

А.Е. Кулакаева¹, А.Б. Батыргалиев², Ж.Ж. Онгенбаева¹,
Б.А. Кожакметова^{2,3}, Р.Ж. Камал¹

¹Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Қазақстан

²Satbayev University, Алматы, Қазақстан

³Ғ.Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: b.kozhakhmetova@aes.kz

ФАЗАЛЫҚ АНТЕННА ТОРЫНЫҢ СӘУЛЕЛЕНУ ЭЛЕМЕНТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. Берілген мақалада фазаланған антенналық тордың сәулелену элементтері зерттелді. Жұмыста фазаланған антенналық тордың зертханалық макетін қолдану және осы антеннаның негізгі сипаттамаларын өлшеу мәселелері қарастырылды. Макет фазаланған антенналық тордың негізгі қасиеттерін мен сипаттамаларын зерттеуге, сондай-ақ жұмыс істеу принципін, сонымен қатар антенна торының бағыттылық диаграммасын қалыптастыру әдістерін зерттеуге мүмкіндік береді. Антенна дискретті фазалық айналдырғыштарды қолдана отырып, кеңістікті коммутациялық сканерлейді. Элементтің таңдалған құрылымы сәулелендіргіштердің өзара әсерінің төмен деңгейіне бір уақытта қол жеткізуге және бұрыштардың берілген секторында сканерлеу кезінде кең жиілік диапазонында ашылудан модуль шағылысу коэффициентінің қолайлы мәндерін қамтамасыз етуге мүмкіндік беретіні аталып өтілді. Антенналық тор фрагментінің эксперименттік зерттеулерінің нәтижелері көрсетілді. Антенналық тор сәулелендіргіштер арасындағы өзара байланыстың қалыптасқан бағыт диаграммасының сипаттамаларына әсері зерттелді. Тор элементтері арасында өзара байланыстың болуы сәулелендіргіштердегі токтардың қайта бөлінуін тудыратыны көрсетілген, бұл қоздырғыш әсерлердің өзгеруіне өте сезімтал сәулеленуді басу аймағының пішіні мен деңгейінің бұрмалануына әкеледі.

Түйінді сөздер. Бөлгіш, антенна, сканерлеу, амплитудалық-жиіліктік сипаттама, өлшеу, жиілік, спектр.

Кіріспе.

Қазіргі таңда антенналардың көптеген түрлері бар, бірақ фазалық антенна торлары (ФАТ) және оның кейіннен белсенді ФАТ-тарға (БФАТ) ауысуы ерекше қызығушылық тудырады. Мұндай антенна жүйелерінде антенна жүйесінің энергетикалық потенциалын арттыруға, сондай-ақ бірлік сәулелендіргішпен салыстырғанда тар бағыт диаграммасын алуға мүмкіндік беретін көптеген сәулелену элементтері бар. БФАТ-дың артықшылығы - антенна торының әрбір сәулелендіргіші генератор, қуат күшейткіші немесе жиілік түрлендіргіші түріндегі белсенді элемент қосылады. Осы типтегі антенна торлары спутниктік байланыс жүйелерінде, радиолокациялық және радионавигациялық жүйелерде, ұялы байланыс жүйелерінде, сондай-ақ радиоэлектрондық қарсы жүйелерінде кеңінен қолданылатын перспективалы антенна жүйелері болып табылады. Сонымен қатар бесінші буын (5G) ұялы байланыс жүйелері үшін ФАТ пайдалану және құруға көптеген жұмыстар арналған [1-5]. Мәселен, мысалы [1] мақалада 5G жүйелерінде антенна торларын қолданудың артықшылықтары мен ерекшеліктері келтірілген, ал [2] мақалада антенна торларын қолданатын байланыс жүйелерінің техникалық мүмкіндіктері мен мәселелері қарастырылған. Миллиметрлік толқын диапазонындағы сымсыз байланысы үшін антенна торларының технологиясына шолу [6] мақалада, мұнда нүкте-нүкте және нүкте-көпнүкте радиожелілеріне арналған антенна торларының заманауи және ең озық

тұжырымдамаларын қарастыруға баса назар аударылады. [7] жұмыста алтыншы буын (6G) және одан жоғары жаңа ұялы байланыс жүйелеріне арналған антенналық тор конструкциялары ұсынылған.

Антенна торлары жерсеріктік байланыс жүйелерінде кеңінен қолданылады. [8-10] жұмыстарында жерсеріктік жүйелерде қолдануға арналған антенна торларының құрылысы ұсынылған, ал [11] жұмыста антенналардың әртүрлі конструкцияларына, соның ішінде антенна торларына шолу және оларды жерсеріктік байланыс қызметтеріне қолдану берілген.

