

MİKRODALĞA DİAPAZONUNDA İŞLƏYƏN FAZLAŞDIRILMIŞ ANTENA QƏFƏSİNİN MODELƏŞDİRİLMƏSİ

Məmməd Aydın oğlu Abdullayev

Azərbaycan Texnologiya Universiteti, Gəncə, Azərbaycan

MODELING OF A PHASED ANTENNA ARRAY OPERATING IN THE MICROWAVE RANGE

Mammad Aydın Abdullayev

Azerbaijan Technological University, Ganja, Azerbaijan: m.abdullaev98@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-8727-2345>

Abstract. Models of the ring antenna array were developed and the main characteristics of this antenna array were analyzed. The results obtained suggest that the considered variants of the microwave ring antenna array with discrete scanning of azimuthal radiation patterns, taking into account weight, dimensions and electrical characteristics, look promising for use in equipment of radiocommunication, radar and radio control systems. Also, a method for correcting the distortions of the direction diagrams of the ring antenna array, formed as a result of the interaction, was proposed. To implement this technique, an algorithm was developed for changing the amplitude distribution of the electromagnetic field strength from the phase distribution of the electromagnetic field strength to compensate for the distortion of the parameters resulting from the deviation in the radiation diagram.

Keywords: antenna array, microwave range, directivity diagram, gain coefficient, modeling.

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Giriş

Müasir dövrdə müxtəlif sahələrində müxtəlif texniki vasitə və sistemlər geniş tətbiq olunur [1, 2]. Bir tərəfdən radio ilə idarə olunan müxtəlif bazalara malik pilotsuz nəqliyyat vasitələri, digər tərəfdən isə Wi-Max standartının genişzolaqlı naqilsiz girişinə əsaslanan radio sistemləri xüsusilə seçilir. Tamamilə fərqli görünən bu vasitə və sistemlərə maraq, radiokanalların həm pilotsuz nəqliyyat vasitələrinin radioidarəetmə sistemlərində, həm də genişzolaqlı naqilsiz çıxış üçün radio sistemlərində istifadəsi ilə əlaqədardır. Buna görə də, bu sistemlərin etibarlılığı və işləmə keyfiyyəti təkcə faktiki qəbuledici radio avadanlığının xüsusiyyətlərindən deyil, həm də antena qidalandırıcı qurğularının parametrləri – şüalanma diaqramlarının quruluşu və xarakteristikaları, gücləndirmə əmsalları və antenanın şüalanma diaqramlarına nəzarət imkanları ilə sıx bağlıdır. Pilotsuz uçuş aparatlarının idarəetmə və rabitə sistemlərinin, eləcə də genişzolaqlı naqilsiz çıxış sistemlərinin avadanlıqlarında müxtəlif antenalar istifadə olunur [3, 4]. Bu antenalar həm məkan üzrə sabit olan dairəvi, sektor və iynə formalı şüalanma diaqramlarına, həm də elektriklə idarə olunan şüalanma diaqramına malik ola bilər.

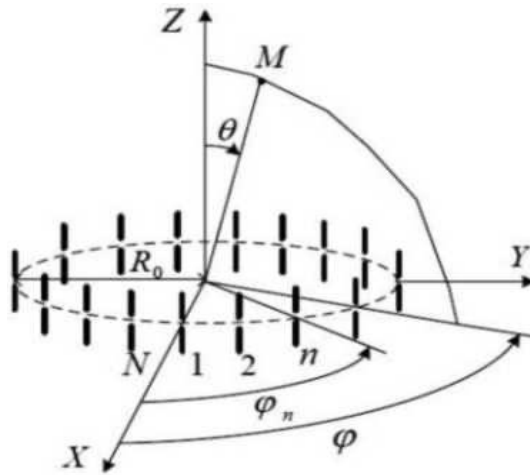
İdarəetmə və rabitə sistemlərinin avadanlıqlarına qoyulan çəki, ölçü və qiymət tələblərinin, eləcə də bu sistemlərin tezlik genişliyi, səs-küy səviyyəsi və müdaxiləyə davamlılığı, həmçinin funksionallığına artan ehtiyac, antena texnologiyalarının daim təkmilləşdirilməsini zəruri edir. Bu kontekstdə xüsusi maraq doğuran halqa antena qəfəsləri, dairəvi, çoxşüalı, sabit və skan edən sektor tipli şüalanma diaqramlarının formalaşdırılmasına imkan verir. Bu da bəzi tətbiq sahələrində sabit şüalanma diaqramına malik antenaların uşurla əvəz olunmasını təmin edir.

