

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Физика. Астрономия сериясы, 2021, том 134, №1, 37-43 беттер
<http://bulphysast.enu.kz>, E-mail: vest_phys@enu.kz

ХҒТАР : 47.45.29

Б.А. Карибаев, А.К. Иманбаева, Т.А. Алтынбек

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
(E-mail: beibitkaribaev7@gmail.com, akmaral@physics)

Matlab көмегімен жолақты патч-антенналарды жобалау¹

Аннотация: бұл жұмыста техникалық есептеулер мәселелерін шешуге арналған Matlab қолданбалы бағдарламасы ортасында кез келген күрделі формадағы, оның ішіндегі, геометриялық фракталдар формасындағы антенналарды жобалау, олардың электродинамикалық параметрлерінің сипаттамаларын алу мүмкіндігі және оның ерекшеліктері қарастырылды. Зерттеу объектісі ретінде анизотропты геометриялық фракталы және оның нөмірі 3-ке дейінгі префракталдары негізіндегі, екі түрлі орындаудағы жолақты патч антенналар қарастырылды. Бірінші қарастырылған монополярная антенна модельінің бастапқы нөлінші итерациядағы негізгі өткізгіші ұзындығы 90 мм, ені 2 мм-ді құраса, екінші орындаудағы модельде қабырғалары анизотропты фракталмен эволюцияланатын шаршы патч антенна түрінде жасалды. Нөлінші итерацияға сай келетін шаршының қабырғаларының ұзындығы 27 мм-ді құрады. Олардың жиіліктен тәуелді электрлік сипаттамалары, атап айтқанда, шағылу коэффициенті S11, кірісіндегі толық кедергі (немес импеданс), кернеу бойынша тұрғын толқын коэффициенті, өткізгіш бойымен таралу тоғы және резонанстық жиіліктердегі бағытталу диаграммалары, олардағы негізгі жапырақшалардың екі жазықтық бойынша ендері, күшейту коэффициенттері алынды. Қарастырылған модельдердің сипаттамаларының нәтижелері High Frequency Structural Simulator (қысқ. HFSS) бағдарламалық ортасында соңғы элементтер әдісімен құрылған, материалдарының геометриялық және физикалық параметрлері дәл сондай антенна модельімен салыстырылды.

Түйін сөздер: жолақты патч антенна, анизотроп, фрактал, бағытталу диаграммасы, шағылу коэффициенті, модельдеу, Matlab.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-134-1-37-43>

Түсті: 05.02.2021 /Жарияланымға рұқсат етілді: 12.02.2021

Кіріспе. Сымсыз байланыс технологиясындағы мобильді ұялы телефоннан бастап сымсыз принтерлерге дейінгі кез келген қабылдап-таратушы құрылғының негізгі элементі антенна болып табылады. Қазіргі таңдағы мобильді девайстардың және аппараттардың миниатюрлену үрдісі антенналардың да өлшемі және сипаттамалары бойынша талаптарға сай болуын қажет етеді. Сонымен қатар, қазіргі таңда ақпаратты қабылдап-жіберу жылдамдағын арттыру мәселелері сымсыз байланыс технологиясының өткізу жолақтарын кеңейту арқылы шешілуде [1-5]. Бұл өз кезегінде байланыс жүйесінде көп диапазонды, кең жолақты немесе аса кең жолақты антенналардың болуын қажет етеді. Геометриялық фракталдар формасында құрылған антенналар аталған талаптарға жауап беретін антенна типтерінің бірі болып табылады [6-11].