Сондай-ақ, нысананы анықтаудың кең ауқымын, сканерлеудің кең спектрін және жиіліктің кең диапазонында жұмыс істеуді қамтамасыз ететін борттық радиолокациялық станцияларда БФАТ қолдану жағдайлары бар [12-18].

Материалдар мен тәсілдер.

Өлшемдерде 1 суретте (а) көрсетілгендей FieldFox Microwave Analyser N9915A анализаторы қолданылады. Fieldfox Analyser N9915a портативті аралас ультра жоғарғы жиілікті анализатор жабдыққа жоспарлы техникалық қызмет көрсетуден бастап жан-жақты диагностика мен ақаулықтарды жоюға дейінгі көптеген тапсырмаларды орындауға арналған. FieldFox ультра жоғарғы жиілікті анализатор зертханада да, далада да жоғары сапалы өлшемдерді жасауға мүмкіндік береді. Сондай-ақ зерттеу жұмыстарында HyperLOG 30180 логопериодты антеннасы және 1 суретте (б) көрсетілгендей радиожилік кабель қолданылды.



а) Microwave Analyser N9915A



б) HyperLOG 6080 X

1 сурет – Өлшемдерде қолданылатын құрылғылар

Аралас ультра жоғарғы жиілікті анализатордың негізгі мақсаты - кабельдер мен антенналарды сынау. Ол сондай-ақ векторлық тізбек анализаторы және спектр анализаторы ретінде конфигурациялануы мүмкін. Қосымша опциялар: қуат өлшегіші, тәуелсіз сигналдар генераторы, векторлық вольтметр, кедергілер анализаторы, реттелетін тұрақты ток көзі және кірістірілген GPS қабылдағышы.

FieldFox Microwave Analyser техникалық сипаттамалары 1-кестеде көрсетілген.

1 кесте - Microwave Analyser N9915A сипаттамалары

Жиілік диапазоны	30 кГц-тен 9 ГГц дейін
Динамикалық диапазон	100 дБ
Амплитуданы өлшеу қателігі	±0,5 дБ
Аккумулятордан жұмыс істеу уақыты	3,5 сағ
Жұмыс температурасының диапазоны	-10°C-тан +55°C дейін

Логопериодты антенна HyperLOG 6080 X (1 сурет (б)) - он есе және одан кеңірек толқын диапазонында жұмыс істейтін кең жолақты бағытталған антенна. Электромагниттік үйлесімділікті (ЭМУ) сынауға арналған "Aaronia" сынақ антенналары

CD-дискіде жоғары рұқсатымен толық өлшеу хаттамасын қамтиды. Бұл кез-келген спектр анализаторының көмегімен ЭМУ-ті өте дәл өлшеуге мүмкіндік береді.

Мұндай антенналардың қолданылу аясы - электромагниттік үйлесімділікті зерттеу және радиожилік сигналдарының параметрлерін талдауға мүмкіндік береді, масалы, GSM1800/1900, DECT, UMTS, WLAN, Microwave, Bluetooth, WiFi, Lte2.6, WiMAX.

HyperLOG антенналары жоғары технологиялық қорғаныс корпусымен жабдықталған. Оның арнайы жабыны бар, соның арқасында конденсат және корпустың бетіндегі ылғалдың басқа түрлері өлшеу нәтижелеріне әсер етпейді. Корпустың әлсіреу коэффициенті де өте төмен. Нәтижесінде антенналар басқа сипаттамаларға нұқсан келтірместен механикалық және қоршаған орта әсерінен максималды қорғанысқа ие. HyperLOG 30180 техникалық сипаттамалары 2 кестеде көрсетілген.

2 кесте - HyperLOG 6080 X сипаттамалары

Жиілік диапазоны	680 МГц-тен 8 ГГц дейін
Импеданс	50 Ом
Күшейту коэффициенті	45 dB
Калибрлеу нүктелерінің саны	733 (қадам: 10 МГц)
Қосқыш	SMA (f) немесе N (адаптер қажет)
Температуралардың жұмыс диапазоны	-10°C – тен +55°C дейін
Максималды қуат	100 Вт

Сондай-ақ өлшемдерде жаңғырықсыз камерасы қолданылды. Жаңғырықсыз камера (ЖСК) – жаңғырық пайда болмайтын бөлме (2 сурет (а)). Әдетте мұндай камералар сыртқы сигналдардан (акустикалық немесе радиожилік) оқшаулайтын камера етіп жасайды. Мұның бәрі қабырғадан шағылысуды және сырттан шуды болдырмай, тікелей көзден келетін сигналды өлшеуге мүмкіндік береді, осылайша көздің бос кеңістікте болуын қалыптастырады.

