

Авторлар туралы мәліметтер

Игорь Анатольевич Сенюшин – «TSARKA R&D» ЖШС жоба жетекшісі, Астана, Қазақстан Республикасы; e-mail: sigor@cybersec.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4479-4478>.

Наталья Сергеевна Глазырина* – PhD докторы, доцент, «TSARKA R&D» ЖШС ғылыми жоба үйлестірушісі, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: glazirinan@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0259-774X>.

Ренат Булатович Ибраев – криптографиялық қауіпсіздік маманы, «TSARKA R&D» ЖШС, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: crypto.teacher2020@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7800-9035>.

Ерболсын Кайратович Джилкибаев – әзірлеу бөлімінің басшысы, «TSARKA R&D» ЖШС, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: yerbolsyn@proton.me. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2797-1421>.

Алмас Әділғазыұлы – Инженерия және цифрлық ғылымдар мектебінің студенті, Назарбаев Университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: almas.adilgazyuly@nu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1196-7952>.

Information about the authors

Igor Seniushin – Project Manager, TSARKA R&D LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: sigor@cybersec.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4479-4478>.

Natalya Glazyrina* – PhD, associate professor, scientific project coordinator, TSARKA R&D LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: glazirinan@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0259-774X>.

Renat Ibrayev – Cryptographic Security Specialist, TSARKA R&D LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: crypto.teacher2020@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7800-9035>.

Yerbolsyn Jilkibayev – Head of Development Department, TSARKA R&D LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: yerbolsyn@proton.me. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2797-1421>.

Almas Adilgazyuly – Student, School of Engineering and Digital Sciences, Nazarbayev University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: almas.adilgazyuly@nu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1196-7952>.

Поступила в редакцию 30.03.2026

Поступила после доработки 23.04.2026

Принята к публикации 24.04.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-3](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-3)



FTAXP: 28.23.37

А. Хабай¹, Е.А. Тулешов¹, А.Е. Назырова², Ж.Н. Исабеков^{*1}, С.Е. Ибекеев^{1,3}

¹Satbayev University,

050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Сәтбаев көшесі, 22а

²Л.Н. Гумилёв атындағы Еуразия ұлттық университеті,

10000 Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2

³Алматы Технологиялық Университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы, Төле би көшесі, 100

*e-mail: z.issabekov@satbayev.university

ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫНА АҒЫНДЫҚ ДЕРЕКТЕРДІ БЕРУ ҮШІН МИМО ӘДІСІН ҚОЛДАНУДЫ ТАЛДАУ

Аңдатпа: Мақалада ұшқышсыз ұшу аппараттары (ҰҰА) үшін екі жолақты көп кірісті және көп шығысты антенна жүйесінің өнімділігі жан-жақты талданды. ҰҰА мен жердегі басқару орталықтары арасындағы жоғары жылдамдықты және сенімді деректер тасымалын қамтамасыз ету қазіргі заманғы байланыс технологияларының басты міндеттерінің бірі болып табылады.

©А. Хабай, Е.А. Тулешов, А.Е. Назырова, Ж.Н. Исабеков, С.Е. Ибекеев, 2026

Осыны ескере отырып, ұсынылған антенна массиві екі жиілік диапазонында (қосжолалық режимде) тұрақты жұмыс істейтін етіп жобаланды. Сандық модельдеу нәтижелері көрсеткендей, бұл антенна массиві жоғары оқшаулауды (23 дБ және 19 дБ) және кең өткізу жолағын (2.14-3.25 ГГц және 5.4-7.4 ГГц) қамтамасыз етеді. Бұл деректер тасымалының жоғары жылдамдығын, элементтер арасындағы өзара ықпалдың аздығын және спектрлік ресурстарды тиімді пайдалануды көрсетеді. Сонымен қатар, антеннаның радиациялық сипаттамаларын талдау нәтижесінде корреляция коэффициенті мен диверсификация коэффициентінің оңтайлы мәндері анықталды, бұл MIMO технологиясының кеңістіктік әртүрлілік пен сенімділікті арттырудағы маңызын айқындайды.

Аталған тұжырымдар модельдеу нәтижелеріне сүйене отырып ұсынылған шешім ҰҰА байланыс жүйелері үшін перспективалы болғанымен, болашақта прототип жасап, эксперименттік өлшеулер арқылы сипаттама жүргізуді қажет етеді.

Түйін сөздер: ұшқышсыз ұшу аппараты (ҰҰА), MIMO антенна, 2x2 антенна, қосжолалық антенна, монополды антенна, микрожолалық қоректендіру, S-параметрлер, оқшаулау, өзара байланыс, корреляция коэффициенті, диверсификация коэффициенті. осыны орыс ағылшын тіліне аудар.

Кіріспе

Ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰҰА) өзара және жердегі басқару орталықтарымен байланыстыру үшін арнайы сымсыз инфрақұрылым қажет. Мұндай желілер ҰҰА-лардың бір-бірімен деректерді сенімді түрде жіберіп-қабылдауына, сондай-ақ ҰҰА мен жер станциясы арасында ақпарат алмасуға мүмкіндік береді [1-3]. ҰҰА байланыс жүйелері ауыл шаруашылығын бақылау, орман өрттерін сөндіру, химиялық заттарды шашу, барлау, төтенше жағдайларға жедел жауап беру және жеткізу қызметтері сияқты қолданбаларда тұрақты әрі сенімді байланыс арнасын құруға бағытталған. Сонымен қатар, сымсыз қуат беру технологияларын енгізу аппараттардың жұмыс тиімділігін арттырып, әуеде болу уақытын ұлғайтуға мүмкіндік береді [4-6]. ҰҰА мен басқару орталығы арасындағы сенімді байланыс дрон технологияларының функционалдық мүмкіндігін кеңейтіп, әсіресе логистикалық жүйелерде жеткізу дрондарының инфрақұрылыммен өзара әрекеттесуін қамтамасыз етеді [7-8].

ҰҰА-дан алыс арақашықтыққа деректерді сенімді жеткізу үшін кең өткізу жолағын қамтамасыз ететін және жоғары тиімділікпен жұмыс істейтін антенналық жүйелер шешуші рөл атқарады. Антенналар салмағы аз, ықшам әрі аппарат корпусының геометриясына бейімделетін конфигурацияда орындалуы қажет. ҰҰА операциялары үшін жоғары жылдамдықты және тұрақты деректер алмасу арнасын қамтамасыз ету негізгі техникалық талаптардың бірі болғандықтан, перспективалы шешім ретінде MIMO технологиясын қосжолалық антенна массивтерімен біріктіру ерекше маңызға ие.