Burada stasionar və mobil genişzolaqlı naqilsiz giriş avadanlıq sistemlərində, həmçinin radionəzarət və pilotsuz nəqliyyat vasitələrinin rabitə sistemlərində istifadə üçün nəzərdə tutulmuş azimutal şüalanma diaqramlarını elektrik siqnalları ilə dəyişdirilən mikrodalğalı dairəvi antena qəfəsləri işləni b hazırlanması və tədqiqi olmuşdur. Aşağıda müzakirə olunan dairəvi antena qəfəsləri 3,4-3,7 QHs tezlik diapazonu üçün hazırlanmışdır.

Dairəvi antena qəfəsinin modeləşdirilməsi

Dairəvi antena qəfəsi, silindrik antena qəfəsinin yalnız bir səviyyədə yerləşən şüalandırıcı elementlərdən ibarət variantı kimi nəzərdən keçirilə bilər (şəkil 1).

Adi passiv dairəvi antenna qəfəsinin azimut müstəvisində şüalanma diaqramlarının elektrik skanı adətən aşağıdakı üsullarla həyata keçirilir: fazalı antenna qəfəslərinin faza dəyişdiricilərinin tətbiqi [5, 6], xüsusi matris və ya linzalar vasitəsilə müəyyən istiqamətdə şüalandırıcı sahələrin mərhələli tənzimlənməsi, eksklüziv şüalanma və linzaların seçilməsi, həmçinin diskret keçidli skan sistemində malik dairəvi antenna qəfəslərində soyuducuların istifadəsi. Bundan əlavə, passiv halqalı mikrodalğalı antenna qəfəslərinin iki variantı nəzərdən keçirilir: idarə olunan faza dəyişdiricilərinə istifadə edərək şüalanma diaqramlarının faza skanlama ilə, şəkil 2, a və keçid elementləri əsasında qurulmuş açarlardan istifadə etməklə, şəkil 2, b.



Şəkil 1. Dairəvi antenna qəfəsi

Dairəvi simmetriya sayəsində halqa antenna qəfəsləri demək olar ki, dairəvi (qəfəs müstəvisində) şüalanma diaqramları əldə etməyə, həmçinin 314° daxilində XOY müstəvisində skan edildikdə forması dəyişməz saxlanıla bilən skan bucağı sektoru və ya hətta iynəşəkilli şüalanma diaqramları yaratmağa imkan verir [7]. Mikrodalğalı dairəvi fazalı antenna qəfəsləri çox kiçik bucaq addımı ilə şüalanma diaqramlarının dairəvi skanını (yönləndirməni) təmin edə bilər [8].

Eyni zamanda, ənənəvi fazalı antenna qəfəslərinin ciddi çatışmazlıqları da mövcuddur – mikrodalğalı yarımkeçirici faza dəyişdiricilərində yüksək itkilik itkisi, bu da fazalı antenna qəfəslərinin səmərəliliyini və gücləndirmə qabiliyyətini məhdudlaşdırır, həmçinin idarəetmə sisteminin mürəkkəbliyinə səbəb olur [9].

Diskret keçidli şüalanma diaqramı skanına malik halqa antenna qəfəsləri daha sadə idarəetmə sistemində, açarlarda daha az itkilik itkilərinə, buna müvafiq olaraq daha yüksək səmərəlilik və gücləndirmə qabiliyyətinə malikdir. Lakin bu qəfəslər, qəfəs elementlərinin sayından asılı olaraq müəyyən bucaq addımı ilə diskret skan təmin edir. Bununla belə, bu xüsusiyyət belə halqa antenna qəfəslərinin bir çox real idarəetmə və rabitə sistemlərində istifadəsinə mane olmur [10].

Burada mikrodalğalı dairəvi antenna qəfəslərinin iki variantının işlənilib hazırlanması və simulyasiya nəticələri təqdim olunur: şaquli asimmetrik vibratorlardan ibarət 8 və 16 elementli aşağıprofilli halqa antenna qəfəsləri və xətti zolaqlı antenna qəfəslərindən ibarət 8 elementli halqa antenna massivi qəfəsi. Dairəvi antenna qəfəsləri azimutal istiqamətdə ən azı 6-8 dB gücləndirmə əmsali əldə etmək üçün hesablanmışdır.

