

Ж.С. ИСМАГУЛОВА¹, Е.С. СЕЙДУЛЛА²

¹техника ғылымдарының кандидаты, Қожжа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: zhuldyz.ismagulova@ayu.edu.kz

²Қожжа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінің магистранты (Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: y.seidulla@mail.ru

ЗАМАНАУИ WI-FI ЖЕЛІЛЕРІНІҢ КӨПШІЛІК ҚОЛЖЕТІМДІЛІК ӘДІСТЕРІН ТАЛДАУ

Аңдатпа. Қазіргі Wi-Fi желісіне қосылған құрылғылардың саны жыл сайын артып келеді және бұл олардың тығыздалуына, көрші кіру нүктелері арасындағы кедергілердің артуына, сондай-ақ Wi-Fi технологиясының әртүрлі буындарына жататын құрылғылардың бір желіде бірігуіне әкеліп соғады. Бүгінгі таңда заманауи Wi-Fi желілері үшін өткізу қабілеттілігін арттыру және желідегі құрылғылар арасында ресурстарды теңдей бөлуді қамтамасыз ету өзекті мәселе болып отыр. Мақалада осы мәселелердің шешімдерінің бірі болып табылатын – жолақ ені мен антенналар санын көбейту арқылы желінің өткізу қабілеттілігін арттыру жолдары туралы айтылады.

Бұл мақалада жоғарыда ұсынылған жақсартулардан басқа, Wi-Fi өткізу қабілеттілігін арттыруға Wi-Fi технологияларына арналған жаңа көпшілік қол жетімділік әдістерін қолдану арқылы жүзеге асыруға болатындығы қарастырылады. Осындай әдістердің бірі – ортогоналды емес көпшілік қол жетімділік (ағылш.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA). NOMA көмегімен бір кіру нүктесі бір антеннаны пайдаланып бір уақытта көпшілік станцияға деректерді бір жиілікте жібере алады және әртүрлі станцияларға арналған ағындар арасында тарату қуатын бөлу арқылы жүзеге асырылады. Сонымен қатар, сымсыз байланыс желілерде қолданылатын ең танымал: уақытқа бөлу арқылы көпшілік қол жетімділік, жиілікті бөлу арқылы көпшілік қол жетімділік, ортогональды жиілікті бөлу арқылы көпшілік қол жетімділік, кеңістіктік бөлу арқылы көпшілік қол жетімділік секілді әдістерге талдау мен салыстырулар жасалынған.

Кілт сөздер: IEEE 802; көпшілік қолжетімділік; TDMA; FDMA; OFDMA; SDMA; NOMA; базалық станция.

Zh.S. Ismagulova¹, E.S. Seidulla²

¹Candidate of Technical Sciences, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Kazakhstan, Turkistan), e-mail: zhuldyz.ismagulova@ayu.edu.kz

²Master's Student of Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Kazakhstan, Turkistan), e-mail: y.seidulla@mail.ru

Analysis of multiple access methods of modern Wi-Fi networks

Abstract. Every year the number of devices connected to a wireless Wi-Fi network increases. This leads to their densification, an increase in barriers between neighboring access points, as well as to the unification of devices belonging to different generations of Wi-Fi technologies in one network. To date, for modern Wi-Fi networks, the issue of increasing bandwidth and ensuring an even distribution of resources between devices in the network is becoming relevant. The article describes ways to increase network bandwidth by increasing the bandwidth and number of antennas, which are one of the solutions to these problems.

It is also considered that, in addition to the improvements presented above, an increase in Wi-Fi bandwidth can be achieved through the use of new multiple access methods for Wi-Fi technologies. One of such methods is multiple non-Orthogonal Access (English: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA). With NOMA, one access point can transmit data to several stations simultaneously using one antenna on the same frequency and is carried out by distributing transmission power between streams for different stations. In addition, analyses and comparisons of methods used in wireless networks were carried out: multiple access with time division, multiple access with frequency division, multiple access with orthogonal frequency division, multiple access with spatial distribution.

Keywords: IEEE 802; multiple access; TDMA; FDMA; OFDMA; SDMA; NOMA; base station.

Ж.С. Исмагулова¹, Е.С. Сейдулла²

¹*кандидат технических наук, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави (Казахстан, г. Туркестан), e-mail: zhuldyz.ismagulova@ayu.edu.kz*

²*магистрант Международного казахско-турецкого университета имени Ходжи Ахмеда Ясави (Казахстан, г. Туркестан), e-mail: y.seidulla@mail.ru*

Анализ методов множественного доступа современных сетей Wi-Fi

Аннотация. С каждым годом количество устройств, подключенных к беспроводной сети Wi-Fi увеличивается. Это приводит к их уплотнению, увеличению барьеров между соседними точками доступа, а также к объединению в одной сети устройств, относящихся к разным поколениям технологий Wi-Fi. На сегодняшний день для современных сетей Wi-Fi актуальным становится вопрос увеличения пропускной способности и обеспечения равномерного распределения ресурсов между устройствами в сети. В статье рассказывается о способах увеличения пропускной способности сети за счет увеличения ширины полосы и количества антенн, которые являются одним из решений этих проблем.

Также рассматривается, что, помимо улучшений, представленных выше, увеличение пропускной способности Wi-Fi может быть достигнуто за счет использования новых методов множественного доступа для технологий Wi-Fi. Одним из таких методов является множественный неортогональный доступ (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA). С NOMA одна точка доступа может передавать данные на несколько станций одновременно с помощью одной антенны на одной частоте и осуществляется путем распределения мощности передачи между потоками для разных станций. Кроме того, были проведены анализы и сравнения методов, используемых в беспроводных сетях: множественный доступ с временным разделением, множественный доступ с частотным разделением, множественный доступ с ортогональным частотным разделением, множественный доступ с пространственным распределением.

Ключевые слова: IEEE 802; множественный доступ; TDMA; FDMA; OFDMA; SDMA; NOMA; базовая станция.