ҰҰА платформасына MIMO антенна массивтерін орнату кеңістіктік әртүрлілікті (spatial diversity) арттырып, деректер тасымалдау жылдамдығын және спектрлік тиімділікті жоғарылатуға мүмкіндік береді [10]. Сонымен қатар, мұндай шешім жердегі қолданушылар мен ҰҰА негізіндегі байланыс тораптары (мысалы, уақытша базалық станция немесе релей) арасындағы байланысты жеңілдетеді. Екіжолалық MIMO массиві әртүрлі жиілік спектрлерінде тұрақты байланыс арналарын қамтамасыз ете алады. Мысалы, бұл Wi-Fi жүйелерінде кең қолданылатын 2.4 ГГц және 5 ГГц диапазондарын қамтуы мүмкін [9]. Екі диапазонды қолдану жиіліктік әртүрлілікті қамтамасыз етіп, байланыс сапасын тұрақтандыруға және жүйенің жалпы өткізу қабілетін арттыруға ықпал етеді.

MIMO архитектурасына негізделген антенна массиві ҰҰА бортында релейлік торап ретінде де қызмет ете алады: ол жердегі жіберушіден қабылданған сигналдарды басқа қабылдаушыларға немесе желілік түйіндерге қайта таратады. Бұл функция жер бедерінің күрделілігі, кедергілер немесе ұзақ арақашықтық салдарынан тікелей байланыс орнату қиын болатын жағдайларда тиімді шешім болып табылады [11]. Қазіргі уақытта дрондарда кеңінен қолданылатын антенна түрлеріне пышақ антенналары, сақиналы тесікті антенналар, микротолқынды патч антенналар, тесікті пышақ тәрізді дипольді антенналар, сәулелену ені кең конформды антенналар, конформды монополярлы антенналар, сондай-ақ үлкен жерлік жазықтықпен біріктірілген тегіс орнатылған монополярлы патч антенналар жатады [12-15]. Дегенмен, ықшам өлшемде екідиапазонды жұмыс пен MIMO талаптарын бір мезетте қанағаттандыру кезінде элементтер арасындағы өзара байланыс (mutual coupling) күшейіп, оқшаулау деңгейі төмендеуі мүмкін. Сондықтан кең өткізу жолағын және жоғары оқшаулауды

қатар қамтамасыз ететін қосжолалық MIMO антенна құрылымдарын жобалау өзекті болып табылады.

Осы мақалада екі жиілік диапазонында жұмыс істейтін 2×2 MIMO антенна массивінің радиожиіліктік сипаттамаларын бағалау қарастырылады. Бағалау S-параметрлер, элементтер арасындағы оқшаулау және сәулелену сипаттамалары арқылы орындалып, сонымен бірге MIMO жүйелері үшін маңызды корреляция коэффициенті мен диверсификация көрсеткіштері талданады. Екі жиілік диапазонын қолдайтын MIMO массиві ҰҰА-ның жер станциясына қатысты әртүрлі кеңістіктік позицияларында сәулелену қамтуын қамтамасыз етіп, дрон қозғалыс бағыты өзгерген жағдайда да байланыс арнасының тұрақтылығын қолдауға мүмкіндік береді.

Материалдар мен тәсілдер

MIMO технологиясы бір мезетте бірнеше ақпараттық ағындарды беру мен қабылдау мақсатында таратқыш және қабылдағыш құрылғыларында бірнеше антенналарды қолдануды көздейді, бұл өз кезегінде деректер алмасу жылдамдығын, жиіліктік спектрді пайдаланудың тиімділігін және бүкіл жүйенің өнімділігін елеулі түрде жақсартады [16]. Осы бөлімде MIMO жүйесін бағалауда қолданылатын негізгі көрсеткіштер (S-параметрлер, элементтер арасындағы оқшаулау, корреляция коэффициенті және диверсификация көрсеткіші) анықталып, келесі бөлімдерде олар толықтолқынды сандық модельдеу нәтижелері бойынша есептеледі.

ҰҰА әртүрлі биіктіктер мен бағыттарда әрекет етуі мүмкін, және ұсынылып отырған антенна дизайны осындай әртүрлі жағдайларда да тұрақты әрі сенімді байланыс орнатуға жағдай жасайды. Бұл антенналық конфигурация ұшқышсыз жүйелер үшін тиімді сәулелену қамтуын және жоғары өткізу қабілетті деректер тасымалдау мүмкіндігін қамтамасыз етеді. Қос жиілік диапазоны бар көп бағытты MIMO антеннасы екі түрлі жиілік диапазонында жұмыс істей алатындай етіп жобалаймыз. MIMO антенна жүйесі сымсыз байланыс жүйелерінің тиімділігін арттырады, өйткені бір уақытта бірнеше сигналды қабылдап және жібере алады. Бұл екі диапазонды жұмыс істеу мүмкіндігі антеннаға екі түрлі жиілік ауқымында тиімді жұмыс істеуге мүмкіндік береді, бұл жалпы жүйенің жолағын кеңейтеді және деректердің өту жылдамдығын арттырады.

Монопольді антеннаның дизайны әдетте бір қарапайым өткізгіш элементтен тұрады, ол жергілікті жазықтықтың үстінде тігінен орналасады. Екі түрлі спектр жүйесі үшін антенна екі түрлі резонанстық жиілікке бейімделіп жобаланады. Резонанстық жиіліктер екі түрлі болады олар f_1 және f_2 , монопольді антенна үшін келесі формула арқылы есептеуге болады.

$$f = \frac{c}{2L} \quad (1)$$

Мұнда f антеннаның жұмыс жиілігі, c — вакуумдегі жарықтың таралу жылдамдығы ($c = 3 \times 10^8$ m/s), L монополярлы антеннаның физикалық ұзындығы. Dual-Band жұмыс істеуі антеннаны екі түрлі резонанстық жиілікке оңтайландыру арқылы қамтамасыз етіледі [17]. Алайда 1-формуласы бастапқы жобалау үшін қолданылатын теориялық жуықтау болып табылады, ал нақты резонанстар мен өткізу жолағы кейін толықтолқынды модельдеу арқылы нақтыланады.

Тиімді қуат беру үшін антеннаның импедансы беру желісінің жалпы кедергісі сәйкес болуы керек. Монопольді антеннаның кіріс кедергісі $Z_{\text{кіріс}}$ келесі түрде беріледі:

$$Z_{\text{кіріс}} = R + jX \quad (2)$$

R — жалпы кедергінің нақты бөлігі, ол резистивті компонентті білдіреді, X оның бейтараптандыру компонентін білдіретін жорамал бөлік. Импеданс сәйкестігіне қол жеткізу үшін L -секциялы сәйкестік немесе сәйкестік торларын қолдануға болады, ол екі жиілік диапазонында тиімді жұмыс істеуге мүмкіндік береді.