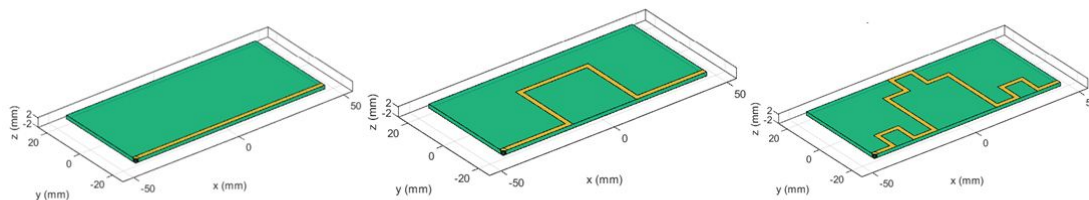
Электромагниттік модельдеу бағдарламалары инженерлерге антенналарды жобалау сатысында виртуалды түрде құрылғы жұмысының әртүрлі сценарилерін бағалауға мүмкіндік беретін маңызды құрал болып табылады. Бүгінгі күнде моменттер және шеткі элементтер әдістерін қолданатын ANSYS HFSS, CST Microwave және т.б. осы сияқты бағдарламалар аса жоғары жиілікті (АЖЖ) құрылғылар мен антенналарды 3D электромагниттік модельдеуде өте кеңінен қолданылады [12,13]. Бұл бағдарламалардың дәлдігі, мүмкіндіктері және

¹Жұмыс Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігі Ғылым комитетінің 2021-2023 жылдарға арналған жас ғалымдарды гранттық қаржыландыру ЖТН АР09057984 жобасы аясында жүзеге асырылды.

одан алынған модельдеу нәтижелері құрылғыларды өте сапалы бағалайды. Бірақ 3D электромагниттік жобалау барысындағы геометриялық сұлбаларды келістіру және оларды үйлестіру, құрылғының физикалық параметрлерін енгізу операциялары тәжірибесі аз қолданушы үшін едәуір қиындықтар туғызады. Өз кезегінде Matlab бағдарламасы және оның Antenna Toolbox арнайы пакеті жоғарыда айтылған осындай бірқатар мәселелерсіз қарапайым сызықты антенналардан бастап апертуралы және антенналық торларға дейін электромагниттік жобалауға мүмкіндік береді [14]. Сонымен қатар, бұл бағдарламада тек дайын модельдерді (пакеттегі бар жобалар) пайдаланып қана қоймай, жасаушы негізгі ережелерді қолдана отырып, объектіге тән алгоритм және код листингін құрастыру арқылы өзі қалаған түрлі геометриялық пішіні бар антенналарды зерттей алады. Бұл жұмыста анизотропты фракталдық [15] антеннаның Antenna Toolbox пакетіндегі дайын модельінің жоқ екені ескеріле отырып, осы фрактал негізіндегі жолақты антеннаның жобалануы қарастырылады.

Жұмыс мақсаты. Matlab бағдарламасында анизотропты фрактал негізіндегі жолақ антенналардың модельін жасау және оның электродинамикалық сипаттамаларын алу.

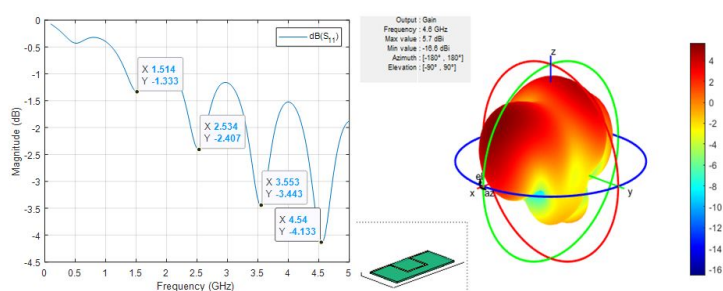
Зерттеу әдісі және модельдеу нәтижелері. 1-суретте зерттеліп отырған патч антенна модельдері келтірілген. Антенна формасы анизотропты фракталдың формасын дәлме-дәл қайталайды. FR4 шыны текстолиттен жасалған төсеніштің (жасыл түс) қалыңдығы - 1,6 мм, ұзындығы - 90 мм және ені 40 мм, өткізгіш жолақшаның ені - 2 мм (сары түс). Төсеніштің екінші жағы толықтай «жер» қабатымен қапталған. Қорек көзі (port) антеннаның бір ұшында координаталары x өсі бойынша «-40 мм», y өсі бойынша «-20 мм» нүктесінде орналасқан. Осы аталған геометриялық және физикалық сипаттамалар программалық листинг кодтарды жазу арқылы жүзеге асырылды.