Кіріспе

Дүниежүзілік COVID-19 пандемиясы қашықтан жұмыс істеу режиміне көшуді, бейнеконференцияларды ұйымдастыру және жұмыс орнына қашықтан қол жеткізу үшін әртүрлі сценарийлерде Интернетке үздіксіз көпшілік қолжетімділікті қамтамасыз ету мәселесін бұрынғыдан да өзекті етті. Осы орайда сымсыз байланыс желілерде қолданылатын көпшілік қолжетімділік танымал TDMA (Time Division Multiple Access), FDMA (Frequency Division Multiple Access), OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), SDMA

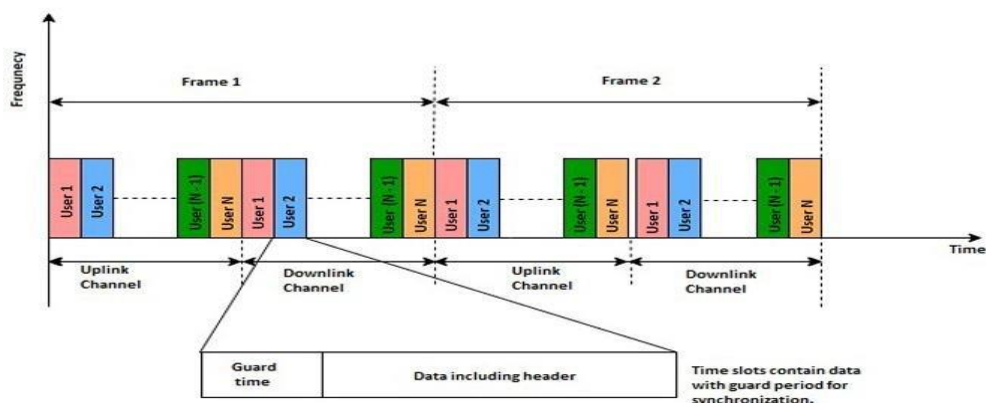
(Space Division Multiple Access) және NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) сияқты әдістердің әрқайсысына жеке-жеке тоқталып, талдау жүргізейік.

Зерттеу әдістері

Уақытқа бөлу арқылы көпшілік қолжетімділік әдісі:

TDMA (Time Division Multiple Access) арнаны уақыт аралықтарына бөлуді қамтиды. Әрбір уақыт аралығы белгілі бір құрылғыға ақпарат беру үшін пайдаланылады, бұл ретте бір құрылғыға берілген ақпарат мөлшері бөлінген уақыт слоттарының санына пропорционалды болып келеді. TDMA заманауи кең жолақты радиоқабылдау технологияларының негізі болып табылады. Заманауи ұялы желілерде базалық станция, құрылғының қай уақытта ақпаратты жібере алатынын қадағалап көрсетеді және осылайша арнаға детерминирленген қол жеткізуді ұйымдастырады [1,2].

TDMA, DCF (Distributed Coordination Function), EDCA (Enhanced Distributed Channel Access), HCCA (HCF Controlled Channel Access), MCCA (Multihop Clear Channel Assessment) негізіндегі Wi-Fi желілерінде арнаға кездейсоқ қол жеткізуге жауап беретін механизмдер енгізілген [3]. Төмендегі 1-суретте статистикалық деректер ағынының кадрлар құрылымы көрсетілген. Бұл жерде кадрлар уақыт аралықтарына бөлініп қарастырылған.



1-сурет – TDMA кадр құрылымы

Жиілікті бөлу арқылы көпшілік қолжетімділік әдісі:

FDMA (Frequency Division Multiple Access) – жиілікті бөлу арқылы көпшілік қолжетімділік. Бұл ұялы байланыста ғана емес, басқа радиобайланыс жүйелерінде де қолданылатын ең көп таралған көпшілік қолжетімділік әдістерінің бірі.

FDMA бір жиілік арнасын әртүрлі пайдаланушыларға арналған көптеген ішкі арналарға бөлуді қамтиды. Әрбір ішкі арнада ақпарат көрші қосалқы арналарға тәуелсіз модуляцияланады. Ұялы желілердің дамуына көз салсақ, FDMA бұрыннан кеңінен қолданылып келеді. Бұл бірінші буын ұялы байланыс желісі болып табылатын AMPS (Advanced Mobile Phone Service) [4] технологиясының негізі болып табылады. Әрбір қосылым үшін ені 30 кГц жеке жиілік арнасы бөлінеді. FDMA көмегімен әр арнаны әр уақытта ең тиімді пайдаланушыға тағайындауға болады. FDMA сонымен қатар жалпы байланысқа қол жеткізу TACS (Total Access Communications System) машинасында қолданылады. Виртуалды артықшылықты ұялы байланыс провайдері сандық жетілдірілген ұялы телефон жүйесі D-AMPS (Digital Advanced Mobile Phone System) қосымша FDMA-ны пайдаланады, бірақ әр FDMA арнасы үшін қосалқы 3 арнаны алуға мүмкіндік беретін TDMA-ны ұсынады, бұл арнада өңделетін қоңыраулар санын үш есеге арттыруға мүмкіндік береді. FDMA-да әрбір таратқышқа бірегей жиілік арнасы тағайындалады, осылайша қабылдағыштар өздерінің қалаған арнасын реттеу арқылы, олардың арасын ажырата алады.

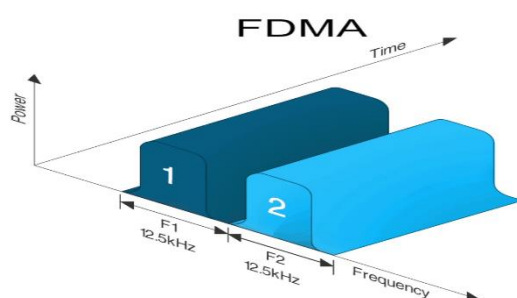
TDMA және CDMA әдетте FDMA-мен бірге пайдаланылады, яғни бұл жиілік арнасы басқа жиілік арналарындағы көрсеткіштерге қарамастан TDMA және CDMA үшін де пайдаланылуы мүмкін. FDMA функциялары келесідей:

I. FDMA-ның TDMA және CDMA-дан айырмашылығы, радиоқұрылғы ішіндегі жоғары өнімді сүзгілерді қажет етеді.

II. Бүкіл қосылым бойы ағындық деректерді FDMA көмегімен еш қиындықсыз пайдалануға болады.

III. Жиіліктік сүзгілеуді қолданылатын болғандықтан, FDMA принципі CDMA-да пайда болатын жақын және алыс жол мәселесіне әрқашан сезімтал бола бермейді.

IV. FDMA-да алдын ала анықталған жиілік диапазоны қол жетімді болғандықтан, TDMA-да сияқты синхрондау мәселелеріне қауіп төндірмейді.



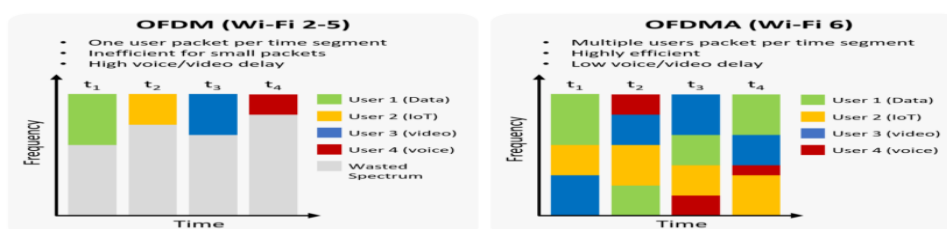
2-сурет – Жиілікті бөлу арқылы бірнеше қол жетімділік

2-суретте көрсетілгендей FDMA жеке пайдаланушыларға жеке арналарды тағайындайды. Әрбір радиоарнада бір уақытта бір ғана сөйлесу және бір қолданушы болады. Көбірек радиоарналар көбірек жиіліктерді қажет етеді. Бұл арналар қызметті сұрайтын абоненттерге сұраныс бойынша тағайындалады.