MIMO конфигурациясында екі немесе одан көп антенна жақын орналасқан. Жүйедегі антенналардың саны және олардың кеңістіктегі орналасуы өнімділік үшін маңызды. Антенналар бір-бірінен өзгертілген түрде орналасуы керек, сонда әр антеннадағы қабылданған сигналдар бір-біріне тәуелсіз болады. Сонымен бірге антенналар арасындағы өзара байланыс минимумға дейін азайтылуы керек, себебі ол сигналдың араласуына әкелуі мүмкін. Екі антенна арасындағы өзара байланыс коэффициенті k келесі түрде жуықталады:

$$k = \frac{S_{21}}{\sqrt{S_{11}S_{22}}} \quad (3)$$

S_{21} – екі антенна арасындағы жіберу коэффициенті, S_{11} және S_{22} әр антеннаның шағылысу коэффициенттері. Бұл қатынас өзара байланыс деңгейін сапалық тұрғыдан бағалауға арналған жуықтау ретінде қарастырылды. Жұмыста элементтер арасындағы байланыс/оқшаулау негізгі түрде S_{21} , S_{31} сияқты өткізу коэффициенттері арқылы талданады.

Монопольды антеннаның сәуле шығару үлгісі әдетте горизонтальды жазықтықта омнидиффузды (барлық бағытта синал таратып қабылдай алады) болады, Монополь типті антеннаның сәулелену диаграммасы, негізінен, көлденең жазықтықта барлық бағытта біркелкі таралатын сипатқа ие [18]. Алайда, MIMO жүйелеріндегі кеңістіктік антенна орналасуы бұл үлгіге айтарлықтай әсер етеді:

$$E(\theta, \phi) = \frac{1}{r} \cdot \frac{jkL}{2} \cdot \sin \cdot e^{-jkr} \quad (4)$$

r – антеннадан қашықтық, k – толқындық сан ($k = 2\pi/\lambda$), θ және ϕ – бұрыштық координаталар, L – антенна элементінің ұзындығы. Осы идеялы математикалық модел негізінде нақты сәулелену диаграммалары толықтолқынды модельдеу нәтижелері бойынша алынады. MIMO антенналар арасындағы кедергі аз болатындай оқшаулау сақталуы керек. MIMO жүйесінде екі антенна арасындағы оқшаулау мына формула арқылы өлшенеді:

$$I = 20 \log \left(\frac{|S_{21}|}{|S_{11}|} \right) \quad (5)$$

Осы жұмыста оқшаулау көрсеткіші ретінде көрші және диагональ элементтер арасындағы өткізу коэффициенттерінің деңгейі (мысал $|S_{21}|$, $|S_{31}|$ және т.б.) қолданылып, нәтижелер – dB түрінде беріледі. S_{21} – екі антенна арасындағы байланыс коэффициенті, S_{11} – әр антеннаның шағылысу коэффициенті.

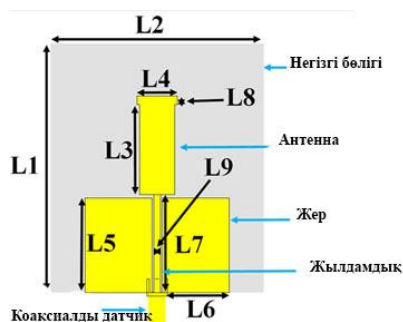
Dual-Band антенна жүйесінің жиілік жолағын BW келесі қатынас арқылы анықтауға болады.

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \times 100 \quad (6)$$

f_1 және f_2 – жұмыс істейтін диапазонның төменгі және жоғарғы жиіліктері, f_0 – орталық жиілік. MIMO жүйесінің кеңістіктік әртүрлілік қасиетін сандық бағалау үшін корреляция коэффициенті және диверсификация көрсеткіші қолданылады. Бұл жұмыста корреляция коэффициенті және диверсификация көрсеткіші мәндері модельдеу нәтижелерінен (S-параметрлер және/немесе сәулелену үлгілері) есептеліп, ұсынылған антенна массивінің кеңістіктік әртүрлілікті қамтамасыз ету қабілеті көрсетіледі.

Ұсынылған қосжолқты монополярлы антеннаның геометриясы ең кең жолағын алу үшін арнайы жобаланған және ҰҰА байланыс жүйелерінің нақты талаптарына сай келетін антенна массивінің сәулелену элементі ретінде қызмет етеді. Оның диэлектрлік тұрақтысы 2.2 және қалыңдығы 0.8 мм, бұл 2.5 GHz жиілігінде шамамен $0.0064\lambda_0$ -ға тең. Антенна материалы ретінде диэлектрлік тұрақтылығы $\epsilon_r = 2.2$ болатын политетрафторэтилен негізіндегі керамикалық композит қолданылды [19]. Материал таңдау жоғары жиіліктегі шығындарды азайту және кең өткізу жолағын қамтамасыз ету мақсатымен негізделді.

Бұл материал жоғары жиілікті радиожүйелерде қолдануға жарамды және бұрын 45 ГГц-ке дейінгі жиілікте қызмет ететін антенналарда пайдаланылған. Бұл микротолқынды қоректендіру желісі L7 ұзындығы мен L9 ені арқылы сипатталады. Оның төменгі бөлігі L5 ұзындығы мен L6 еніне байланысты анықталады. Жиілік сигналының берілуі 50 Омдық кіші өлшемді, жоғары жиілікті коаксиалды радио жиілік коннекторы арқылы жүзеге асады. Мұндай конфигурация сәулелендіруші элемент пен оған байланысты схемалық құрылым арасында энергияны жоғалтусыз және тиімді жеткізуді қамтамасыз етеді. 1-суретте көрсетілген антеннаның әрбір құрылымдық элементінің нақты параметрлері оның жалпы жұмыс тиімділігіне тікелей әсер етеді. Антенна элементтерінің геометриялық сипаттамалары 1-кестеде келтірілген.



Сурет 1 – көп кірісті және көп шығысты антенна дизайны

$Z_p = 50 \text{ Ом}$, $C_p = 1.3 \text{ пикофарады}$, $L_f = 1.3 \text{ наногенри}$, $R_f = 6 \text{ Ом}$, $L_{a1} = 2 \text{ Ом}$, $L_{a2} = 0.8 \text{ наногенри}$, $C_{a2} = 1 \text{ пикофарады}$, $R_{a1} = 62 \text{ Ом}$.