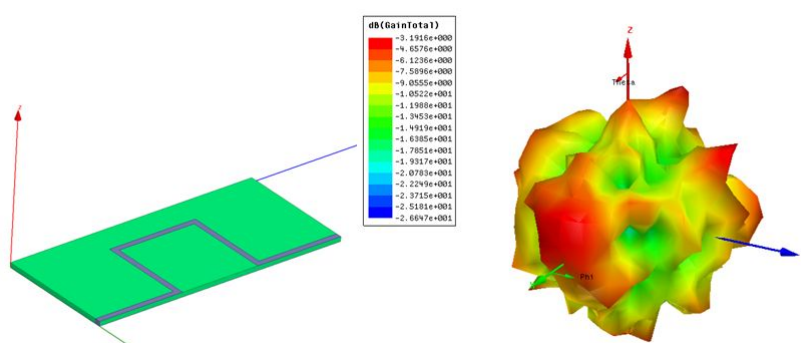
СУРЕТ 1 – Анизотропты фракталдың алғашқы 2 итерациясымен тұрғызылған антенналардың Matlab ортасындағы модельдері

2-суретте 0,1 – 5 ГГц жиілік диапазонындағы 1-суретте келтірілген сызықты монополяр антеннаның шағылу коэффициенті мен 4,6 ГГц резонанстық жиілігіндегі бағытталу диаграммасының 3D сұлбасы көрсетілген. Алынған нәтижелердің дұрыстығына көз жеткізу үшін геометриялық және физикалық параметрлері дәл сондай антенна моделі HFSS ортасында құрастырылып, оның да шағылу коэффициенті мен бағытталу диаграммасы алынды (3 және 4-суреттер). Екі бағдарламалық ортада жобаланған антенналардың жиіліктік сипаттамаларының ұқсастығын байқаймыз, ал бағытталу диаграммаларындағы аздаған айырмашылықтарды да айта кету керек. Matlab-тағы бағытталу диаграммасынан күшейту коэффициентінің оң мәнге, яғни 5,7 dBi-ға тең екенін көрсек, HFSS модельінің нәтижесі теріс мәнді, -3,2 dB көрсетті. Ол сәйкес келмеушіліктер бағдарламаның жұмыс істеу әдістерінің өзгешеліктерінен немесе қарастырылып отырған объектіні ұяшықтарға (mesh) бөлген кезде олардың сандарының әртүрлілігінен келіп туындауы мүмкін.

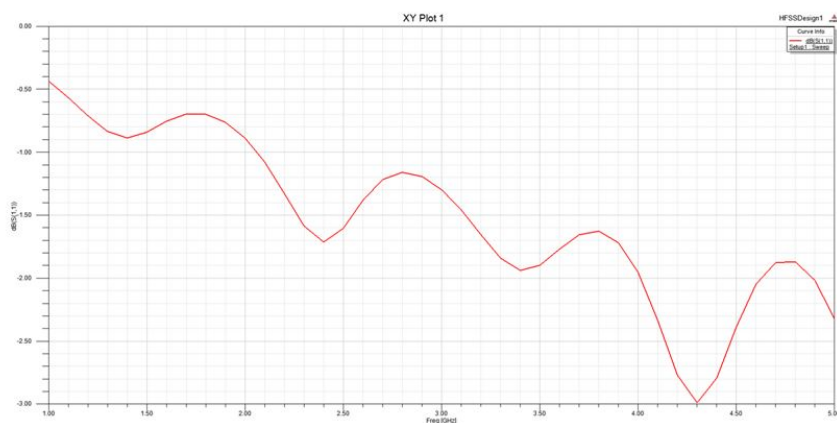
Келесі этапта анизотропты фрактал негізіндегі тағы бір антенна моделі қарастырылды (5-сурет, сол жағындағысы). Бұл модельде анизотропты фракталдың бір мезетте төрт бағытта



Сурет 2 – Matlab ортасындағы анизотропты фракталдық антеннаның жиілік бойынша шағылу коэффициенті мен бағытталу диаграммасы