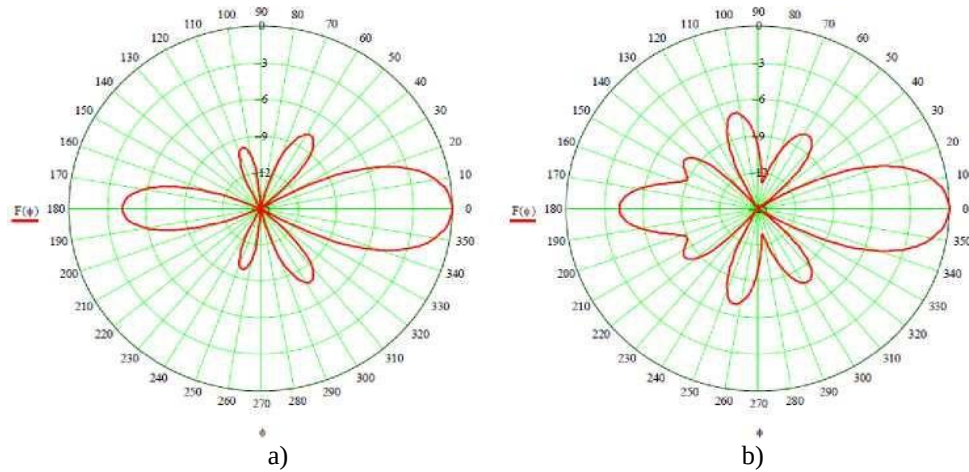
Vibratorlardan ibarət dairəvi mikrodalğalı antenna qəfəsi şəkil 3-də təsvir edilmişdir, burada: 1 – ekran; 2 – silindrik reflektor; 3 – şüalandırıcı; 4 – koaksial birləşdirici; R_e – ekran radiusudur; R_p və H_p – reflektorun radiusu və hündürlüyü; R_i koordinatların başlanğıcından emitentin şaquli oxuna qədər olan məsafədir; θ və φ müşahidə M nöqtəsinə istiqaməti təyin edən meridional və azimutal bucaqlardır (M' – M nöqtəsinin XOY üfüqi müstəvisinə proyeksiyasıdır).

Dairəvi antenna qəfəsinin dizayn parametrləri [11, 12]-də təsvir olunan metod əsasında hesablanmışdır. Bu zaman nəzərə alınmışdır ki, məsələn, azimutal müstəvidə şüalanma diaqramlarının diskret

Figure 1 consists of two circuit diagrams, (a) and (b), representing reconfigurable 8-port networks. Both diagrams are enclosed in an octagonal boundary with ports labeled 1 through 8. In diagram (a), the internal components include a 'phase shifter' and 'power dividers'. The 'input' is connected to a central node that branches into two paths, each leading to a 'power divider'. The outputs of these dividers are connected to the phase shifter and then to the ports. In diagram (b), the internal components include 'power dividers' and 'switches'. The 'input' is connected to a central node that branches into two paths, each leading to a 'power divider'. The outputs of these dividers are connected to the switches, which then lead to the ports.

96

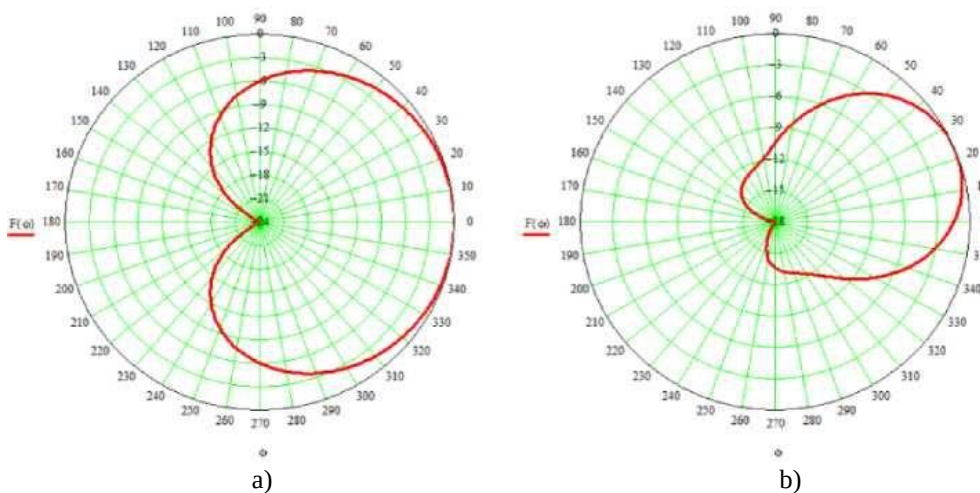
ötürücü kanalında yan şüalanma səviyyəsini aşağı saxlamaq baxımından qəbuledilməzdir. Təbii ki, halqa antenna qəfəsinin elementlərinin qeyri-bərabər həyəcanlanması halında daimi yan şüalanma səviyyəsi azaldıla bilər [3, 4]. Lakin bu halda şüaformalaşdırma sisteminin əhəmiyyətli dərəcədə mürəkkəbləşməsi və nəticədə antenna şüalanma gücünün azalması baş verəcək.