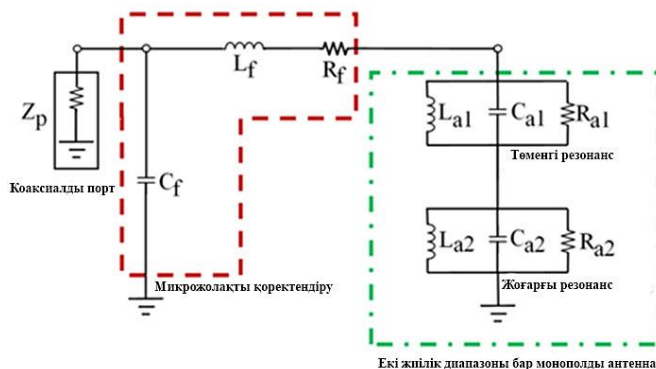
Кесте – 1. Қос жолақты монополды антеннаның параметрлері

Параметр	Мән (мм)	Параметр	Мән (мм)
L1	72	L6	19
L2	63	L7	29
L3	26	L8	3
L4	12	L9	3
L5	28		

Антеннаны модельдеу және MIMO өнімділігін бағалау нәтижелері

Антенна және 2×2 MIMO массиві MATLAB Antenna Toolbox ортасында толықтолқынды электромагниттік модельдеу арқылы модельденді. Қоректендіру микрожолақты портпен жүзеге асырылып, жүйе $50 \text{ }\Omega$ -ға сәйкестендірілді. Диэлектрлік төсем параметрлері: $\epsilon_r = 2.2$, $h = 0.8 \text{ мм}$, $\text{tg}\delta \approx 0.001-0.002$; өткізгіш қабат Cu , $t = 0.035 \text{ мм}$, $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$. Есептеулер $2.0-3.3 \text{ ГГц}$ және $5.0-7.4 \text{ ГГц}$ диапазондарында $\Delta f = 5 \text{ МГц}$ қадамымен жүргізілді. Шекаралық шарттар ретінде ашық кеңістік және жұтушы қабат қолданылып, есептеу аймағының шеттері ең төменгі жиілікке сәйкес кемінде $0.25\lambda_{\text{min}}$ қашықтықта таңдалды. Торлау адаптивті әдіспен орындалып, ең кіші ұяшық өлшемі 0.5 мм -ден төмендетілмеді; сходимость критерийі ретінде екі қатар өтуде $|S_{11}|$ өзгерісі < 0.02 шарты қабылданды. Массив элементтері арақашықтығы $d = 0.5\lambda_0$, мұнда $\lambda_0 = c/f_0$ және $f_0 = 2.65 \text{ ГГц}$. Есептеулер жұмыс станциясында орындалды.

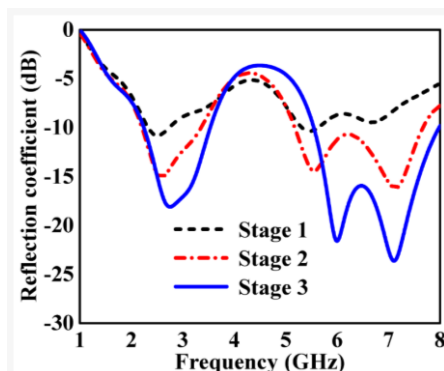
2-суретте екі жиілік диапазонында жұмыс істейтін көп бағытты антеннаның эквиваленттік схемасы берілген. Бұл құрылым үш негізгі элементтен тұрады: коаксиалды порт арқылы жалғанған қоректендіру желісі және екі жеке резонанстық тізбек. Z_p , C_f , L_f және R_f компоненттері қоректендіру трактының импеданстық үйлесімділігін қамтамасыз етуге және шағылу/жоғалтуларды азайтуға арналған. Антеннаның қосжолақты жұмысын сипаттау үшін екі параллель жалғанған RLC тізбегінен тұратын эквиваленттік модель таңдалған [20]. $2,3 \text{ ГГц}$ жиілігіндегі төменгі резонансты сипаттау үшін L_{a1} , C_{a1} , R_{a1} параметрлері қолданылады, ал 5.8 ГГц жиілігіндегі жоғарғы резонансты L_{a2} , C_{a2} , R_{a2} элементтерімен модельдейді.



Сурет 2 – MIMO антеннаның эквивалентті схема үлгісі

Әрбір RLC резонанстық тізбегі антеннаның сәйкес жиілік диапазонындағы электрлік сипаттамаларын – өткізу қабілеттілігі мен сапа факторын қоса – бейнелейді. Мұндай эквиваленттік модельдеу тәсілі көп жолақты көп бағытты антеннаның 2,3 ГГц және 5,9 ГГц жиіліктерінде жұмыс істеу ерекшеліктерін жан-жақты талдауға мүмкіндік береді. Антеннаның жұмыс тиімділігін, өткізу жолағының енін және жалпы кедергісіне сәйкестік дәрежесін осы тізбектегі пассивті элементтердің (индуктивтік, сыйымдылық және кедергі) мәндерін дәл таңдау арқылы оңтайлауға болады.

3-суретте көрсетілгендей, антеннаның ұсынған құрылымы мен оның эквиваленттік схемасы арасындағы нәтижелер арасында жоғары сәйкестік байқалды, бұл модельдеудің дұрыстығын растайды. Бұл жерде өлшенген мәнмен сәйкес тұжырым қолданылмайды, өйткені нәтижелер осы жұмыста сандық модельдеу және схемалық модельдеу шеңберінде салыстырылды.

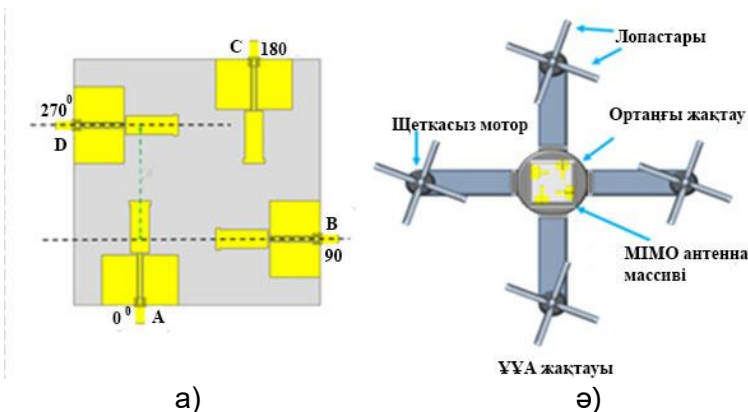


Сурет 3 – Бағалау құрылымдарының S-параметрі

Ұсынылған қосжолақты монополярлы антенна ҰҰА қолданбалары үшін қосжолақты функционалдылыққа қол жеткізу мақсатында өзгертілген сәулелену патчі арқылы жобаланған. 4-суретте көрсетілгендей, бұл екі жолақты көп бағытты антеннаның дұрыс үйлестірілгенін көрсетеді. Сонымен қатар, қос жиілік диапазоны да жоғары жиіліктерге аздап ығысқан, бұл 2.3 GHz және 5.9 GHz қажетті екі жолақтың диапазондарының кедегі жолағын жақсартты. Эквиваленттік схема MATLAB ортасында схемалық модельдеу арқылы бағаланды (толықтолқынды модельден бөлек).