Антенна сәулелендіргіштің тұрақты толқын коэффициентін өлшеу. Тұрақты толқын коэффициенті (ТТҚ) өлшеу кезінде (2 сурет (б)) кабельдің барлық қосқыштары сапалы дәнекерленген болуы керек. Өйткені тотығу дұрыс емес мөрленген орын - бұл ТТҚ жоғары мәнінің негізгі себептерінің бірі. Эксперимент үшін дұрыс кабельді таңдау өте маңызды, өйткені кабельде энергияның бір бөлігі жоғалады және бұл ТТҚ мәніне әсер етеді.



а) Жаңғырықсыз камера



б) Антенна бір элементінің ТТҚ өлшеу

2 сурет – Өлшемдерде қолданылатын жаңғырықсыз камерасы және ТТҚ өлшеу кезі

Бұл камералардың қабырғалары, төбелері мен едендері толқынды жақсы сіңіретін материалдармен жабылған. Радиожилік камерасының ішкі құрылғысы акустикалық

камераға ұқсайды, бірақ мұнда акустикалық камерада қолданылатын дыбыс сіңіргіштердің орнына радиосіңіргіш материал (PCM) қолданылады.

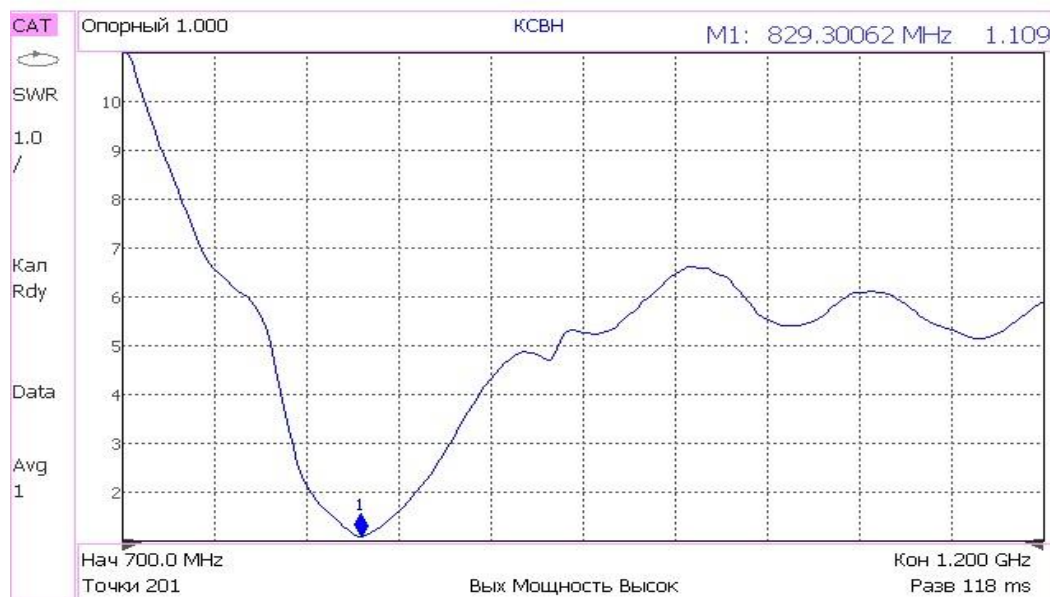
Нәтижелер.

Өлшеу үшін құрылғы антенна сипаттамалары режиміне қойылып, жиілік шекарасы орнатылды. Әрі қарай құрылғы 0,5 ГГц-тен 1,5 ГГц-ке дейінгі диапазонда калибрлейді. Антеннаның кабельдік портын анализатор портына қосамыз және бір антенна сәулелендіргіштің ТТҚ өлшейміз. Біз маркерді қажетті жиілік диапазонына қоямыз, яғни өлшеудің басы мен соңы. Әрі қарай осы жиілік диапазонында ТТҚ көре аламыз. Ең дұрысы, ТТҚ 1-ге тең болуы керек. Бұл нәтижеге қол жеткізу үшін симметриялы вибраторды симметриялы көпірдің көмегімен қоректендіру әдісі қолданылды.