Şəkil 4. Halqa antenna qəfəsinin istiqamətlilik diaqramlarının nümunələri: dairəvi şüalanma diaqramına malik şüalandırıcılardan ibarət variant (a) və kardiod şüalanma diaqramına malik şüalandırıcılardan ibarət variant (b)

Şəkil 5-də kardiod şüalanma diaqramına malik şüalandırıcılardan ibarət səkkiz elementli halqa antenna qəfəsinin şüalanma diaqramları göstərilmişdir. Hesablamalar halqa antenna qəfəsində bir və iki qonşu şüalandırıcının eyni amplitud və fazalı cərəyanla həyəcanlandırılması halı üçün aparılmışdır.

Şəkil 5-dən göründüyü kimi: bir şüalandırıcı həyəcanlandırıldıqda, şüalanma diaqramının eni 134° təşkil edir. İki şüalandırıcı həyəcanlandırıldıqda, şüalanma diaqramı 66° -yə qədər daralır və arxa istiqamətdə dərin sönmələr müşahidə edilir. Üç şüalandırıcı həyəcanlandırıldıqda, şüalanma diaqramı 54° -yə qədər daralır, bu isə dairəvi antenna qəfəsinin istiqamətliliyini artırır, lakin idarəetmə sxeminin xeyli mürəkkəbləşməsinə səbəb olur.



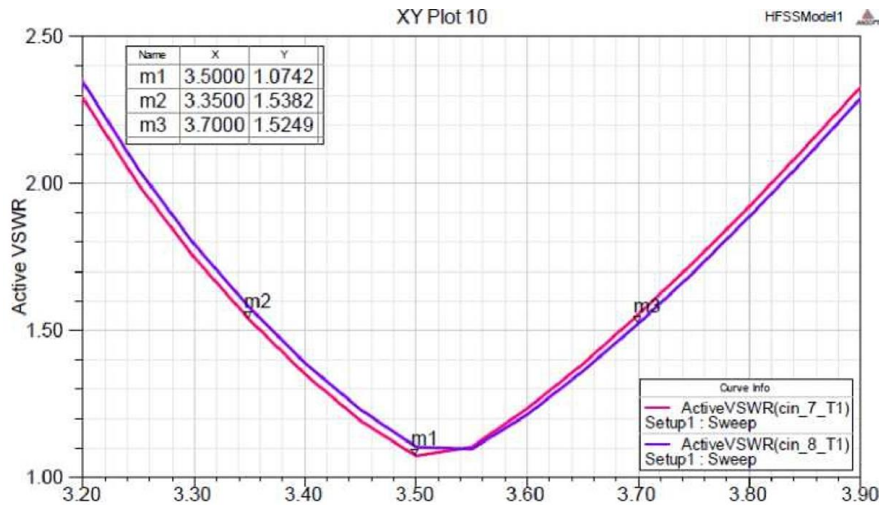
Şəkil 5. Halqavari antenna qəfəsinin şüalanma diaqramları: bir aktiv şüalanma (a) və iki bitişik aktiv şüalanma ilə (b)

Beləliklə, sektoral (bucaqlı aralıqda) şüalanma diaqramlarının skan edilməsi rejimində praktiki istifadəyə gəldikdə, qonşu şüalandırıcı cütlərinin həyəcanlandırılması rejimində işləyən diskret keçidli skana malik halqa antenna qəfəsi daha cəlbedici görünür. Xüsusilə də mikrodalğa açarlarındakı istilik itkilərinin faza dəyişdiricilərindəkindən bir neçə desibel daha az olması bu variantı üstün edir.