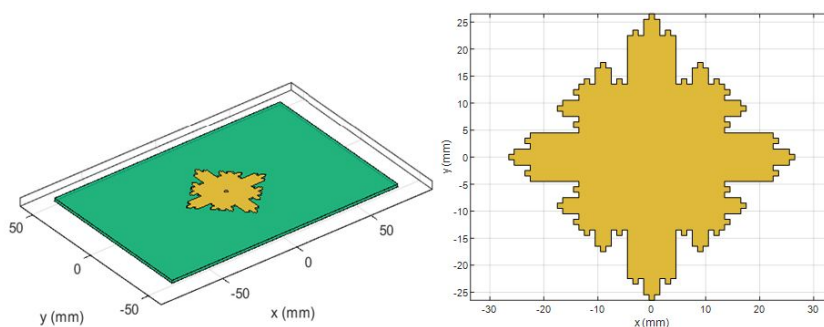
Сурет 3 – Антеннаның HFSS ортасындағы моделі мен оның 4,6 ГГц резонансындағы бағытталу диаграммасы



Сурет 4 – HFSS ортасындағы антеннаның 0,1-5 ГГц диапазоныдағы шағылу коэффициенті

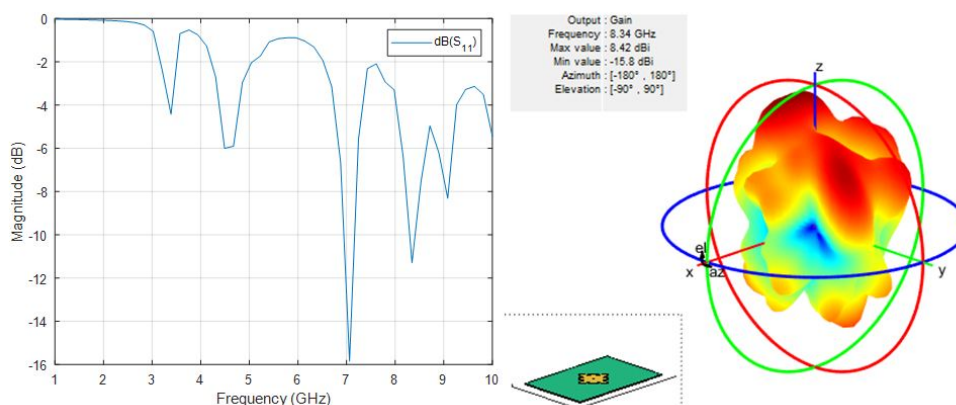
өсуі жүзеге асырылды (5-сурет, оң жағындағысы). Антенна параметрлері алғашқысынан аздап өзгеше, атап айтқанда, FR4 шыны текстолит төсеніш (жасыл түс) қалыңдығы 1,6 мм, ұзындығы 152 мм және ені 101 мм болды, негізгі өткізгіш жолақшадағы (сары түс) ортаңғы шаршының өлшемі 27 мм-ге 27 мм, ал келесілері үш есе азайып отырды. Төсеніштің екінші жағы толықтай «жер» қабатымен қапталған. Қорек көзі (port) антеннаның дәл ортасында, (0;0) координата нүктесінде орналасқан.

6-суретте антенна моделін зерттеулерінің нәтижелері келтірілген. 1 ГГц-тен 10 ГГц жиілік диапазонында -10 дБ табалдырығынан төмен жатқан 2 айқын резонанстық жиілік байқалады: 7 ГГц және 8,34 ГГц. Екінші жиіліктегі антеннаның бағытталу диаграммасы жоғарыдағы 6-суретте, оң жағында көрсетілген. Антеннаның күшейту коэффициенті 8,42