Антеннаның ТТҚ өлшеу кезінде барлық элементтерді фазалық ауыстырғыштар мен бөлгіштің көмегімен байланыстырамыз. Әрбір сәулелендіргіш фазалық ауыстырғыштарға кабель арқылы қосылады, сәйкесінше біріншісі біріншісіне, екіншісі екіншісіне, осылайша барлық 4 сәулелендіргіш пен фазалық ауыстырғыш бір-бірімен байланысады. Содан кейін барлық 4 фазалық ауыстырғыш қуат бөлгішке қосылады. Бөлгіштің жалпы порты кабельдің көмегімен ТТҚ анализаторына қосылады. Әрі қарай, біз қажетті жиілік диапазонында калибрлеуді жүргіземіз (0.5 ГГц-тен 1.5 ГГц-ке дейін).

Жоғарыда айтылғандай, ТТҚ 1-ге тең болуы керек. 3 суретте ТТҚ деңгейінің 1.109 дейін төмендетілген көрсеткішінің нәтижесі көрсетілген.

Keysight Technologies: N9915A, SN: MY57271308



3 сурет - Антеннаның ТТҚ мәні

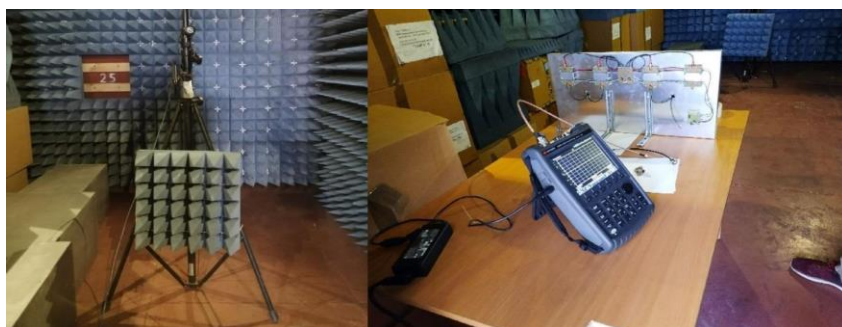
Бағыт диаграммасын өлшеу үшін келесі құрылғылар қолданылды: FieldFox Microwave Analyser N9915A, ол 30 кГц-тен 9 ГГц-ке дейінгі жиілік диапазонында жұмыс істейді, сынақ сигналының қуаты -15 дБм құрайды және қажет болған жағдайда өлшенетін антенналар орналасуына байланысты қуатты арттыруға немесе азайтуға болады. Құрал әмбебап, өйткені оның үш өлшеу режимі бар: антенна сипаттамаларын талдау (ТТҚ, S11), тізбекті талдау (S21) және спектрді талдау.

Сынақ (анықтамалық) антенна ретінде HyperLog 30180 логопериодты антеннасын қолданамыз, ол 380 МГц-тен 18 ГГц-ке дейінгі жиілік диапазонында жұмыс істейді, бұл кез-келген спектр анализаторымен ЭМУ-ті өте дәл өлшеуге мүмкіндік береді.

Бағыт диаграммасын (БД) өлшеу жаңғырықсыз камерада жүзеге асырылды. Камера нақты бағыт диаграммасын құруды қамтамасыз етеді. БД өлшеу үшін FieldFox Microwave Analyser N9915A режимін антенна өнімділігі анализаторынан тізбекті анализатор режиміне өзгерту керек. Антеннаға сынақ сигналын беру керек, антенна тікелей сигнал режимінде болады. Антенна қосқыштары тікелей сигнал режимінде, сондықтан антенна сәулесі түзу болады.

Зерттеу жүргізу кезінде өлшеу антеннасын жаңғырықсыз камерада 3 метр қашықтықта орнатамыз және өлшеу антеннасынан сигналды тізбек анализаторына жеткіземіз. Әрі қарай антеннаның жиілік сипаттамасын байқаймыз. Сонымен қатар жиілік сипаттамасы тіркелген кезде екінші әрекет жасалды – антеннаның 180 градусқа ауытқуы және әр 30 градусқа ауытқу кезінде күшейткіш коэффициентінің (КК) мәнін жазамыз және осылайша бір бағытта және екінші бағытта БД алынды. Бағыт диаграммасын анықтаған кезде бүйірлік және артқы жапырақшалардың деңгейін ескеру қажет. Антенна БФАТ-ы негізінен радиолокациялық станцияларда қолданылатындықтан және бүйірлік жапырақшалардың үлкен деңгейі болған кезде объектіні бақылау қиынға соғады. Бүйірлік жапырақшалармен ұсталатын жалған мақсаттарға байланысты мақсаттардың қайсысы нақты және қайсысы жалған екенін анықтау қиын болады.