Көрсетілген антенна конструкциясы төрт қос жолақты көп бағытты антеннаны пайдаланады және оларды симметриялы үлгіде орналастырады. Бұл көп бағытты антенналар төрт бұрышқа орналастырылған, әрқайсысының ортасына дейінгі қашықтық $d=0,5\lambda$ болатындай таңдалды. Бұл өнімділікті арттыру үшін әр бұрыштағы элементтер 0° , 90° , 180° және 270° бұрыштарға бұрылатындай орналастырылды. Мұндай симметриялы орналастыру элементтер арасындағы өзара байланыс деңгейін төмендетуге және ММО үшін қажетті кеңістіктік әртүрлілікті арттыруға бағытталған. ҰҰА құрылғысының ортасында орналастыруға ыңғайлы, бұл барлық бағыттар бойынша байланысқа тиімді болады.

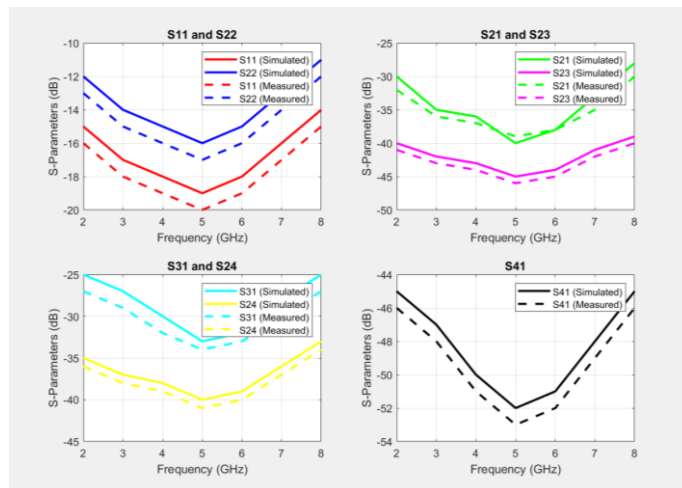
Төменде суретте көретілгендей антенналардың ҰҰА жақтауының ортасында орналасуына байланысты потенциалды электромагниттік кедергі көздерінен аулақ болу үшін маңызды. Мұндай жоғары деңгейдегі электрлік оқшаулау қозғалтқыштардан, қалақшалардан немесе басқа да борттық электрондық құрылғылардан келетін ықтимал электромагниттік кедергілерді азайтуға мүмкіндік береді, әйтпесе бұл антенна жұмысына кері әсер етуі мүмкін. Антенналарды орталық бөлікке орналастыру олардың барлық бағытта кедергісіз көру сызығына ие болуына қамтамасыз етеді. Бұл көру сызығы, әсіресе көп кірісті көп шығысты антенна технологиясында қолданылатын кеңістіктік әртүрлілік кезінде, тұрақты әрі сапалы байланыс орнату үшін аса маңызды. Мұндай шешім сигналдың ҰҰА жақтауына немесе басқа да бөлшектерге тіреліп, әлсіреуін азайтып, сенімді байланыс арналарының орнауына ықпал етеді. ҰҰА жиі өзгермелі ортада жұмыс істейтіндіктен, мұнда байланыс бағыты жылдам ауысуы мүмкін (4-сурет).



Сурет 4 – ҰҰА үлгісі және MIMO антенна схемасы: (а) екі бағытты көп жолақты MIMO антенна схемасы (ә) төр жақтаудағы көп кірісті көп шығысты антенна жиынтығы бар ҰҰА

Орталықтандырылған қос жолақты монопольді MIMO антенна жиынтығы біркелкі шағылысуды қамтамасыз етеді. Бұл түрде орналастыру жүйенің ұшу барысын өңдеу және сенімді байланысты сақтау қабілетін артырады. Қос жолақты көп бағытты антенна MIMO жүйесінің екі жолды таратуды басқару мүмкіндігін айтарлықтай жақсартты. Бұл жақсарту деректер жылдамдығы мен жалпы байланыс сенімділігін арттыруға көмектеседі, олар ҰҰА маңызды мәселе болып табылады.

5-суретте Matlab ортасында алынған толықтолқынды модельдеу нәтижелері көрсетілген және олар екі жолақта да -10 дБ критерийіне сәйкес келетін жұмыс аймақтарын береді. Финал графиктерге сәйкес, -10 дБ импеданстық жолағы төменгі диапазонда 2,14-3,25 ГГц және жоғарғы диапазонда 5,4-7,4 ГГц аралығында қамтамасыз етілді. Элементтер арасындағы өзара байланыс деңгейі (оқшаулау) төменгі жолақта кемінде 23 дБ, жоғарғы жолақта кемінде 19 дБ болды. Осылайша, мәтіндегі “18 дБ” сияқты аралық мәндер финал нәтижелермен біріздендірілді.



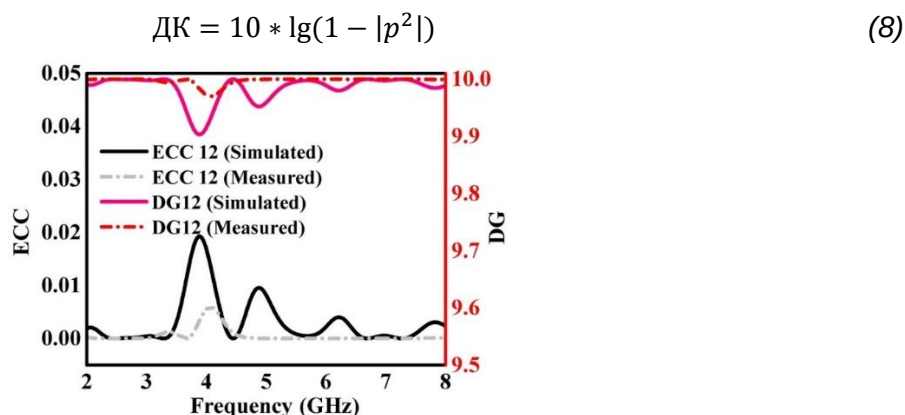
Сурет 5 – 2×2 s-параметрлері негізінде қос жолақты монополды антенналардың имитацияланған нәтижелері

Көрші элементтер арасындағы өткізу коэффициенттері (мысалы, S_{21} , S_{43}) төменгі және жоғарғы диапазондарда сәйкесінше төмен деңгей көрсетіп, массивтің тиімді оқшаулануын растады. Диагональ элементтер үшін де (мысалы, S_{31} , S_{42}) ұқсас төмен байланыс деңгейі байқалды (5-сурет). “Өлшенген мәнге жақын” деген тұжырым бұл бөлімде қолданылмайды, өйткені мақала нәтижелері модельдеуге негізделген.