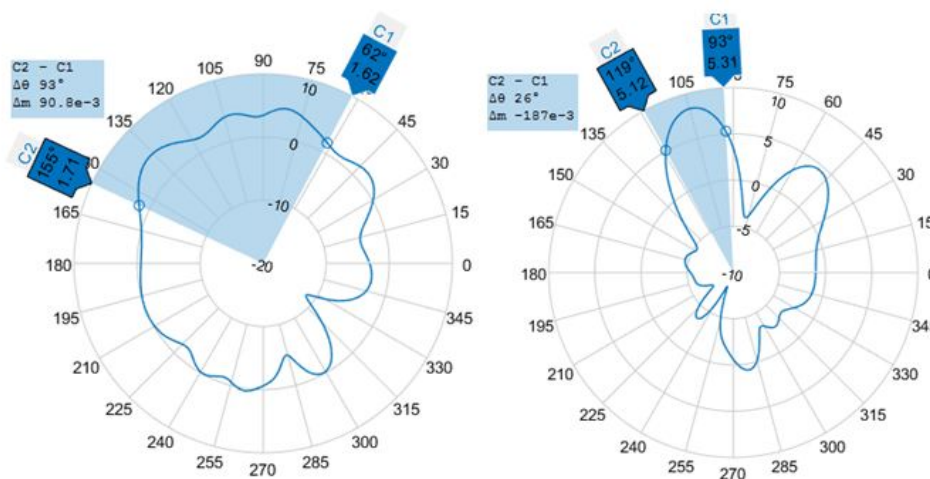


Сурет 5 – Matlab ортасындағы анизотропты патч фракталдық антеннасының моделі

dBi-ды құрайды, бұл патч антенна үшін өте жақсы көрсеткіш болып саналады. 7-суретте осы кеңістіктік бағытталу диаграммасының горизонталь және вертикаль жазықтықтардағы көлденең қималары, яғни 2D бейнелері және негізгі жапырақшалардың ендері градусық өлшемдермен келтірілген.

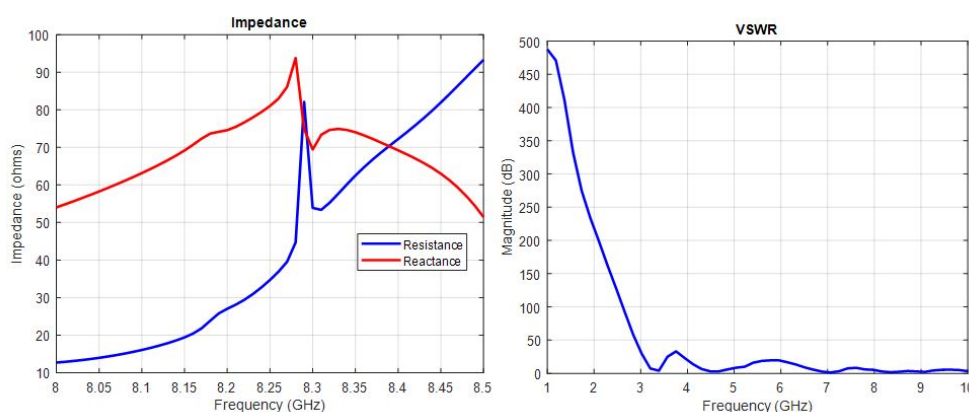


Сурет 6 – Анизотропты фракталдың 3-итерациясына негізделген жолақты антеннаның жиіліктік сипаттамасы мен 8,34 ГГц жиіліктегі бағытталу диаграммасының бейнесі



Сурет 7 – Анизотропты фракталдың 3-итерациясына негізделген жолақты антеннаның 8,34 ГГц резонанстық жиіліктегі бағытталу диаграммасының ені. Сол жағындағы азимуты 0° , оң жағындағы азимуты 90° болғандағы

Келесі 8-суретте (сол жағы) антеннаның жиілік бойынша толық кедергісі көрсетілген. Көк түспен резистивті құраушысы, қызыл түспен реактивті құраушысы белгіленген. 8,34 ГГц жиіліктегі олардың мәндері 60 және 74 Омдарды құрайды, сондағы комплексті кедергі 95 Омға тең. Суреттегі қысықтардан дәл резонанстық жиіліктегі кедергінің мәндерінде минимумдарды байқаймыз. Бұл өз кезегінде антеннаның осы жиіліктердегі импедансының төмендейтінін аңғартады. 8-суретте (оң жағы) қарастырылып отырған антеннаның кернеуі бойынша тұрғын толқын коэффициенті (ТТК) келтірілген. Антенна резонасы маңындағы жиіліктерде ТТК мәні 2-ден аз болып тұр, яғни осы жиілікте антенна мен фидер арасындағы толқындық кедергі мәні бойынша «сәйкестендірілгендікті» көреміз.