Сынақ сигналының көзі, сондай-ақ панорамалық өлшеу қабылдағышы ретінде Microwave Analyser N9915A анализаторы (S21) тізбекті анализатор режимінде қолданылады (4 сурет). Сканерлеу диапазоны 500 МГц ÷ 2000 МГц. Байланыс кабельдері ретінде Huber SUNNER S04272 моделінің радиожиілік кабелі қолданылды.



4 сурет - Жаңғырықсыз камерада БД өлшеу

ЖСК камерасында өлшеу қашықтығы 3 метр. Сынақ сигналының шығыс қуатының деңгейі ультра жоғарғы жиілік қабылданған тербелістерін сенімді тіркеу қамтамасыз етілетіндей етіп орнатылады.

БД өлшеу процесінде зерттелетін антенна азимут жазықтығында $+180^\circ$ бұрыштық сектор шегінде, содан кейін 180° айналады. Және әр 30° сайын қабылданған ультра жоғарғы жиілікті тербелістердің деңгейі өлшенеді.

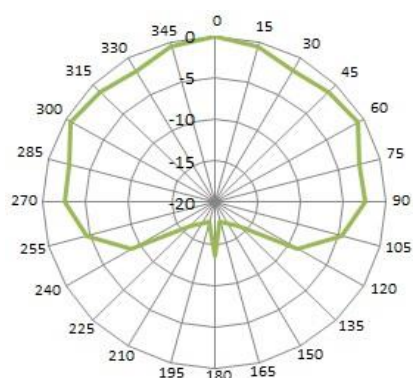
Талқылау.

Басқару блогы көмегімен оңға және солға БД өлшеу. Өлшеу процедурасы келесі тәртіпте жүреді. Біріншісі-қажетті диапазондағы тізбек анализаторын калибрлеу. Екіншісі-өлшеу тізбегін спектр анализаторына қосу. Үшіншісі-тікелей бағыттан және оңнан 180-ге ауытқып (5 сурет (а)), бағыт диаграммасын өзгерту (5 сурет (б)). Өлшеу нәтижесінде түбінің алдыңғы, бүйір және артқы жапырақшалары және бұрышы ығысқан жаңа БД алынды.

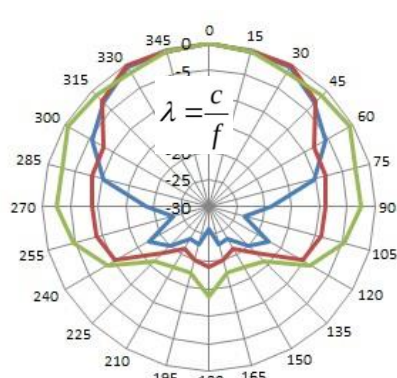
Өлшеу кезінде спектр анализаторындағы жиілік диапазоны берілді. Өлшемдер 830 МГц жиілікте болды. Бағыттық диаграмманы алу және ең қолайлы сәйкестікті анықтау керек.

3 кесте – 830МГц жиілік кезінде өлшеу нәтижелері

Өлшеу градустары (°)	Салыстырмалы нәтижелер (дБ)	Нормаланған нәтижелер (дБ)
0	-33,5	0
30	-35,3	-1,8
60	-34,2	-0,7
90	-36	-2,5
120	-42,3	-8,8
150	-50,7	-17,2
180	-47	-13,5
210	-50,7	-17,2
240	-42,3	-8,8
270	-36	-2,5
300	-34,2	-0,7
330	-35,3	-1,8
360	-33,5	0



а) 830МГц жиілік кезінде БД



б) Үш бағыттағы антеннаның БД

5 сурет – Антеннаның бағыттық диаграммасы

Алынған БД (5-сурет (б)). Электрондық сканерлеу арқылы ауытқу бұрышы +15 және -15 градус. Мұнда тікелей сәуленің ені $23,8^\circ$ (қоңыр график). КК +7дБ негізгі жапырақшадағы энергия концентрациясына байланысты.

Нәтижесінде антеннаның сипаттамаларын өлшеу кезінде келесі мәндер алынды (4-кесте): негізгі жапырақшаның БД деңгейінің ені, бүйірлік жапырақшалардың БД деңгейінің ені, ТТ), сигнал қуатының деңгейі.

Қорытынды.