Ортогональды жиілікті бөлу арқылы көпшілік қолжетімділік әдісі:

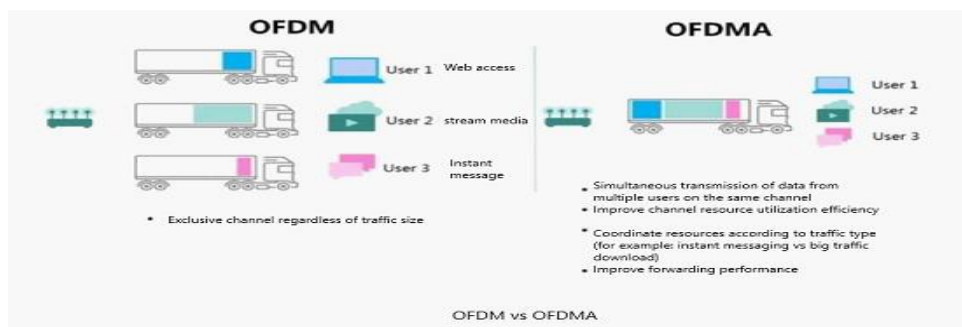
OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) негізінде ортогональды жиілікті арналарды бөлу мультиплекстеу технологиясы қолданылады. OFDM-да жіберілетін сигнал бір-біріне жақын орналасқан, көптеген ортогональды ішкі тасымалдаушылардан тұрады. Жалғыз таңбаны беру ұзақтығы кең жолақты бір жиілікті деректерді жіберуге қарағанда ұзағырақ, дегенмен деректер параллельді түрде беріледі, бұл бір жиілікті деректерді беру әдісімен салыстырылатын деректер жылдамдығына кепілдік береді. OFDM бір жиілікті таратудан артықшылығы оның көп жолды ортада кедергілерге төзімділігі болып табылады. Сондай-ақ, OFDM таңба аралық кедергіні азайта алады. OFDMA-ны пайдалану кезінде желідегі орталық құрылғы әрбір құрылғыға ішкі тасымалдаушылар жинағын тағайындайды, бұл ретте әрбір пайдаланушыға өзінің сигналдық-кодталған құрылысы (СҚК) ұсынылады [5].

Келесі 3,4 – суреттерде OFDM мен OFDMA арасындағы айырмашылықтар және уақытпен байланысты тәуелділіктер көрсетілген.



3-сурет – OFDM мен OFDMA арасындағы жиілік тәуелділігі

OFDMA-ны қолдану, TDMA-да OFDM көмегімен деректерді берумен салыстырғанда құрылғылар арасындағы жиілік ресурстарын бөлу тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді, себебі әрбір құрылғыға арна шарттары бойынша ең тиімді болып табылатын, ішкі тасымалдаушылар жиынтығын бөліп таңдауға болады. Сонымен қатар, OFDMA артықшылығы, оны іске асырудың қарапайымдылығында болып табылады, өйткені OFDMA қабылдағышы мен OFDMA таратқышы OFDM-де бұрыннан қолданылып келе жатқан, Фурьенің жылдам түрлендіру (FFT – Fast Fourier Transform) әдісі арқылы байланыс арнасын қосалқы тасымалдаушыларға бөледі [6].



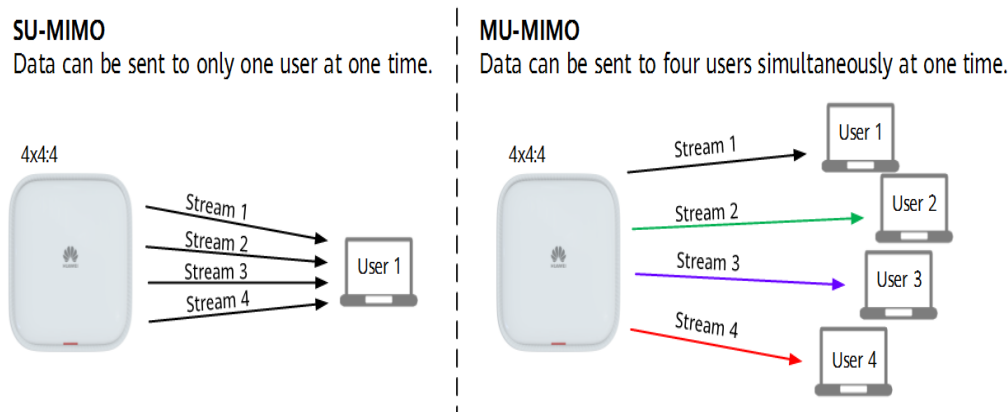
4-сурет – OFDM мен OFDMA арасындағы айырмашылықтар

Төртінші буынның ұялы желілерінде ішкі тасымалдаушылардың барлық жиынтығы ресурстық блокты құрайтын көпшілік қосалқы тасымалдаушылар топтарына бөлінеді. Әрбір құрылғының ақпаратын жіберу үшін базалық станция арнаның икемділігі мен деректерді беру талаптарына байланысты бір немесе көпшілік ресурс блоктарын бөледі. Бесінші буын желілерінде, іргелес қосалқы тасымалдаушылар арасындағы қашықтық және сигналдың ұзақтығы сияқты, ресурстық блок параметрлерін баптауға болады [7]. Wi-fi 6-дан бастап сымсыз желілерде OFDMA қолдауы да қосылды, яғни Wi-Fi 6 кіру нүктесі желінің әрбір пайдаланушысы үшін ресурстық бірліктерді тағайындай алады, бұл арнаның жоғары өткізу қабілеттілігін сақтайды.

Кеңістіктік бөлу арқылы көпшілік қолжетімділік әдісі:

SDMA (Space Division Multiple Access) жиілік пен уақыт ресурстарынан басқа, антенналардың сипаттамалары мен орналасуына байланысты кеңістіктік қол жетімділік бар. Кеңістіктік бөлу арқылы көпшілік қол жетімділік кеңістіктегі сигналдарды бөліп, бір жиіліктегі көпшілік құрылғыларға деректерді бір уақытта жіберуге мүмкіндік береді.