СУРЕТ 8 – Анизотропты фрактадың 3-итерациясына негізделген жолақты антеннаның импедансы мен тұрғын толқын коэффициентінің жиіліктен тәуелділігі

Қорытынды. Модельдеулер нәтижесінде анизотроптық фрактал негізіндегі қарастырылған антенналардың барлық параметрлерінің антенна жұмысының белгіленген нормалық көрсеткіштеріне сай екені көрсетілді және артықшылықтары атап өтілді. Бұл алынған сипаттамалар антеннаның жиіліктік, электрлік және бағытталу қасиеттері жайлы толық мәліметтер алуға, олардың ерекшеліктерін сипаттауға үлкен көмегін тигізеді және Matlab бағдарламасының осы тектес зерттеулер жүргізгендегі мүмкіндігін толық көрсетеді. Сонымен қатар, модельдеу барысында жасалған алгоритм және командалық листинг коды Antenna Toolbox пакетіне қосымша ретінде енгізуге мүмкіндік береді. Бұл жұмыста тек компьютерлік модель болғандықтан, оның нәтижелерін антенналық құрылғыларды зерттеудің тек бір жанама әдісі ретінде қарастыруымыз қажет, себебі толыққанды зерттеулер сәйкес жоғары дәлдікті өлшеу аспаптары мен арнайы лабораториялық бөлмелерде кешенді физикалық эксперименттер арқылы жүргізілуі тиіс.

Әдебиеттер тізімі

- Hoffmann T. et al. Rapid Integration of a Flexible. Wideband Beamformer with Wideband Antenna Technology. // 2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST). – MA: Waltham, USA. – 2019. – P. 1–5. doi: 10.1109/PAST43306.2019.9021106.
- Zahid M., Shoaib S., Amin Y., Excell P. and Lupin S. Ultra Wideband Antenna for Future 5G // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EConRus). – St. Petersburg and Moscow, Russia. – 2020. – P. 2280-2283. doi: 10.1109/EConRus49466.2020.9039066.
- Feng T., Yu Y., Wu L., Bai Y., Xiao Z. and Lu Z. A Human-Tracking Robot Using Ultra Wideband Technolog // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 42541–42550. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2859754.
- Qin P. and Xue Q. Compact Wideband LNA With Gain and Input Matching Bandwidth Extensions by Transformer // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2017. – Vol. 27. - № 7. – P. 657–659. doi: 10.1109/LMWC.2017.2711524.
- He J., Long F., Deng R., Shi J., Dai M. and Chen L. Flexible multiband OFDM ultra-wideband services based on optical frequency combs // IEEE OSA Journal of Optical Communications and Networking. – 2017. – Vol. 9. – № 5. – P. 393–400. doi: 10.1364/JOCN.9.000393.