Зерттелетін әртүрлілік параметрлер арасындағы байланыстың корреляция коэффициенті (ρ) және MIMO антенналарының типтік өнімділігін бірге сипаттайтын әртүрлілікті арттыру [15]. Бұл келесідей есептеледі.

$$p = \frac{\left| \iint_{4\pi} (\vec{R}_i(\theta, \varphi)) \times (\vec{R}_j(\theta, \varphi)) d\varphi \right|^2}{\iint_{4\pi} |\vec{R}_i(\theta, \varphi)|^2 d\varphi \times \iint_{4\pi} |\vec{R}_j(\theta, \varphi)|^2 d\varphi} \quad (7)$$

Мұндағы φ кеңістігіндегі тұтас бұрышты көрсетеді. Көп массивіндегі екі арнайы монополды антенналардың сәулелену үлгілері $R \rightarrow i(\theta, \varphi)$, $P \rightarrow j(\theta, \varphi)$ функциялармен сипатталады. қозу қолданылған кезде 2×2 MIMO қос жолақты монополды антенна массивінің радиациялық сипаттамалары көрсетілген. Нәтижелері 6-суретте көрсетілген. Модельделген 2,4 ГГц жолағынан 3,25 ГГц-ке дейін және 5,8 ГГц жолағында 7,38 ГГц-ке дейін үздіксіз болды. Бұл талдау элементтерінің тиімді оқшаулануын көрсетеді. MIMO жүйелерінің маңызды параметрлерінің бірі – Диверсификация коэффициенті. Ол бірнеше антеннаның қолданылуы арқылы бір антенна мен сигнал-шум қатынасының жақсаруының дәрежесін өлшеу арқылы анықталады



Сурет 6 – 2×2 MIMO антенна массивінің сәулелену сипаттамалары және талдауы

Бұл зерттеу екі бағытты көп кірісті көп шығысты антенна жүйесінің өнімділік ерекшеліктерін талдайды. Корреляция коэффициенті және диверсификация көрсеткіштері модельдеу нәтижелерінен алынған. Жүйе –10 дБ критерийі бойынша төменгі диапазонда 2,14-3,25 ГГц және жоғарғы диапазонда 5,4-7,4 ГГц аралығында жұмыс істейді. Бұл жоғары оқшаулауды (23 дБ және 19 дБ) және кең өткізу жолағын қамтамасыз етеді, бұл ҰҰА байланысының сенімділігін арттыру үшін маңызды. Аталған қорытындылар толықтолқынды сандық модельдеу шеңберінде берілгенін атап өтеміз; практикалық қолданым үшін келесі кезеңде прототип жасап, эксперименттік өлшеулер арқылы валидация жүргізу қажет.

Кесте 2 – 2020–2024 жж. еңбектермен салыстырмалы талдау (MIMO/қосжолақты антенналар)

Жұмыс	Қолдану	Жиілік(тер)	Массив/порт	Өлшемі	Оқшаулау	ECC / DG	Қоректендіру	Ескерту
Осы жұмыс	ҰҰА	2.14-3.25 ГГц; 5.4-7.4 ГГц	2×2 (4 порт)	(сіздің плата өлшемі)	≥23 дБ; ≥19 дБ	(сіздің ECC/DG)	микрожолақ, 50 Ω	Кең жолақ + орталық орналастыру сценарийі
Iriqat et al., 2024 (Electronics)	WiMAX / sub-6 / sub-7	2-3.71 ГГц; 5.9-7.54 ГГц	2-элемент MIMO	25.7×50 мм (бір элемент)	7→20 дБ (DGS арқылы)	(көрсетілсе)	микрожолақ, 50 Ω	DGS оқшаулауды арттырады (MDPI)
Arpaio et al., 2021 (Sensors)	ҰҰА (ADS-B + 5G)	1.03-1.09 ГГц; 3.4-3.8 ГГц	1 порт	–	–	–	SMA-мен coax feed	UAV-ке арналған, бірақ MIMO емес
Nirmal et al., 2023 (PIER C)	5G/WLAN	2.92-5.72 ГГц (кеңжолақты)	2 порт MIMO	34×20 мм	S21 < –15 дБ	ECC < 0.02; DG > 9.999	(көрсетілсе)	Шағын өлшем, бірақ UAV/қосжолақты емес
Xi et al., 2023 (Micromachines)	5G NR	2.34-2.71 ГГц; 3.72-5.10 ГГц	2 порт MIMO	75×77 мм	20 дБ	ECC < 0.02; DG > 9.9995	microstrip	Қосжолақ, бірақ UAV емес
Awan et al., 2024 (PLOS ONE)	IoT/смарт құрылғылар	2.45 ГГц; 5.4 ГГц	2 порт MIMO	28×48.6 мм	< –27 дБ	ECC ≤ 0.2	microstrip	Жоғары оқшаулау, бірақ UAV емес (ScienceDirect)

Ұсынылған 2×2 қосжолалық MIMO монополды антенна массиві кең импеданстық жолақты (2.14-3.25 ГГц және 5.4-7.4 ГГц) және жоғары оқшаулауды (кемінде 23 дБ және 19 дБ) бір уақытта қамтамасыз етуге бағытталған. Ұқсас жұмыстардың бір бөлігі ҰҰА арналмаған немесе MIMO/қосжолалық талаптарды толық қатар қанағаттандырмайды (мысалы, бірпортты ҰҰА антенналар немесе кеңжолалық, бірақ екі нақты диапазоны айқын бөлінбеген шешімдер). Біздің жұмыстың практикалық ерекшелігі ҰҰА жақтауының ортасына орналастыру сценарийін және 4 элементті симметриялы (0°/90°/180°/270°) конфигурацияны ескере отырып, кең қамту мен өзара байланыс әсерін төмендетуге басымдық беруі. Сонымен бірге, бұл мақала нәтижелері толықтай сандық модельдеуге негізделгендіктен, келесі кезеңде прототип жасап, векторлық желі анализаторы және анэхоикалық камера өлшеулерімен эксперименттік валидация жүргізу қажет етеді.