Берілген мақалада белсенді фазалық антенна торының көп портты бөлгішінің ерекше жағдайы зерттелген. Ғарыштық техника және технологиялар институтының Microwave Analyser N9915A анализаторының көмегімен белсенді фазалық антенна торының бөлгіштерінің амплитудалық-жиілік параметрлерін және сипаттамаларын өлшеу жүргізілді. Зерттеу деректері белсенді фазалық антенна торын жобалаудың келесі кезеңіне қатысты. Осылайша осы жұмыстың практикалық қорытындылары келесідей. Біріншіден, антенналық тор сәулелендіргіштері арасындағы оңтайлы қадам диапазонның жоғарғы жағындағы сканерлеу секторымен және жиілік диапазонының төменгі жағындағы бағыт диаграммасының енімен анықталады. Екіншіден, кеңістікті кең бұрышты сканерлеу

кезінде сәйкес бөлімдерді қолданған және антеннаны ашуда қолдануды мүмкіндігінше шектеген жөн. Сондай-ақ, кең бұрышты қорғаныс секторы бар антенна жүйесін синтездеу кезінде әлсіз бағытталған сәулелену элементтерін қолдану керек.

Осылайша антеннаны зерттеу кезінде осы конструкцияның қызмет аясын талдау, өнімділіктің оң және теріс жақтарын салыстыру қажет деген қорытынды жасауға болады. Сипаттамаларды өлшеу кезінде өлшеу кешенінің құрылғыларын және олардың экспериментте орналасуын дәл таңдау керек екенін ескеру қажет, өйткені олар өлшеу нәтижелеріне әсер етеді.

ӘДЕБИЕТТЕР

- [1] Karad K.V., Hendre V.S. Review of Antenna Array for 5G Technology Using mmWave Massive MIMO // *Recent Trends in Electronics and Communication. Lecture Notes in Electrical Engineering*. – 2022. – vol 777. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2761-3_68
- [2] Z. Xiao et al. Antenna Array Enabled Space/Air/Ground Communications and Networking for 6G // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2022. – vol. 40. – №10. – pp. 2773-2804. doi: 10.1109/JSAC.2022.3196320.
- [3] S. Hussain, S. -W. Qu, W. -L. Zhou, P. Zhang and S. Yang. Design and Fabrication of Wideband Dual-Polarized Dipole Array for 5G Wireless Systems// *IEEE Access*. – 2020. – vol. 8. – pp. 65155-65163. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2984613.
- [4] Buttazzoni G., Fulvio B., Francesca V., Massimiliano C. Geometrical Synthesis of Sparse Antenna Arrays Using Compressive Sensing for 5G IoT Applications // *Sensors*. - 2020. - 20(2), 350. <https://doi.org/10.3390/s20020350>
- [5] Pallotta A. et al. SiGe:BiCMOS technology is enabling D-band link with Active Phased Antenna Array // *2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*. – 2021. – pp. 496-501, <https://doi.org/10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482432>
- [6] Federico G., et al. A review of antenna array technologies for point-to-point and point-to-multipoint wireless communications at millimeter-wave frequencies// *International Journal of Antennas and Propagation*. - 2021.
- [7] Yingjie Jay G, Ziolkowski R.W. *Advanced Antenna Array Engineering for 6G and Beyond Wireless Communications*. John Wiley & Sons. - 2021.
- [8] Anish Vahora Killol Pandya. Implementation of Cylindrical Dielectric Resonator Antenna Array for Wi-Fi/Wireless LAN/Satellite Applications// *Progress In Electromagnetics Research M*. – 2020. – vol. 90. – pp. 157-166, doi:10.2528/PIERM20011604
- [9] Hassan M., Hussain M., Khan A., Rashid I., Bhatti, F. Dual-band B-shaped antenna array for satellite applications // *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. – 2021. – 13(8). – pp. 851-858. doi:10.1017/S1759078720001439
- [10] Li Y., Huang Y., Nielsen M.H., Jalili F., Wei W., Ren J., Yin Y., Shen M., Pedersen G.F. A Cross-Mode Universal Digital Pre-Distortion Technology for Low-Sidelobe Active Antenna Arrays in 5G and Satellite Communications // *Electronics*. – 2021. – 10(16):2031. <https://doi.org/10.3390/electronics10162031>
- [11] Rahmat-Samii Y., Densmore A. C. Technology Trends and Challenges of Antennas for Satellite Communication Systems // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2015. – vol. 63. – no. 4. – pp. 1191-1204. doi: 10.1109/TAP.2014.2366784.
- [12] Активные фазированные антенные решетки// Под ред. Д. И. Воскресенского и А. П. Канащенкова. - М.: Радиотехника, 2004. - 488 с.
- [13] Проектирование фазированных антенных решеток//Под ред. Д.И.Воскресенского. - М.: Радиотехника, 2012.

[14] Айтмагамбетов А.З., Кулакаева А.Е., Кожаметова Б.А., Жаксылық А.Ж. Оценка энергетического бюджета для системы радиомониторинга на базе низкоорбитальных спутников // Вестник АУЭС. – 2019. - № 4 (47). – С. 88.

[15] Кожаметова Б. А., Камал Р. Ж., Койшыбай С. С. Вопросы применения активных фазированных антенных решеток в радиотехнических системах //Современные технологии в науке и образовании-СТНО-2019. – 2019. – С. 46-50.

[16] Ступин Д. Д., Перлов А. Ю., Маврин А. В. Исследование и испытания передающих комплексов АФАР для обеспечения тактико-технических характеристик РЛС //Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2018. – №. 3 (197).

[17] Дзюба А. П. Перспективы развития фазированных антенных решеток //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2013. – Т. 30. – №3.

[18] Жумашев Н. Г., Каражанов Б. Б., Сулейменов Е. А. Самолетные радиолокационные станции с использованием фазированной антенной решетки //Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2017. – Т. 2.

REFERENCES*

[1] Karad K.V., Hendre V.S. Review of Antenna Array for 5G Technology Using mmWave Massive MIMO // Recent Trends in Electronics and Communication. Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2022. – vol 777. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2761-3_68

[2] Z. Xiao et al. Antenna Array Enabled Space/Air/Ground Communications and Networking for 6G // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2022. – vol. 40. – №10. – pp. 2773-2804. doi: 10.1109/JSAC.2022.3196320.

[3] S. Hussain, S. -W. Qu, W. -L. Zhou, P. Zhang and S. Yang. Design and Fabrication of Wideband Dual-Polarized Dipole Array for 5G Wireless Systems. // IEEE Access. – 2020. – vol. 8. – pp. 65155-65163. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2984613.

[4] Buttazzoni G., Fulvio B., Francesca V., Massimiliano C. Geometrical Synthesis of Sparse Antenna Arrays Using Compressive Sensing for 5G IoT Applications // Sensors. - 2020. - 20(2), 350. <https://doi.org/10.3390/s20020350>

[5] Pallotta A. et al. SiGe:BiCMOS technology is enabling D-band link with Active Phased Antenna Array // 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). – 2021. – pp. 496-501, <https://doi.org/10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482432>

[6] Federico G., et al. A review of antenna array technologies for point-to-point and point-to-multipoint wireless communications at millimeter-wave frequencies. // International Journal of Antennas and Propagation. - 2021.

[7] Yingjie Jay G, Ziolkowski R.W. Advanced Antenna Array Engineering for 6G and Beyond Wireless Communications. John Wiley & Sons. - 2021.

[8] Anish Vahora Killol Pandya. Implementation of Cylindrical Dielectric Resonator Antenna Array for Wi-Fi/Wireless LAN/Satellite Applications. // Progress In Electromagnetics Research M. – 2020. – vol. 90. – pp. 157-166, doi:10.2528/PIERM20011604

[9] Hassan M., Hussain M., Khan A., Rashid I., Bhatti, F. Dual-band B-shaped antenna array for satellite applications // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2021. – 13(8). – pp. 851-858. doi:10.1017/S1759078720001439

[10] Li Y., Huang Y., Nielsen M.H., Jalili F., Wei W., Ren J., Yin Y., Shen M., Pedersen G.F. A Cross-Mode Universal Digital Pre-Distortion Technology for Low-Sidelobe Active Antenna Arrays in 5G and Satellite Communications // Electronics. – 2021. – 10(16):2031. <https://doi.org/10.3390/electronics10162031>

[11] Rahmat-Samii Y., Densmore A. C. Technology Trends and Challenges of Antennas for Satellite Communication Systems // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2015. – vol. 63. – no. 4. – pp. 1191-1204. doi: 10.1109/TAP.2014.2366784.

[12] Active phased array antennas/ Edited by D. I. Voskresensky and A. P. Kanashchenkov. - M.: Radio Engineering, 2004. - 488 p.

[13] Design of phased antenna arrays. / Edited by D.I.Voskresensky. M.: Radio Engineering, 2012.

[14] Aitmagambetov A.Z., Kulakaeva A.E., Kozhakhmetova B.A., Zhaksylyk A.Zh. Assessment of the energy budget for a radio monitoring system based on low-orbit satellites // Vestnik AUES. – 2019. - № 4 (47). – P. 88.

[15] Kozhakhmetova B. A., Kamal R. Zh., Koishybai S. S. Issues of application of active phased antenna arrays in radio engineering systems //Modern technologies in science and education-STNO-2019. – 2019. – pp. 46-50.

[16] Stupin D. D., Perlov A. Yu., Mavrin A.V. Research and testing of AFAR transmission systems to ensure the tactical and technical characteristics of radar //Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences. – 2018. – №. 3 (197).

[17] Dzyuba A. P. Prospects of development of phased antenna arrays //Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical sciences. - 2013. – Vol. 30. – No. 3.

[18] Zhumashev N. G., Karazhanov B. B., Suleimenov E. A. Aircraft radar stations using a phased array antenna //Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality". – 2017. – Vol. 2.

Aigul Kulakayeva, PhD, assistant professor, International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan, a.kulakayeva@iitu.edu.kz

Askhat Batyrgaliyev, PhD, associate professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, a.batyrgaliyev@satbayev.university

Zhadyra Ongenbayeva, master, senior-lecturer, International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan, zh.ongenbayeva@iitu.edu.kz

Bagdat Kozhakhmetova, doctoral student, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G.Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, b.kozhakhmetova@aes.kz

Ruslan Kamal, master, senior-lecturer, International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan, r.kamal@iitu.edu.kz

RESEARCH OF RADIATING ELEMENTS OF A PHASED ANTENNA ARRAY

Abstract. In this article, a phased array emitter was researched. The paper discusses the issues of using a laboratory mock-up of a phased array antenna and measuring the main characteristics of this antenna. The layout made it possible to study the basic properties and characteristics of a phased array antenna, as well as to investigate the principle of operation and methods of forming an antenna array pattern. The antenna uses discrete phase shifters and performs switching scanning of space. It is noted that the selected structure of the element allows simultaneously achieving a low level of mutual influence of the emitters and providing acceptable values of the modulus of the reflection coefficient from the opening in a wide frequency band when scanning in a given sector of angles. The results of experimental studies of the antenna array fragment are demonstrated. The influence of the mutual coupling between the antenna array emitters on the characteristics of the generated radiation pattern is investigated. It is demonstrated that the presence of a mutual connection between the lattice elements causes a

redistribution of currents in the radiators, which leads to a distortion of the shape and level of the radiation suppression region, which is extremely sensitive to changes in exciting influences.

Keywords. Divider, antenna, scanning, amplitude-frequency response, measurement, frequency, spectrum.

Айгуль Кулакаева, PhD, ассистент-профессор, Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан, a.kulakayeva@iitu.edu.kz

Асхат Батыргалиев, PhD, ассоциированный профессор, Satbayev University, Алматы, Казахстан, a.batyrgaliyev@satbayev.university

Жадыра Онгенбаева, магистр, сениор-лектор, Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан, zh.ongenbayeva@iitu.edu.kz

Багдат Кожаметова, докторант, Алматинский университет энергетики и связи имени Г.Даукеева, Алматы, Казахстан, b.kozhakhmetova@aes.kz

Руслан Камал, магистр, сениор-лектор, Международного университета информационных технологий, Алматы, Казахстан, r.kamal@iitu.edu.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Аннотация. В данной статье были исследованы излучающие элементы фазированной антенной решетки. В работе рассматриваются вопросы по использованию лабораторного макета фазированной антенной решетки и измерение основных характеристик данной антенны. Макет позволил изучить основные свойства и характеристики фазированной антенной решетки, а также исследовать принцип работы и способы формирования диаграммы направленности антенной решетки. Антенна использует дискретные фазовращатели и производит коммутационное сканирование пространства. Отмечено, что выбранная структура элемента позволяет одновременно достичь низкого уровня взаимовлияния излучателей и обеспечить приемлемые значения модуля коэффициента отражения от раскрытия в широкой полосе частот при сканировании в заданном секторе углов. Продемонстрированы результаты экспериментальных исследований фрагмента антенной решетки. Исследовано влияние взаимной связи между излучателями антенной решетки на характеристики формируемой диаграммы направленности. Продемонстрировано, что наличие взаимной связи между элементами решетки вызывает перераспределение токов в излучателях, что приводит к искажению формы и уровня области подавления излучения, которая крайне чувствительна к изменениям возбуждающих воздействий

Ключевые слова. Делитель, антенна, сканирование, амплитудно-частотная характеристика, измерение, частота, спектр.