- 6 Gorai A., Pal M. and Ghatak R. A Compact Fractal-Shaped Antenna for Ultrawideband and Bluetooth Wireless Systems With WLAN Rejection Functionality // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2017. – Vol. 16. – P.2163–2166. doi: 10.1109/LAWP.2017.2702208.
- 7 Amini A., Oraizi H. and Chaychizadeh M.A. Miniaturized UWB Log-Periodic Square Fractal Antenna // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2015. – Vol. 14. – P. 1322–1325. doi: 10.1109/LAWP.2015.2411712.
- 8 Wang Y., Wang Z. and Li J. UHF Moore Fractal Antennas for Online GIS PD Detection // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2017. – Vol. 16. – P. 852–855. doi: 10.1109/LAWP.2016.2609916.
- 9 Peristerianos A., Theopoulos A., Koutinos A.G., Kaifas T. and Siakavara K. Dual-Band Fractal Semi-Printed Element Antenna Arrays for MIMO Applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2016. – Vol. 15. – P. 730–733. doi: 10.1109/LAWP.2015.2470681.
- 10 Altaf A., Yang Y., Lee K. and Hwang K.C. Circularly Polarized Spidron Fractal Dielectric Resonator Antenna // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2015. – Vol. 14. – P. 1806–1809. doi: 10.1109/LAWP.2015.2427373.
- 11 Wei K., Zhu B. and Tao M. The Circular Polarization Diversity Antennas Achieved by a Fractal Defected Ground Structure // IEEE Access. – 2019. Vol. 7. – P. 92030–92036. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2927280.
- 12 Ansys Products. [Electronic resource] – URL: <https://www.ansys.com/> (қаралған күні: 29.01.2021)
- 13 Dassault Systemes. [Electronic resource] – URL: <https://www.3ds.com/> (қаралған күні: 29.01.2021)
- 14 MATLAB for Artificial Intelligence. [Electronic resource] – URL: <https://www.mathworks.com/> (қаралған күні: 29.01.2021)
- 15 Zhanabaev Z.Zh., Ibraimov M.K., Imanbayeva A.K., Karibayev B.A. and Namazbayev T.A. Fractal Antennas in Telecommunication Technologies // 2018 IEEE 12th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – Almaty, Kazakhstan. – 2018. – P. 1–4. doi: 10.1109/ICAICT.2018.8747153.

Б.А. Карибаев, А.К.Иманбаева, Т.А. Алтынбек

Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Проектирование полосковых патч-антенн с использованием Matlab

Аннотация. В данной статье рассматривается возможность проектирования антенн любой сложной формы, в том числе в форме геометрических фракталов, получения их электродинамических параметров в программной среде Matlab, широко используемого для решения задач технических вычислений. Объектами исследования были полосковые патч антенны на основе анизотропного фрактала в двух исполнениях. Основная проводящая сторона первой рассматриваемой модели монополярной антенны в начальной нулевой итерации имела длину 90 мм и ширину 2 мм, во второй модели патч антенна была выполнена в виде квадрата, стороны которого эволюционируют с анизотропным фракталом. Длина сторон квадрата, соответствующего нулевой итерации, составляет 27 мм. Были получены их частотно-зависимые электрические характеристики, в частности, коэффициент отражения S11, волновые сопротивления (импеданс), коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), диаграммы распределения тока по проводнику и диаграммы направленности и ширины их главных лепестков, коэффициенты усиления на резонансных частотах. Результаты характеристик рассмотренных моделей сравнивались с такой же моделью антенны, созданной методом последних элементов в программной среде High Frequency Structural Simulator (HFSS).

Ключевые слова: полосковая патч-антенна, анизотропный, фрактал, диаграмма ориентации, коэффициент отражения, моделирование, Matlab.

B.A. Karibayev, A.K. Imanbayeva, T.A. Altynbek

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Designing strip patch antennas using Matlab

Abstract. The paper describes the possibility of designing antennas of any complex shape, including geometric fractals, obtaining characteristics of their electrodynamic parameters in Matlab software environment, which is used to solve technical computing problems. The objects of research were strip patch antennas based on an anisotropic fractal in two versions. The main conducting side of the first monopole antenna model under consideration in the initial zero iteration had a length of 90 mm and a width of 2 mm. In the second model, the patch antenna has been made in the form of a square, the sides of which evolve with an anisotropic fractal. The length of the sides of the square corresponding to the zero iteration is 27 mm. Their frequency-dependent electrical characteristics were obtained, in particular, the reflection coefficient S11, wave resistance (or impedance), voltage standing wave ratio (VSWR), current distribution patterns along the conductor and radiation patterns and their widths of the main lobes, gains at resonant frequencies. The results of the characteristics of the considered models were compared with the same antenna model created by the method of the last elements in the High Frequency Structural Simulator (HFSS) software environment.

Keywords: band patch antenna, anisotropic, fractal, radiation pattern, reflection coefficient, simulation Matlab.