Қорытынды

Мақалада ҰҰА үшін қосжолалық 2×2 MIMO монополды антенна массиві ұсынылып, оның жұмыс қабілеті толықтолқынды сандық модельдеу арқылы бағаланды. Модельдеу нәтижелері бойынша антенна –10 дБ критерийімен төменгі диапазонда 2.14-3.25 ГГц және жоғарғы диапазонда 5.4-7.4 ГГц аралығында тұрақты сәйкестендірілгенін көрсетті. Элементтер арасындағы оқшаулау деңгейі төменгі жолақта кемінде 23 дБ, ал жоғарғы жолақта кемінде 19 дБ мәндеріне жетіп, өзара байланыс әсерінің төмен екендігін дәлелдейді. Сонымен қатар, MIMO жүйесіне тән корреляция коэффициентінің төмен мәні және диверсификация көрсеткішінің жоғары деңгейі кеңістіктік әртүрліліктің тиімді қамтамасыз етілетінін көрсетеді.

Бұл нәтижелер ұсынылған антенна құрылымының ҰҰА байланыс жүйелері үшін перспективалы екенін айқындайды, алайда алынған тұжырымдар толықтай модельдеу нәтижелері шеңберінде берілгенін атап өтеміз. Сондықтан келесі кезеңде антенна прототипін дайындап, векторлық желі анализаторы арқылы S-параметрлерін және анэхоикалық камерада сәулелену диаграммаларын өлшеу арқылы эксперименттік валидация жүргізу жоспарланады. Болашақ зерттеулерде антенна массивін нақты ҰҰА платформасына орнату кезіндегі жақтау, қозғалтқыштар және борттық электроника әсерін ескеріп, электромагниттік үйлесімділік тұрғысынан қосымша талдаулар жүргізу ұсынылады.

Әдебиеттер

1. Energy-efficient and secure air-to-ground communication with jittering UAV / H. Wu et al // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2020. – Vol. 69. – P. 3954-3967. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2971520>.
2. Sherstjuk V. Forest fire-fighting monitoring system based on UAV team and remote sensing / V. Sherstjuk, M. Zharikova, I. Sokol // Proc. 38th IEEE Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – Kyiv, 2018. – P. 663-668.
3. Sherstjuk V. UAV-based forest fire monitoring system leveraging remote sensing technologies / V. Sherstjuk, M. Zharikova, I. Sokol // Proc. 38th IEEE Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – Kyiv, 2020. – P. 663-668. <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.847752>.
4. Ghamry K.A. Multi-UAV optimization for firefighting missions using particle swarm algorithm / K.A. Ghamry, M.A. Kamel, Y. Zhang // Proc. Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). – Miami, 2017. – P. 1404-1409. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2017.7991527>.
5. UAV-assisted aerial spraying: Droplet deposition density in rice farming / M.N.A. Kharim et al // Computers and Electronics in Agriculture. – 2019. – Vol. 167. – Article 105045. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105045>.
6. UAV sprayer performance: Effects of spray volume on pest control and deposition in wheat fields / G. Wang et al // Pest Management Science. – 2019. – Vol. 75. – P. 1546-1555. <https://doi.org/10.1002/ps.5321>.
7. Alotaibi E.T. LSAR: Collaborative UAVs for search and rescue operations / E.T. Alotaibi, S.S. Alqefari, A. Koubaa // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 55817-55832. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2912306>.
8. Help from the sky: Leveraging UAVs for disaster management / M.Erdelj et al // IEEE Pervasive Computing. – 2021. – Vol. 16, No. 1. – P. 24-32. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2017.11>.

9. Multi-purpose UAV for search and rescue in avalanche zones / M. Silvagni et al // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2017. – Vol. 8. – P. 18-33. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1238852>.
10. UAV-aided emergency communication networks during disasters / N. Zhao et al // IEEE Wireless Communications. – 2019. – Vol. 26. – P. 45-51. <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1800160>.
11. Gupta L. UAV communication networks: A comprehensive survey / L. Gupta, R. Jain, G. Vaszkun // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 18. – P. 1123-1152. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2495297>.
12. Wireless power transfer: A review of methods, applications, and challenges / M.M. Rahman et al // Engineering Reports. – 2024. <https://doi.org/10.1002/eng2.12951>.
13. UAV-assisted edge computing for IoT: Joint computation and communication design / T. Zhang et al // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2020. – Vol. 16. – P. 5505-5516. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2948406>.
14. Trust-based UAV-aided code dissemination in 5G industrial IoT / J. Liang et al // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2022. – Vol. 18. – P. 2877-2889. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3110734>.
15. A dual-band blade antenna for UAV-based ADS-B and 5G communication / M.J. Arpaio et al // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – Article 5734. <https://doi.org/10.3390/s21175734>.
16. Tak J. A flush-mounted monopolar patch antenna for UAV applications / J. Tak, J. Choi // Microwave and Optical Technology Letters. – 2017. – Vol. 59. – P. 1202-1207. <https://doi.org/10.1002/mop.30501>.
17. Broadband slotted blade dipole antenna for airborne UAV applications / M. Nosrati et al // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66. – P. 3857-3864. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2835524>.
18. Mazumder P. Design and analysis of a multiple input and multiple output antenna for unmanned aerial vehicle / P. Mazumder, M.M. Khan // Proc. Int. Conf. on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT). – 2021. – P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT51525.2021.9580132>.
19. Mozaffari M. Toward 6G with connected sky: UAVs and beyond / M. Mozaffari, X. Lin, S. Hayes // IEEE Communications Magazine. – 2021. – Vol. 59, No. 12. – P. 74-80. <https://doi.org/10.1109/MCOM.005.2100142>.
20. Space-air-ground integrated 6G wireless communication networks: A review of antenna technologies and application scenarios / F.A. Dicandia et al // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – Article 3136. <https://doi.org/10.3390/s22093136>.

А. Хабай¹, Е.А. Тулешов¹, А.Е. Назырова², Ж.Н. Исабеков^{1*}, С.Е. Ибекеев^{1,3}

¹Satbayev University,

050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а

²Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва,

10000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2

³Алматинский технологический университет,

050000, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100

*e-mail: z.issabekov@satbayev.university

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ММО ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ПОТОКОВЫХ ДАННЫХ В БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ

Аннотация: В статье всесторонне проанализирована производительность двухдиапазонной многовходовой и многовыходовой (ММО) антенной системы для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Обеспечение высокоскоростной и надёжной передачи данных между БПЛА и наземными пунктами управления является одной из ключевых задач современных технологий связи. С учётом этого предложенный антенный массив спроектирован для устойчивой работы в двух частотных диапазонах (в двухдиапазонном режиме). Результаты численного моделирования показывают, что массив обеспечивает высокую изоляцию (23 дБ и 19 дБ) и широкую полосу пропускания (2,14-3,25 ГГц и 5,4-7,4 ГГц). Это указывает на высокую скорость передачи данных, слабое взаимное влияние между элементами и эффективное использование спектральных ресурсов. Кроме того, анализ радиационных характеристик антенны позволил определить оптимальные значения коэффициента корреляции и коэффициента диверсификации, что

подчеркивает значимость технологии MIMO для повышения пространственного разнообразия и надёжности связи.

Полученные выводы основаны на результатах моделирования несмотря на перспективность предложенного решения для систем связи БПЛА, в дальнейшем требуется изготовление прототипа и экспериментальная валидация характеристик.

Ключевые слова: БПЛА, антенна MIMO, антенна 2×2, двухдиапазонная антенна, монополярная антенна, микрополосковое питание, S-параметры, изоляция, взаимная связь (взаимное влияние), коэффициент корреляции, коэффициент диверсификации.

A. Khabay¹, E. Tuleshov¹, A. Nazyrova², Zh. Issabekov^{*}, S. Ibekeyev^{1,3}

¹Satbayev University,

050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street, 22a

²L.N. Gumilyov Eurasian National University,

10000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2

³Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, 100 Tole Bi Street

*e-mail: z.issabekov@satbayev.university

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF THE MIMO METHOD FOR STREAMING DATA TRANSMISSION IN UNMANNED AERIAL VEHICLES

This paper presents a comprehensive performance analysis of a dual-band multiple-input multiple-output (MIMO) antenna system for unmanned aerial vehicles (UAVs). Ensuring high-data-rate and reliable transmission between UAVs and ground control stations is one of the key challenges in modern wireless communications. Accordingly, the proposed antenna array is designed to operate stably in two frequency bands (dual-band mode). Numerical simulation results indicate that the array provides high isolation (23 dB and 19 dB) and wide impedance bandwidths (2.14-3.25 GHz and 5.4-7.4 GHz). These results suggest high data throughput, reduced mutual coupling between the elements, and efficient utilization of spectral resources. In addition, the radiation-pattern analysis yields favorable values of the envelope correlation coefficient and diversity gain, highlighting the importance of MIMO technology in improving spatial diversity and link reliability. The conclusions are based on numerical simulations; although the proposed design is promising for UAV communication systems, further prototype fabrication and experimental validation are required.

Key words: UAV, MIMO antenna, 2×2 antenna, dual-band antenna, monopole antenna, microstrip feeding, S-parameters, isolation, mutual coupling, correlation coefficient, diversity gain.

Авторлар туралы мәліметтер

Анар Хабай – PhD, «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: a.khabay@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0409-1531>.

Еркебулан Амандықович Тулешов – техникалық ғылымдар кандидаты, «Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9146-7137>.

Айжан Есболқызы Назырова – PhD, «Жасанды интеллект технологиялары» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: nazyrova_aye_1@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9162-6791>.

Жанібек Назарбекұлы Исабеков* – PhD, Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Серикбек Елемесович Ибекеев – техника ғылымдарының магистрі, «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: s.ibekeyev@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1991-8642>.

Информация об авторах

Анар Хабай – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Электроники, телекоммуникации и космических технологий», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан; e-mail: a.khabay@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0409-1531>.

Еркебулан Амандыкович Тулешов – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Робототехники и технических средств автоматизации», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9146-7137>.

Айжан Есболовна Назырова – PhD, старший преподаватель кафедры «Технологий искусственного интеллекта», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, г. Астана, Казахстан; e-mail: nazyrova_aye_1@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9162-6791>.

Жанибек Назарбекулы Исабеков* – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Робототехники и технических средств автоматизации», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Серикбек Елемесович Ибекеев – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроники, телекоммуникации и космических технологий», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан; e-mail: s.ibekeyev@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1991-8642>.

Information about the authors

Anar Khabai – PhD, Associate Professor of the Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: a.khabay@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0409-1531>.

Yerkebulan Tuleshov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Robotics and Engineering Tools of Automation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9146-7137>.

Aizhan Nazyrova – PhD, Senior Lecturer at the Department of Artificial Intelligence Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: nazyrova_aye_1@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9162-6791>.

Zhanibek Issabekov* – PhD, Associate Professor of the Department of Robotics and Engineering Tools of Automation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Serikbek Ibekeyev – master technical science, Senior Lecturer of the Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: s.ibekeyev@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1991-8642>.

Редакцияға енуі 22.09.2025
Өңдеуден кейін түсуі 19.12.2025
Жариялауға қабылданды 09.01.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-4](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-4)



FTAXP: 50.47.00

Д.К. Сатыбалдина¹, Н.Б. Шмитов^{1*}, Н.М. Тешебаев², А.Ж. Закарина¹, К.С. Кульниязова¹

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті,
010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Әл-Фараби даңғылы, 71

*e-mail: nurbol-970817@mail.ru

МАГИСТРАЛЬДЫҚ ҚҰБЫРЛАРДАҒЫ АҒЫП КЕТУ КООРДИНАТТАРЫН АНЫҚТАУ ҮШІН НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІНІ ҚОЛДАНУ

Аңдатпа: Құбырлар суды, мұнайды, газды және басқа сұйық және газ тәрізді орталарды тасымалдау үшін кеңінен қолданылады. Құбыр жүйелерінде ағып кетудің пайда болуы табиғи ресурстардың айтарлықтай жоғалуына әкеледі және қоршаған ортаға және қоғамдық қауіпсіздікке қауіп төндіруі мүмкін. Осыған байланысты ағып кетуді уақтылы анықтау және оқшаулау міндеті мұнай-газ саласының өзекті мәселелерінің бірі болып табылады. Жұмыста қысым өлшеу деректері негізінде жасанды интеллект әдістерін пайдалана отырып, құбырдағы ағып кету координатын

©Д.К. Сатыбалдина, Н.Б. Шмитов, Н.М. Тешебаев, А.Ж. Закарина, К.С. Кульниязова, 2026