Бөлу қоршаған ортаның физикалық қасиеттеріне, атап айтқанда құрылғылардың бір-бірінен шалғай орналасуына, сондай-ақ антенналар бекітілетін алаңның сипатына байланысты болуы мүмкін [8]. Сондай-ақ, кеңістіктегі әртүрлі құрылғыларға арналған сигналдарды бөлу көптеген антенналарды пайдалану арқылы жүзеге асырылуы мүмкін. Бұл көпшілік қатынас әдісі MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output) деп аталады. Антенналардың көптігі кеңістіктік ағындарды қалыптастыруға мүмкіндік береді, олардың әрқайсысы белгілі бір құрылғы үшін деректерді жібереді. Әрбір қабылдағыш құрылғысына ондағы антенналар санынан асып кетпейтіндей кеңістіктік ағындар саны тағайындалуы мүмкін. 5-суретте SU-MIMO деректерді тізбектей тасымалдау және MU-MIMO бір мезгілде деректерді тасымалдау әдістері көрсетілген.



5-сурет – SU-MIMO және MU-MIMO деректерді тасымалдау әдістері

MU-MIMO технологиясымен қатар, тек бір қабылдағыш пен бір таратқыш арасындағы көпшілік антенналарды пайдаланып деректерді қабылдауды және жіберуді көздейтін SU-MIMO (Single User MIMO) әдісі де Wi-Fi желісінде белсенді түрде қолданылады. IEEE 802.11n Wi-Fi стандартын қосудан бастап [9], MIMO Wi-Fi желісінде пайда болады. IEEE 802.11n стандартында, қабылдағыштағы 4 антеннаны және таратқыштағы 4 антеннаны қолданған кезде, 4 кеңістіктік ағындарды қалыптастыру мүмкіндігі бар. IEEE 802.11ac қосымшасында [10] кеңістіктік ағындардың саны 8-ге дейін ұлғайтылды және MU-MIMO-ны төменгі арнада пайдалану мүмкіндігі пайда болады, ал Wi-Fi 6-да (IEEE 802.11ax) MU-MIMO жоғары арнаға қосылады. Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) жүйесінде кеңістіктік ағындар саны 16-ға дейін артады. Сондай-ақ, кеңістіктегі әртүрлі құрылғыларға арналған сигналдарды бөлу көптеген антенналарды пайдалану арқылы жүзеге асырылуы мүмкін. Бұл көпшілік қатынас әдісі MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output) деп аталады. Антенналардың көптігі кеңістіктік ағындарды қалыптастыруға мүмкіндік береді, олардың әрқайсысы белгілі бір құрылғы үшін деректерді жібереді. Әрбір қабылдағыш құрылғысына ондағы антенналар санынан асып кетпейтіндей кеңістіктік ағындар саны тағайындалуы мүмкін. 5-суретте SU-MIMO деректерді тізбектей тасымалдау және MU-MIMO бір мезгілде деректерді тасымалдау әдістері көрсетілген. Мұның бәрі MU-MIMO-ның Wi-Fi сымсыз байланыс желісінде белсенді түрде дами беретінін және барлық кейінгі жетілдірілген технологиялардың ажырамас бөлігі болатынын көрсетеді. Дегенмен, MU-MIMO-ның да бірқатар кемшіліктері бар. Олардың біріншісі арна сипаттамаларының жоғары корреляциясы бар құрылғыларға жіберу кезінде MU-MIMO-ның жұмыс өнімділігі нашар. Бұл жағдайда ағындар арасында жоғары кедергі болады, бұл өткізу қабілетінің төмендеуіне әкеледі. Сондай-ақ, кеңістіктік ағындардың санын көбейту құрылғыда көбірек антенналарды қажет етеді, бұл сайып келгенде құрылғының құрылысын қиындатады және оның өндірістік құнын арттырады.

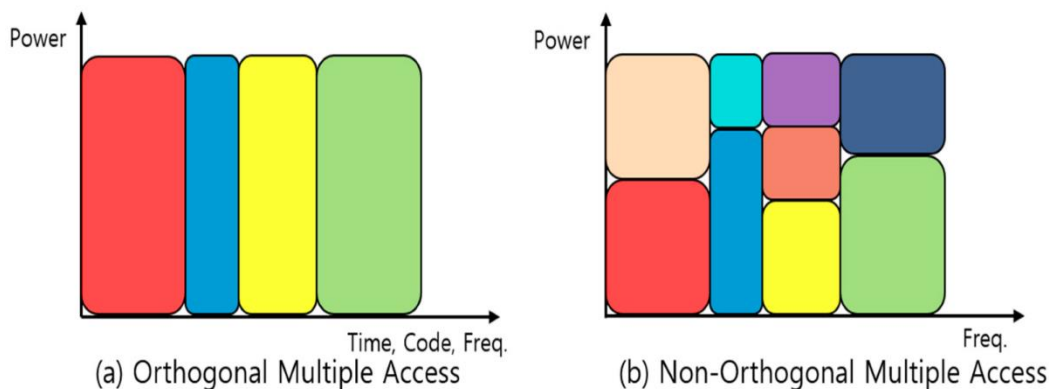
Ортогональды емес көпшілік қолжетімділік әдісі:

Осы тақырып аясында қарастырылған жұмыстардың едәуір бөлігі көп қолжетімділікті және сымсыз желілерде деректерді беру мәселелерін зерттеуге арналған, NOMA-ға қатысты жүргізілген жұмыстар негізінен осы қол жеткізу әдісін аналитикалық және симуляциялық зерттеуге арналған. Олар пайдаланушылардың әртүрлі арна жағдайлары бар сценарийлерде NOMA сымсыз желінің өнімділігін жақсарту алатындығын мәлімдейді. Сонымен қатар, бұл жұмыстар NOMA-ны абстрактілі сымсыз желілерде немесе ұялы желілерде пайдалануды қарастырады. Дегенмен, NOMA-ны Wi-Fi-ға енгізу үшін Wi-Fi желілерінде оның тиімділігі қандай деген сұраққа жауап беру керек. Бұл сұраққа жауап беру үшін тек теориялық зерттеулердің нәтижелеріне сенуге болмайды, өйткені олар NOMA модельдеу кезінде бірқатар болжамдарды пайдаланады. Мысалы, жалпы болжам NOMA-мен қосымша «ақ Гаусс шуы» ретінде берілетін сигналдың кедергісін бағалау болып табылады. Сондай-ақ, жұмыстардың көпшілігінде қабылдағыштағы арна бағасының жетілмегендігінен,

қабылдағыш пен таратқыш генераторлардың жиіліктерінің теңсіздігінен, сонымен қатар уақыт бойынша арна сипаттамаларының өзгеруінен туындаған фазалық шудың әсері ескерілмейді.

NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) сигналдарды қуат бойынша бөле отырып, бір уақытта бір жиілікте жіберуге мүмкіндік береді. NOMA-ны төменгі арнада қолданған кезде, кіру нүктесі бір антеннаның көмегімен көпшілік станцияға жіберуге қабілетті. NOMA-ны жоғары арнада қолданған кезде көпшілік станция бір уақытта таратуды жүзеге асырады және кіру нүктесі антеннаның барлық жіберілген сигналдардың суперпозициясын алады. NOMA-ны қолдану желінің спектрлік тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Алайда, NOMA-ны қолданған кезде қабылдағыштардың күрделілігі, көпшілік станциялар үшін деректерді бөлуге қажетті қосымша функцияларды қолдану арқылы артуы мүмкін. Сонымен қатар, бұл жұмыстар NOMA-ны абстрактілі сымсыз желілерде немесе ұялы желілерде пайдалануды қарастырады. Дегенмен, NOMA-ны Wi-Fi-ға енгізу үшін Wi-Fi желілерінде оның тиімділігі қандай деген сұраққа жауап беру керек. Бұл сұраққа жауап беру үшін тек теориялық зерттеулердің нәтижелеріне сенуге болмайды, өйткені олар NOMA модельдеу кезінде бірқатар болжамдарды пайдаланады. Мысалы, жалпы болжам NOMA-мен қосымша «ақ Гаусс шуы» ретінде берілетін сигналдың кедергісін бағалау болып табылады. Ортогональды көпшілік қол жетімділік (OMA – Orthogonal Multiple Access) әдістерімен салыстырғанда NOMA спектрлік тиімділігінің пайдасын келесі мысалмен көрсетуге болады. Сымсыз байланысқа қосылу құралымен көпшілік станциядан тұратын сымсыз желіні қарастырайық. Сонымен қатар, бұл желіде сигналы басым әлсіреген станция бар. Бұл станция деректерді жоғары басымдықпен жіберуді талап етеді. Осыған байланысты қосылу нүктесі каналда сигналы басым әлсіреген станцияға қызмет көрсету үшін көптеген арна ресурстарын бөледі. Нәтижесінде спектрлік тиімділік төмендейді, өйткені белгілі бір жиілік-уақыт ресурсында арнаның сигналы басым әлсіреуі бар станция үшін аздаған деректер тасымалданады, нәтижесінде жинақталған өткізу қабілеттілігі төмендейді.

NOMA-ны пайдаланған кезде, OMA-дан айырмашылығы, қосылу нүктесі бір жиіліктік-уақыт ресурсында деректерді бірден көпшілік станцияға жібереді, бұл басым арна өшуі бар станцияларға арналған деректерді арнаның төмен өшуі бар станциялар деректерімен біріктіреді. Нәтижесінде NOMA жиіліктік-уақыт ресурстарын тиімдірек пайдалануға әкеледі [11-12]. Спектрлік пайдалану тиімділігін арттырумен қатар, NOMA желінің қамту аймағының шекарасында орналасқан құрылғылардың өткізу қабілеттілігін едәуір арттыруға мүмкіндік береді, арнаның сапасын бағалауға қойылатын талаптарды азайтады және деректерді жеткізгенде кешігуін айтарлықтай төмендетеді. Бұл артықшылықтар NOMA-ны болашақтағы сымсыз желілерде пайдалану үшін перспективті технологияға айналдырады [13-14].



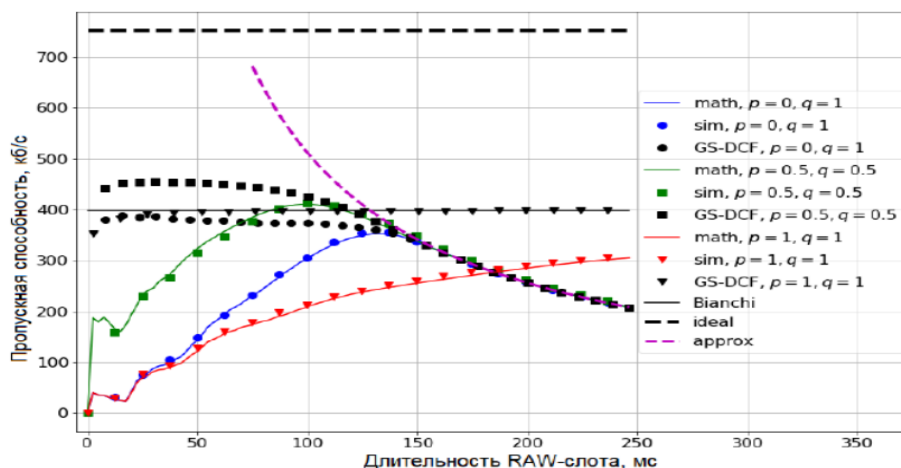
6-сурет – Ортогональды көпшілік қол жетімділік (OMA, а) Ортогональды емес көпшілік қол жетімділік (NOMA, б) арасындағы айырмашылық

Жоғарыдағы 6-суретте ортогональды көпшілік қолжетімділік (OMA) мен ортогональды емес көпшілік қолжетімділік (NOMA) арасындағы айырмашылықтары көрсетілген, әр түрлі пайдаланушыларға арналған ақпарат әр түрлі түске боялған.

NOMA-ның тағы бір артықшылығы, оны басқа көпшілік қол жетімділік әдістерімен бірге пайдалануға болады. Бұл NOMA-ны Wi-Fi және LTE сияқты қолданыстағы сымсыз технологиялармен біріктіруге және оларды осы технологияларда бұрыннан қолданылған қосылу әдістерімен пайдалануға мүмкіндік береді. Мысалы, NOMA TDMA және OFDMA-мен бірге сапалы түрде пайдаланылуы мүмкін [15-16]. Нәтижесінде NOMA-ны кейіннен имплементациялау үшін сымсыз технологияларды стандарттау жөніндегі әртүрлі ұйымдар қарастырады. Мысалы, төртінші буын желілерінде көп пайдаланушылық суперпозициялық ақпараттарды тасымалдау (MUST - Multiuser Superposition Transmission) бар. MUST көпшілік құрылғыларға LTE ресурстық блоктарының құрылымын өзгертпестен OFDMA-да бірдей қосалқы тасымалдаушыларды пайдалануға мүмкіндік береді.

Талдау мен нәтижелер

М станцияларымен сипатталған сценарийді қарастырамыз. Станцияларға 2 МГц арнадағы ең жылдам MCS8 сигнал кодының дизайнын пайдаланып 100 байт кадрларды жіберуді іске асырамыз.



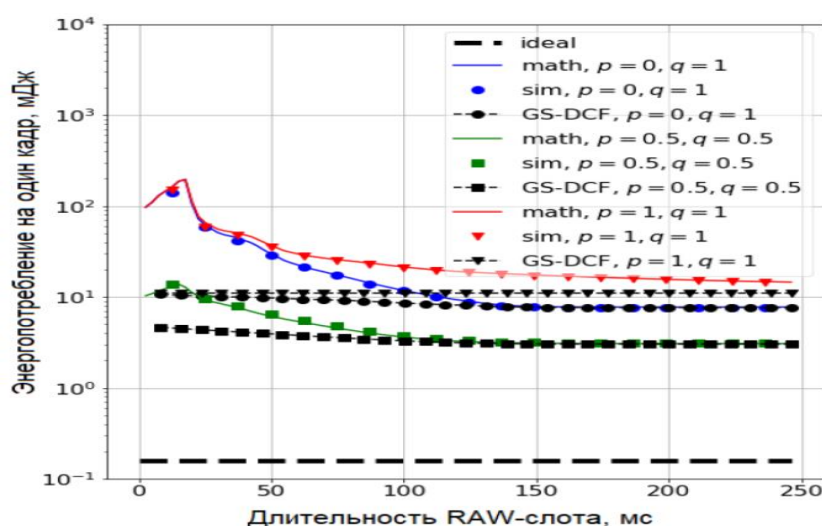
7-сурет – Әзірленген математикалық модель (математика), симуляциялық модельдеу (sim) және әдебиеттегі басқа тәсілдер арқылы алынған $N = 64$ станцияға арналған бір RAW ұяшығының ішінде өткізу қабілеті

Қысқа таңбааралық қорғау интервалдарымен физикалық деңгейде номиналды деректер жылдамдығы $\approx 8,7$ Мбит/с құрайды. RTS/CTS механизмі пайдаланылмайды деп есептейік, сондықтан $T_s = T_c$. RAW ұяшығының ішінде станциялар 1-кестеде берілген арнаға кірудің әдепкі параметрлерін пайдаланады.

1-кесте – Модельдеу опциялары

T_e	$52\mu s$	T_s	$1064\mu s$
Ω_{idle}	$2.9\mu J$	T_c	$1064\mu s$
Ω_{TX}	$160\mu J$	Ω_{RX}	$91\mu J$
τ_{slot}^{max}	$246ms$	RL	7
W_0	15	W_{max}	1023
T_{DATA}	$348\mu s$	T_{ACK}	$240\mu s$
$SIFS$	$160\mu s$	$AIFS$	$SIFS + 3T_e$
U	$1.1V$	I_{TX}	$280mA$
I_{RX}	$100mA$	I_{idle}	$50mA$

Ең алдымен, үлгінің дәлдігін тексерейік. Ол үшін деректерді бір RAW ұяшығы ішінде тасымалдауды қарастырыңыз. 7–9 суреттер RAW ұяшығының ұзақтығына байланысты өткізу қабілеттілігін, жеткізілетін деректер кадрына қуат тұтынуды және жоғалған пакеттердің пайызын көрсетеді. Нәтижелер әзірленген математикалық модель және модельдеу арқылы алынады. Барлық станциялар бір топқа жатады деп болжанады. «Идеал» қисығы бірінен соң бірі соқтығыстарсыз және беру кідіріссіз кадрлардың циклдік берілуіне сәйкес келеді. Қаныққан жағдайда ($p = q = 1$), RAW ұяшығы неғұрлым ұзағырақ болса, өткізу қабілеті соғұрлым жоғары болады, өйткені станциялардың бәсекеге қабілетті терезелерін арттыруға жеткілікті уақыты бар. $\tau_{slot} \rightarrow \infty$ болғанда өткізу қабілеті Бианчи үлгісімен алынғанға жақын болады. Қанықпаған трафик ($p < 1$) жағдайлары үшін өткізу қабілеттілігі 0-ге ұмтылады, себебі $\tau_{slot} \rightarrow \infty$. Өткізу қабілетінің бұл төмендеуі станциялардың RAW ұзақ ұясы τ_{slot} кезінде жіберуге трафиктің болмауына байланысты.

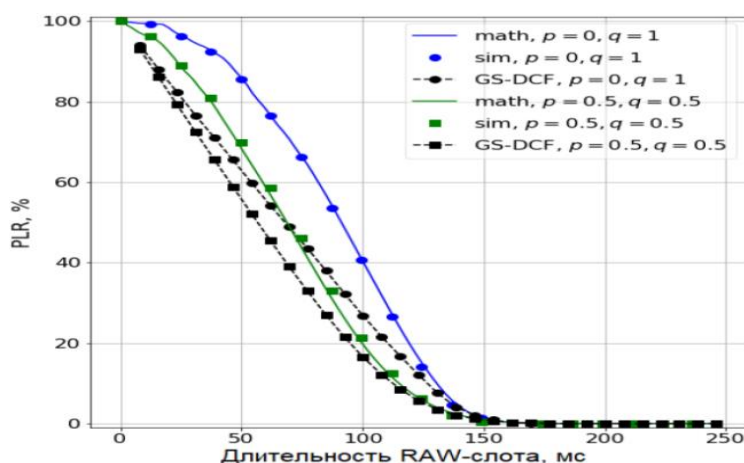


8-сурет – $N = 64$ станциядағы жеткізілетін деректер кадрына қуат тұтыну, әзірленген математикалық модель (математика), симуляциялық модельдеу (sim) және әдебиеттегі басқа тәсілдер арқылы алынған

Қысқа шектеулі қол жеткізу терезесінде 7–9 суреттерде көрсетілген жағдайлар арасындағы өткізу қабілетінің айырмашылығы анық көрінеді, атап айтқанда: $p = q = 0.5$ және $p = 0, q = 1$ —жалпы санның бірдей мәнімен сипатталады. RAW ұяшығының басындағы барлық станциялардағы кезекте тұрған пакеттердің саны), бірақ пакеттердің жарылу

өлшемдерінің әртүрлі таралуымен. $p = 0$, $q = 1$ жағдайында арна үшін жоғары қарамақайшылыққа байланысты өткізу қабілеті төмен болады. RAW слотының ұзақтығы 150 мс-тен асканда, PLR нөлге жақындайды және барлық дерлік пакеттер жеткізіледі. Осылайша, өткізу қабілеттілігі RAW ұясының ұзақтығына бөлінген станциялардағы кезекте тұрған пакеттердің жалпы санына тең. 8-суретте бұл бағалау «шамамен» қисық ретінде көрсетілген. RAW ұяшығының ұзындығы ∞ -ке бейім болғандықтан, жеткізілетін кадрға арналған қуат тұтынуы азаяды. Қысқа RAW ұяшығы үшін жоғары қуат тұтыну пакеттердің берілуіне жол бермейтін жоғары қарамақайшылықтардан туындайды. Басқаша айтқанда, арна үшін үлкен келіспеушілік болған кезде, станция арнаны тыңдау және басқа кадрларды, егер бар болса, қабылдау үшін біраз қуатты тұтынады, бірақ RAW ұясының ұзақтығы станцияның кадрды сәтті жіберуі үшін жеткіліксіз. жоғары тартысқа. Осылайша, RAW ұяшығы кезінде станция қуатты тұтынады, бірақ кадрды жеткізе алмайды және жеткізілген кадрға қуат тұтынуы жоғары. RAW слотының ұзағырақ ұзақтығымен бұл уақыт дау терезесін айтарлықтай ұлғайту, деректерді жіберудің соқтығысу мүмкіндігін азайту және осылайша кадрды жеткізуді қамтамасыз ету үшін жеткілікті. Нәтижесінде жеткізілетін кадрға тұтынылатын қуат азаяды.

RAW ұяшығы неғұрлым ұзағырақ болса, станциялар соғұрлым көп уақыт алады және соғұрлым көп кадрлар жеткізе алады. Осылайша, жоғалған пакеттердің пайызы төмендейді. Өткізу қабілеттілігін арттыратын RAW ұясының ұзақтығы нөлдік PLR қамтамасыз етпейтінін ескеріңіз. Себебі өткізу қабілеттілігін арттыру үшін RAW ұяшығы жиі сәтті тасымалдау әрекеттерімен толтырылуы керек. Сонымен қатар, төмен PLR-ге тек қана тартыстың төмен деңгейімен (сирек берілістер) қол жеткізіледі, мысалы, ұзақ RAW ұясының арқасында. Әдебиеттегі GS-DCF типті үлгілердің ешқайсысы станциялардың әрқайсысында RAW ұяшығының басында кездейсоқ ұзындықтағы пакеттердің жарылысы болған жағдайға арналмағандықтан, $p < 1$ жағдайы үшін нәтижелер: аналитикалық GS-DCF моделінен емес, GS-DCF үлгісін жасау кезінде жасалған барлық болжамдарды қайталайтын модельдеуден алынған.



9-сурет – Әзірленген математикалық модель (математика), симуляциялық модельдеу (sim) және әдебиеттегі басқа тәсілдер арқылы алынған $N = 64$ станцияға арналған RAW ұяшығы кезінде жоғалған пакеттердің пайызы

Қорытындылай келе, барлық қарастырылған өнімділік көрсеткіштері бойынша шектеулі қол жеткізу терезесінің параметрлерін бір уақытта оңтайландыру мүмкін емес екенін атап өтеміз. Дегенмен, әзірленген модельді станциялар бөлінген K топтардың санын өзгерту арқылы қарастырылатын өнімділік көрсеткіштері арасындағы ымыраға келу үшін пайдалануға болады. Атап айтқанда, басқа көрсеткіштер мен өткізу қабілеттілігін тұтынудағы шектеулерді ескере отырып, өткізу қабілеті сияқты тек бір өнімділік көрсеткішін

оңтайландыру мағынасы бар. Өзірленген модель қажетті төмен қуат тұтынуды, жоғары өткізу қабілеттілігін немесе резервтік арна уақытының ең аз мөлшерімен пакетті жоғалту коэффициентін қамтамасыз ететін шектеулі қол жеткізу терезесінің параметрлерін таңдау үшін пайдаланылуы мүмкін. Сондай-ақ модельді кері есепті шешу үшін, атап айтқанда, станциялардың берілген саны үшін резервтелген арна ресурстарының берілген үлесі үшін өткізу қабілеттілігін арттыру үшін пайдалануға болады. Өзірленген үлгілерді пайдалана отырып, шектеулі қол жеткізу терезесі IEEE 802.11ah желілеріндегі арнаға қол жеткізу протоколының маңызды ерекшелігі бола отырып, шын мәнінде кіру нүктесіне келіспеушіліктерді азайтуға және, тиісінше, өткізу қабілеттілігін арттыруға және қуат тұтынуды және пропорцияны азайтуға мүмкіндік беретіні көрсетілген, жоғалған пакеттер. Сонымен қатар, шектеулі қол жетімділік терезесі өте икемді механизм және оның тиімділігі таңдалған параметрлерге айтарлықтай байланысты. Сонымен қатар, бір уақытта өткізу қабілеттілігін арттыратын және сонымен бірге PLR-ді азайтатын мұндай шектеулі қол жеткізу терезесінің параметрлерін табу қиын және тұтыну энергия. Дегенмен, әзірленген үлгілер жиынтығы осы өнімділік көрсеткіштерінің біреуі үшін оңтайландыру мәселесін шешуге мүмкіндік береді, ал басқалары (тұтынылатын арна ресурстарының көлемімен бірге) шектеулер ретінде қарастырылады. Өзірленген тәсілді пайдалану IEEE 802.11ah қосымшасында сипатталғандарды қоса, басқа арналарға көп қатынау әдістерін бағалау үшін, сондай-ақ күрделірек деректерді беру жүйелерін, мысалы, жаңартылатын энергия көздері бар сенсорлық желі немесе гетерогенді желіні зерттеу үшін пайдалы болуы мүмкін. Трафиктің машинадан машинаға өзара әрекеттесуіне және ауыр деректер ағындарына қызмет көрсетеді.

Қорытынды

Мақалада сымсыз байланыс желілерде қолданылатын көпшілік қол жетімділік TDMA, FDMA, OFDMA, SDMA және NOMA технологиялары, олардың негізгі артықшылықтары мен кемшіліктері туралы сөз қозғалды. Сонымен қатар NOMA технологиясы негізінде жатқан механизмдер мен NOMA технологиясы ұсынатын мүмкіндіктер, сондай-ақ оны пайдалану сценарийлері ұсынылды. Болашақта NOMA басқа байланыс технологияларымен үйлесімділігіне байланысты қолданыстағы және болашақ сымсыз жүйелерге біріктірілуі мүмкін. Өйткені NOMA технологиясы TDMA және OFDMA сияқты дәстүрлі жүйелермен үйлесімді болып келеді. Сондықтан NOMA технологиясын қазіргі таңда үшінші буын серіктестік жобасының ұзақ мерзімді даму стандартына (LTE-A) қосу ұсынылып отыр. Атап айтқанда, LTE ресурстық блоктарында (яғни OFDMA қосалқы тасымалдаушылары) ешқандай өзгертулерді қажет етпестен, NOMA принципін пайдалану екі пайдаланушының бір уақытта бір OFDMA қосалқы тасымалдаушысында қызмет көрсетуін қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, NOMA жақында болашақ сандық теледидар стандартына (ATSC 3.0) енгізілді, мұнда технология көп деңгейлі арнаны бөлу мультиплекстеу (LDM) деп аталады. Теледидарлық хабар таратудың спектрлік тиімділігі NOMA принципін қолдану және көпшілік деректер ағындарын қабаттастыру арқылы жақсаратынын ескерсек, жоғарыда келтірілген мысалдар NOMA-ның тек 5G желілері үшін ғана емес, сонымен қатар басқа қолданыстағы және болашақ сымсыз жүйелер үшін де үлкен пайдасын тигізетіні анық.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Степанов С., Степанов М., Цогбадрах А. и др. Распределение и совместное использование ресурсов для передачи пакетного трафика NB IoT через 3GPP LTE // 2019 24-я конференция Ассоциации открытых инноваций (FRUCT) / IEEE. – 2019. С. 422–429.
2. Кузнецов Н.А., Мясников Д.В., Семенихин К.В. Оптимальное управление передачей данных по флуктуирующему каналу с неизвестным состоянием // Журнал техники связи и электроники. 2018. Том. 63, нет. 12. С. 1506–1517.

3. 802.11-2020 - IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks-Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications //ANSI/IEEE Std. 802.11. – 2021.– Feb.
4. Френкил Р., Шварц М. Создание сотовой связи: история проекта AMPS (1971–1983) [История коммуникаций] // Журнал IEEE Communications. – 2010. Том. 48, С. 14–24.
5. Van Duc Nguyen Hans-Peter Kuchenbecker. Intercarrier and intersymbol interference analysis of OFDM systems on time-invariant channels // Personal, Indoor and Mobile Radio Communications / Citeseer. – 2002. P. 1482–1487.
6. WiFi 6 key technologies: OFDMA [Электрондық ресурс]: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/wifi-6-key-technologies-ofdma/thread/577958-869?page=4>
7. Lien Shao-Yu, Shieh Shin-Lin, Huang Yenming et al. 5G new radio: Waveform, frame structure, multiple access, and initial access // IEEE communications magazine. 2017. Vol. 55, no. 6. P. 64–71.
8. Cho Keizo, Hori Toshikazu. Smart antenna systems actualizing SDMA for future wireless communications // Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation Japan / Citeseer. Vol. 4. 2000. P. 1485–1488.
9. Huawei Wi-Fi 6 Fast Speed [Электрондық ресурс]: <https://e.huawei.com/kz/products/enterprise-networking/wlan/wifi-6/details/core-technologies>
10. Ong Eng Hwee, Knecht Jarkko, Alanen Olli et al. IEEE 802.11 ac: Enhancements for very high throughput WLANs // 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications / IEEE. 2011. P. 849–853.
11. Ding Zhiguo, Fan Pingzhi, Poor H Vincent. Impact of user pairing on 5G nonorthogonal multiple-access downlink transmissions // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2015. Vol. 65, no. 8. P. 6010–6023.
12. Islam SM Riazul, Avazov Nurilla, Dobre Octavia A, Kwak Kyung-Sup. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges // IEEE Commun. Surveys Tuts. 2017. – Secondquarter. Vol. 19, no. 2. P. 721–742.
13. Радиодоступ 5G: требования, концепция и технологии // Белая книга, июль 2014 г.
14. Tao Yunzheng, Liu Long, Liu Shang, Zhang Zhi. A survey: Several technologies of non-orthogonal transmission for 5G // China communications. 2015. Vol. 12, no. 10. P. 1–15.
15. Viktor Torgunakov., Vyacheslav Loginov and Evgeny Khorov. A Study of Channel Bonding in IEEE 802.11bd Networks // – 2022. Vol 10, P. 25514–25533.
16. Meredith John M. Study on downlink multiuser superposition transmission for LTE // TSG RAN Meeting. Vol. 67. 2015.

REFERENCES

1. Stepanov S., Stepanov M., Tsogbadrakh A. i dr. Raspredelenie i sovmestnoe ispolzovanie resursov dlya peredachi paketnogo trafika NB IoT cherez 3GPP LTE [Resource Allocation and Sharing for NB IoT Packet Traffic Transmission over 3GPP LTE] // 2019, 24-ya konferenciya Associacii otkrytyh innovacij (FRUCT) / IEEE. 2019. S. 422–429. [in Russian]
2. Kuznetsov N.A., Myasnikov D.V., Semenikhin K.V. Optimalnoe upravlenie peredachej dannyh po fluktuiruyushemu kanalu s neizvestnym sostoyaniem // Zhurnal tehniki svyazi i elektroniki. [Optimal control of data transmission over a fluctuating channel with an unknown state. Zhurnal tekhniki svyazi i elektroniki.] 2018. Vol. 63, no. 12. S. 1506–1517. [in Russian]
3. 802.11-2020 - IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks-Specific

- requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications // ANSI/IEEE Std. 802.11. – 2021. – Feb.
4. Frankil R., Schwartz M. Building Cellular Communications: Sozdanie sotovoj svyazi: istoriya proekta AMPS (1971–1983) [A History of the AMPS Project (1971–1983)] [History of Communications] // IEEE Communications Journal. – 2010. Vol. 48, S. 14-24. [in Russian]
 5. Van Duc Nguyen Hans-Peter Kuchenbecker. Intercarrier and intersymbol interference analysis of OFDM systems on time-invariant channels // Personal, Indoor and Mobile Radio Communications / Citeseer. 2002. P. 1482–1487.
 6. WiFi 6 key technologies: OFDMA [Electronic resource]: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/wifi-6-key-technologies-ofdma/thread/577958-869?page=4>
 7. Lien Shao-Yu, Shieh Shin-Lin, Huang Yenming et al. 5G new radio: Waveform, frame structure, multiple access, and initial access // IEEE communications magazine. 2017. Vol. 55, no. 6. P. 64-71.
 8. Cho Keizo, Hori Toshikazu. Smart antenna systems actualizing SDMA for future wireless communications // Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation Japan / Citeseer. Vol. 4. 2000. P. 1485–1488.
 9. Huawei Wi-Fi 6 Fast Speed [Electronic resource]: <https://e.huawei.com/kz/products/enterprise-networking/wlan/wifi-6/details/core-technologies>
 10. Ong Eng Hwee, Kneckt Jarkko, Alanen Olli et al. IEEE 802.11 ac: Enhancements for very high throughput WLANs // 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications / IEEE. 2011. P. 849–853.
 11. Ding Zhiguo, Fan Pingzhi, Poor H Vincent. Impact of user pairing on 5G nonorthogonal multiple -access downlink transmissions // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2015. Vol. 65, no. 8. P. 6010–6023.
 12. Islam SM Riazul, Avazov Nurilla, Dobre Octavia A, Kwak Kyung-Sup. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges // IEEE Commun. Surveys Tuts. 2017. – Secondquarter. Vol. 19, no. 2. P. 721–742.
 13. Radiodostup 5G: trebovaniya, koncepciya i tehnologii [5G Radio Access: Requirements, Concept and Technologies] // White Paper, July 2014. [in Russian]
 14. Tao Yunzheng, Liu Long, Liu Shang, Zhang Zhi. A survey: Several technologies of non-orthogonal transmission for 5G // China communications. 2015. Vol. 12, no. 10. P. 1-15.
 15. Viktor Torgunakov., Vyacheslav Loginov and Evgeny Khorov. A Study of Channel Bonding in IEEE 802.11bd Networks // – 2022. Vol 10, P. 25514 – 25533.
 16. Meredith John M. Study on downlink multiuser superposition transmission for LTE // TSG RAN Meeting. Vol. 67. 2015.