References

- 1 Hoffmann T. et al. Rapid Integration of a Flexible, Wideband Beamformer with Wideband Antenna Technology, 2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST), MA: Waltham, USA, 1–5 (2019). doi: 10.1109/PAST43306.2019.9021106.
- 2 Zahid M., Shoaib S., Amin Y., Excell P. and Lupin S. Ultra Wideband Antenna for Future 5G, 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2280–2283 (2020). doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039066.
- 3 Feng T., Yu Y., Wu L., Bai Y., Xiao Z. and Lu Z. A Human-Tracking Robot Using Ultra Wideband Technology, IEEE Access, 6, 42541–42550 (2018).
- 4 Qin P. and Xue Q. Compact Wideband LNA With Gain and Input Matching Bandwidth Extensions by Transformer, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 7(27), 657–659 (2017). doi: 10.1109/LMWC.2017.2711524.
- 5 He J., Long F., Deng R., Shi J., Dai M. and Chen L. Flexible multiband OFDM ultra-wideband services based on optical frequency combs, IEEE OSA Journal of Optical Communications and Networking, 5(9), 393–400 (2017). doi: 10.1364/JOCN.9.000393.
- 6 Gorai A., Pal M. and Ghatak R. A Compact Fractal-Shaped Antenna for Ultrawideband and Bluetooth Wireless Systems With WLAN Rejection Functionality, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 16, 2163–2166 (2017). doi: 10.1109/LAWP.2017.2702208.
- 7 Amini A., Oraizi H. and Chaychizadeh M.A. Miniaturized UWB Log-Periodic Square Fractal Antenna, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 14, 1322–1325 (2015). doi: 10.1109/LAWP.2015.2411712.
- 8 Wang Y., Wang Z. and Li J. UHF Moore Fractal Antennas for Online GIS PD Detection, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 16, 852–855 (2017). doi: 10.1109/LAWP.2016.2609916.
- 9 Peristerianos A., Theopoulos A., Koutinos A.G., Kaifas T. and Siakavara K. Dual-Band Fractal Semi-Printed Element Antenna Arrays for MIMO Applications, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 15, 730–733 (2016). doi: 10.1109/LAWP.2015.2470681.
- 10 Altaf A., Yang Y., Lee K. and Hwang K.C. Circularly Polarized Spidron Fractal Dielectric Resonator Antenna, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 14, 1806–1809 (2015). doi: 10.1109/LAWP.2015.2427373.
- 11 Wei K., Zhu B. and Tao M. The Circular Polarization Diversity Antennas Achieved by a Fractal Defected Ground Structure, IEEE Access, 7, 92030–92036 (2019). doi: 10.1109/ACCESS.2019.2927280.
- 12 Ansys Products. [Electronic resource] – Available at: <https://www.ansys.com/> (Accessed: 29.01.2021)
- 13 Dassault Systemes. [Electronic resource] – Available at: <https://www.3ds.com/> (Accessed: 29.01.2021)
- 14 MATLAB for Artificial Intelligence. [Electronic resource] – Available at: <https://www.mathworks.com/> (Accessed: 29.01.2021)
- 15 Zhanabaev Z.Zh., Ibraimov M.K., Imanbayeva A.K., Karibayev B.A. and Namazbayev T.A. Fractal Antennas in Telecommunication Technologies, 2018 IEEE 12th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), Almaty, Kazakhstan, 1–4 (2018). doi: 10.1109/ICAICT.2018.8747153.

Авторлар туралы мәлімет:

Карибаев Б.А. - **негізгі автор**, PhD, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті эксперименттік және теориялық ғылыми зерттеу институтының жетекші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан.

Иманбаева А.К. - физика-математика ғылымдарының кандидаты, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті эксперименттік және теориялық ғылыми зерттеу институтының жетекші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан.

Алтынбек Т.А. - Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің «Радиотехника, электроника және телекоммуникация» мамандығының 2 курс магистранты, Алматы, Қазақстан.

Karibayev B.A. - **The main author**, PhD, Leading Researcher, Institute of Experimental and Theoretical Physics Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan.

Imanbayeva A.K. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of Experimental and Theoretical Physics Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan.

Altynbek T.A. - The 2nd year master's student in Radio Engineering, Electronics and Telecommunications at the Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan.