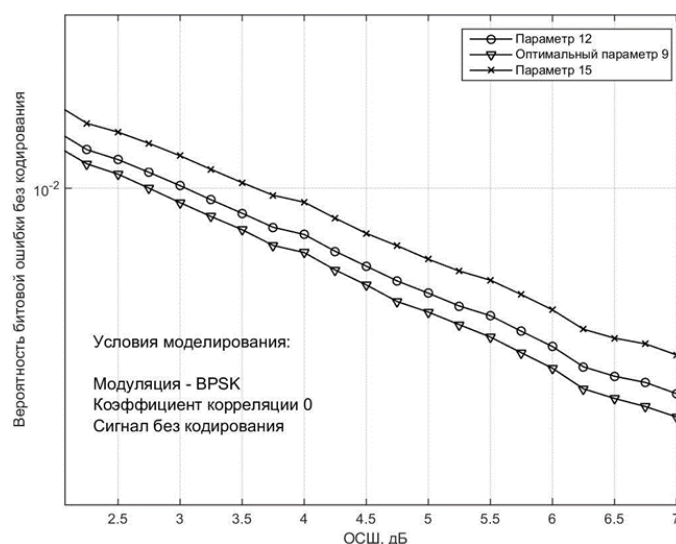


3.33- сурет - Алтын кодты қолданатын жүйелердің шуылға қарсы иммунитетін әртүрлі параметрлермен салыстыру к. BPSK модуляциясы, кодтау жоқ, арна түзетілмеген.

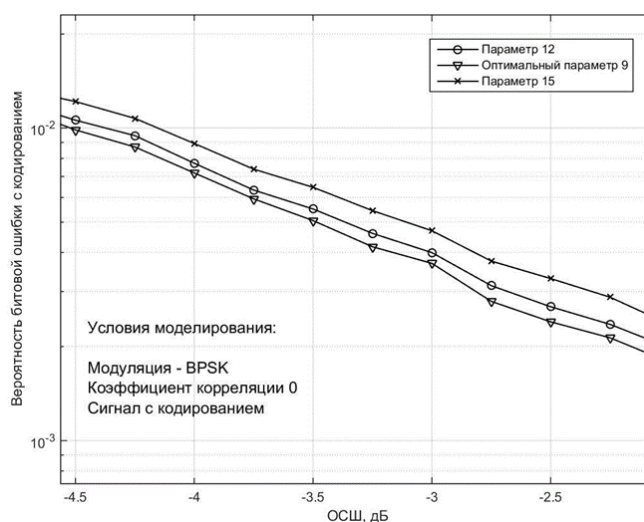


3.34- сурет - Алтын кодты қолданатын жүйелердің шуылға қарсы иммунитетін әртүрлі параметрлермен салыстыру к. BPSK модуляциясы, кодтау бар, арна түзетілмеген.





3.35- сурет - Алтын кодты қолданатын жүйелердің шуылға қарсы иммунитетін әртүрлі параметрлермен салыстыру к. BPSK модуляциясы, кодтау жоқ, арна түзетілмеген.



3.36- сурет - Алтын кодты қолданатын жүйелердің шуылға қарсы иммунитетін әртүрлі параметрлермен салыстыру к. Bpsk модуляциясы, кодтау бар, арна түзетілмеген.

Жүргізілген Имитациялық модельдеу нәтижелері (3.33, 3.34, 3.35, 3.36 - суреттерді қараңыз) алтын (1.12) код үшін (3.7), (3.8) өлшемінің өзгеру сипаттамасына сәйкес келетін MIMO байланыс жүйесінің шуылға қарсы иммунитетінің өзгеру динамикасын көрсетеді (7-суретті қараңыз). К 2-ден 9-ға дейін жоғарылаған кезде шуылға қарсы иммунитеттің сипаттамалары жақсарады. К 9-дан жоғары болған кезде 15 шуылға қарсы иммунитеттің сипаттамалары (41, 42-суреттерді қараңыз). 3.32-3.36 суреттерде алынған графиктер (3.7), (3.8) өлшемдерінің барабарлығын растайды.

## ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеулер мен әзірлемелердің негізгі нәтижелері келесідей:

1. Белгілі Алтын кодтың генеративті матрицасы негізінде жаңа кеңістік-уақыт коды жасалды. Модельдеу нәтижелері BPSK модуляциясын қолданған кезде ұсынылған кодтың белгілі кодпен салыстырғанда сәйкесінше 0,2 дБ, 0,5 дБ энергия ұтысы бар екенін көрсетеді.

2. Сигнал шоқжұлдызының айналуымен белгілі кодтың генеративті матрицасы негізінде жаңа кеңістік-уақыт коды жасалды. Модельдеу нәтижелері бойынша QPSK, 16-QAM, 64-QAM модуляциясын пайдалану кезінде ұсынылған кодтың сәйкесінше 3,8 дБ, 3,8 дБ, 9,5 дБ энергия ұтысы бар екендігі көрсетілген.

3. Кеңістік-уақыт кодтарын оңтайландыру үшін оңтайлылықтың жаңа өлшемі ұсынылады. MIMO байланыс жүйесінің үлкен өлшемдері мен модуляцияның жоғары деңгейлері үшін ұсынылған критерий белгілі критерийлерге қарағанда қолайлы есептеу күрделілігіне ие.

4. Үлкен өлшемді кеңістік-уақыттық матрицалар үшін, оның ішінде әзірленген критерийді қолдану аясында балама виртуалды арна матрицасын синтездеудің аналитикалық әдістері ұсынылды.

Осылайша, дипломдық жұмыстың зерттеудің мақсатына қол жеткізілді, белгілі ғарыштық уақыт матрицаларын қолданатын MIMO жүйелерінің сипаттамасынан асатын шуылға қарсы сипаттамалары бар MIMO жүйелері үшін ғарыштық уақыт матрицаларын, оның ішінде үлкен өлшемді жобалау мен зерттеудің ғылыми міндеті шешілді.

## ПАЙДАЛАНЫЛГАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022/ Корпорация CISCO // 2019. – p.33, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visualnetworking-index-vni/white-paper-c11-738429.html>
2. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022/ Корпорация CISCO // 2019. – p.38, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visualnetworking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>
3. Бакулин, М.Г. Технология ММО: принципы и алгоритмы/ М.Г. Бакулин, Л.А. Варукина, В.Б. Крейнделин // Москва. Горячая линия – Телеком, 2014. - 244 с.
4. Крейнделин, В. Б. Новые методы обработки сигналов в системах беспроводной связи /В.Б. Крейнделин // Санкт-Петербург. Линк, 2009. – 275 с.
5. Аджемов С.С. Технологии широкополосного доступа: динамика и перспективы развития/ Аджемов С.С., Урядников Ю.Ф. // Электросвязь. №1 – 2011.- с. 19 – 23.
6. 3GPP Технический стандарт TS 136 213 v.13.2.0, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures/ETSI // 2016. – p.383, <https://www.etsi.org>
7. 3GPP Технический стандарт TR 136.913 v 15.0.0, Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)/ETSI // 2018. – p.17, <https://www.etsi.org>
8. Прокис, Дж. Цифровая связь/Перевод с английского и под редакцией Д.Д. Клоковского // Москва. Радио и связь, 2000. – 797 с.
9. Аджемов, А. Общая теория связи: Учебник для вузов/Аджемов А.С., Санников В.Г. // Москва. Горячая линия – Телеком, 2018. - 624 с.
10. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники/ Б.Р. Левин // Москва. Радио и связь, 1989. – 656 с.
11. Ипатов, В.П. Системы мобильной связи: Учебное пособие для вузов/ Ипатов В.П., Орлов В. И., Самойлов И. М., Смирнов В. Н.; под. ред. Ипатова В. П. // Москва. Горячая линия-Телеком, 2003.-272с
12. Тихонов, В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств систем/В.И. Тихонов, В.Н. Харисов // Москва. Радио и связь, 2004. – 608 с.
13. Clerckx, Bruno MIMO Wireless Communications. Channels, Techniques and Standards for Multi-Antenna, Multi-User and Multi-Cell Systems/ Bruno Clerckx, Claude Oestges // London. Academic Press, 2013. – p. 776
14. Басараб, М.А. Цифровая обработка сигналов на основе теоремы Уиттекера- Котельникова-Шеннона/ М.А. Басараб, Е.Г. Зелкин, В.Ф. Кравченко, В.П. Яковлев // Москва. Радиотехника, 2004. – 72 с. 75 78
15. Ипатов, В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов/В.П. Ипатов // Москва. Техносфера, 2007. – 487 с.

16. Larsson, Eric G. Space-Time Block Coding for Wireless Communications. 3rd edition/ Eric G. Larsson, Petre Stoica // Cambridge UK. Cambridge University Press, 2008. – p.280
17. Telatar, E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels/E. Telatar // European Transactions on Telecommunications, November/December Vol. 10. - 1999. - № 6. – pp. 585–595
18. Константинов, А. Анализ фундаментальных ограничений максимальной скорости передачи информации в сети LTE-Advanced / А.С. Константинов, А.В. Пестряков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – №12. – с. 60-63.
19. Слюсар, В. И. Системы ММО: принципы построения и обработка сигналов/В. И. Слюсар // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. – 2005. - №8. – С. 52- 59
20. Одинцов, М. О. Методы моделирования матриц передачи ММОканалов и исследование помехоустойчивости передачи данных / М.О. Одинцов, Ю.С.Шинаков // Радиотехника. – 2016. – №6, – С. 130-136.
21. Alamouti, S. Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications/S. Alamouti // IEEE Journal of Selected Areas in Communications Vol. 16. – 1998. - №8. – pp. 1451 – 1458
22. Fernandez, O. Modelling broadband 2×2 MIMO channels in indoor-outdoor scenarios/O. Fernandez, M. Domingo, R.P. Torres // IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. – 2009. -Bilbao, Spain. – p.8

**ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ**  
дипломдық жұмысқа

Оралтай Диасбек Олжасұлы

6B06201 «Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы

Тақырыбы: «Байланыс жүйесіндегі антенналардың кеңістіктік-уақыттық кодтау әдістерін зерттеу»

«Байланыс жүйесіндегі антенналардың кеңістіктік-уақыттық кодтау әдістерін зерттеу» тақырыбындағы дипломдық жоба заманауи байланыс және деректерді беру технологияларының дамуына маңызды үлес болып табылады.

Студент Антенналарды кеңістіктік-уақыттық кодтаудың қолданыстағы әдістеріне және олардың байланыс жүйелерінде қолданылуына терең талдау жасады. Жұмыста мұндай әдістердің техникалық аспектілері, олардың артықшылықтары мен шектеулері егжей-тегжейлі қарастырылған.

Жобаның эксперименттік бөлігіне ерекше назар аудару керек, онда студент бірқатар сынақтар өткізіп, алынған мәліметтерді талдады. Нәтижелер Антенналарды кеңістіктік-уақыттық кодтаудың әртүрлі әдістерінің өнімділігі мен тиімділігі туралы қорытынды жасауға мүмкіндік береді.

Студенттің жұмысы жоғары ғылыми деңгейге және практикалық маңыздылыққа ие. Ол ұсынған зерттеу әдістерін телекоммуникация саласындағы әрі қарайғы зерттеулерде және жаңа байланыс технологияларын әзірлеуде қолдануға болады.

Бұл жоба жоғары бағалауға лайық және ғылыми қоғамдастық үшін де, байланыс және ақпараттық технологиялар саласындағы практикалық мамандар үшін де қызықты болатынына сенімдімін.

Студент, Оралтай Диасбек Олжасұлы дипломдық жұмысты жазу барысында жетекші нұсқаулығымен өз бетінше жұмыс істеу қабілетін көрсетті. Дипломдық жұмыс «80/В/ жақсы» деп бағаланды, ал **Оралтай Диасбек Олжасұлын** 6B06201 «Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы бойынша «Ақпараттық коммуникациялық технологиялар» бакалавры академиялық дәрежесіне ұсынамын.

Ғылыми жетекші  
ЭТЖҒТ каф. аға оқытушы,  
техника ғылымдарының магистрі  
Дағарбек Р.  
«29» 05 2024 ж.



Дипломдық жұмысқа  
РЕЦЕНЗИЯ

Оралтай Диасбек Олжасұлы

6В06201 Телекоммуникация

Тақырыбына: «Байланыс жүйесіндегі антенналардың кеңістіктік-уақыттық кодтау әдістерін зерттеу»

Орындалды:

а) графикалық бөлім 12 парақ;

б) түсініктеме 57 бет.

**ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ**

«Байланыс жүйесіндегі антенналардың кеңістіктік-уақыттық кодтау әдістерін зерттеу» тақырыбындағы диссертация сымсыз байланыс және деректерді беруді оңтайландыру саласындағы маңызды зерттеу болып табылады. Жұмыс авторлары өткізу қабілеті мен берілу сенімділігін арттыру мақсатында байланыс желілеріндегі Антенналарды кеңістіктік-уақыттық кодтаудың әртүрлі әдістерін талдауды ұсынады.

Бұл жұмыстың негізгі артықшылықтарының бірі-байланыс технологияларының үнемі дамуы және деректерді берудің жаңа әдістерінің пайда болуы контекстіндегі өзектілігі. Антеннаны кеңістіктік-уақыттық кодтау байланыс желілерінің өнімділігін жақсартуға және радиожилік спектрін пайдалануды оңтайландыруға тиімді тәсіл болып табылады.

Сонымен қатар, дипломдық жұмыс байланыс желілерінде Антенналарды кеңістіктік-уақыттық кодтау әдістерін қолдану бойынша практикалық ұсыныстар береді. Бұған оңтайлы кодтау параметрлерін таңдау, желілік инфрақұрылымды конфигурациялау және өткізу қабілеттілігі мен байланыс сенімділігін арттыру мақсатында деректерді беру процесін оңтайландыру бойынша ұсыныстар кіреді.

Графикалық және мәтіндік материалдар МСТҚ талабына сәйкес жазылған. Бұл дипломдық жоба жоғарғы оқу орындарының талаптарына сай.

**ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ**

Жалпы, дипломдық жұмысқа «жақсы» (85%) деген баға, ал студент Оралтай Диасбек Олжасұлын 6В06201 «Телекоммуникация» білім беру бағдарламасының «Ақпараттық коммуникациялық технологиялар бакалавры» дәрежесіне лайықты деп санаймын.

**Рецензент:**

ХАТУ, «Компьютерлік технологиялар және киберқауіпсіздік» факультетінің деканы, т.ғ.к.

 Н.А. Сейлова

« 20 » 05 2024 ж.

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Оралтай Диасбек Олжасұлы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Байланыс жүйесіндегі антенналардың кеңістіктік-уақыттық кодтау әдістерін зерттеу

**Научный руководитель:** Сұңғат Марксұлы

**Коэффициент Подобия 1:** 2.9

**Коэффициент Подобия 2:** 0.3

**Микропробелы:** 44

**Знаки из других алфавитов:** 10

**Интервалы:** 66

**Белые Знаки:** 7

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

29.05.2024  
Дата

Марксұлы  
проверяющий эксперт

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Оралтай Диасбек Олжасұлы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Байланыс жүйесіндегі антенналардың кеңістіктік-уақыттық кодтау әдістерін зерттеу

**Научный руководитель:** Сұңғат Марксұлы

**Коэффициент Подобия 1:** 2.9

**Коэффициент Подобия 2:** 0.3

**Микропробелы:** 44

**Знаки из других алфавитов:** 10

**Интервалы:** 66

**Белые Знаки:** 7

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.


Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

29.05.2024  
Дата

Заведующий кафедрой





**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті  
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагияттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

**Автор: Оралтай Диасбек Олжасұлы**

**Тақырыбы: Байланыс жүйесіндегі антенналардың кеңістіктік-уақыттық кодтау әдістерін зерттеу**

**Жетекшісі: Сұңғат Марксұлы**

**1-ұқсастық коэффициенті (30): 2.9**

**2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.3**

**Дәйексөз (35): 1.2**

**Әріптерді ауыстыру: 10**

**Аралықтар: 66**

**Шағын кеңістіктер: 44**

**Ақ белгілер: 7**

**Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :**

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

**Негіздеме:**

29.05.2024  
Күні

Кафедра меңгерушісі