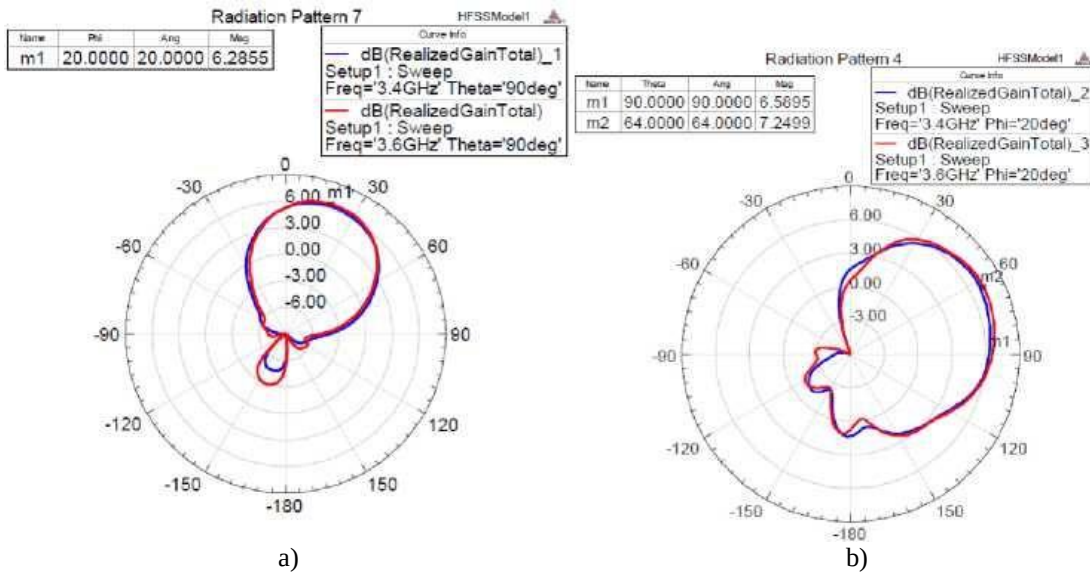
Halqa antenna qəfəs modelinin parametrləri: 3,5 QHs orta tezlik üçün radiusunun hesablanmış qiyməti $R_i = 47 \text{ mm}$; reflektordan emitentin şaquli oxuna qədər olan məsafə ($\lambda_{\min}/4$) 21 mm; reflektorun radiusu $R_p = 26 \text{ mm}$; şüalandırıcının şaquli oxundan ekranın kənarına qədər olan məsafə ($\lambda_{\min}/4$) 21 mm; ekran radiusu $R_e = 68 \text{ mm}$; reflektor hündürlüyü H_p 1,2 $\lambda_{\min}/4 = 31,5 \text{ mm}$ -ə bərabər götürülür. Vibrator elementlərinin nominal giriş müqaviməti 50 Om-dur.

Simulyasiya HFSS proqramı vasitəsilə həyata keçirilmişdir. Şəkil 6-da həlqəvi antenna qəfəsinin bir cüt bitişik aktiv elementinin aktiv durğun dalğa nisbətinin tezlik xüsusiyyətləri göstərilir (uyğun yüklər qalanların girişlərinə bağlıdır). Bu halda minimum dayanıqlı dalğa nisbəti = 1,07 orta iş tezliyində əldə edilir və 3,36-3,68 QHs tezlik diapazonunda daimi dalğa nisbəti 1,5-dən çox deyil.

Bir cüt aktiv element (1 və 2) vəziyyətində dairəvi antenna qəfəsinin şüalanma diqaramarı şəkil 7-də göstərilmişdir. Şəkil 7, a-da göstərilən azimut şüalanma sxemlərinə əsasən görünür ki, şüalanma sxemlərinin eni təxminən 65° təşkil edir ki, bu da ən azı 4,5 dB gücləndirmə əmsalı səviyyəsində skan edərkən qonşu azimut istiqamətlərində şüalanma diqaramalarının üst-üstə düşməsi üçün kifayət qədərdir. Bu halda, azimut müstəvisində həlqəvi antenna qəfəsinin gücləndirmə əmsalı 6,2 dB təşkil edir, maksimum qiymət (7,2 dB) 26° yüksəklik bucağı ilə əldə edilir (şəkil 7, b).



Şəkil 6. Dairəvi antenna qəfəsinin iki bitişik aktiv elementinin girişlərində aktiv durğun dalğa əmsalının tezlik xüsusiyyətləri



Şəkil 7. İki aktiv element üçün 3,4 və 3,6 QHs tezliklərdə həlqəvi antenna qəfəsinin azimutal (a) və meridional (b) şüalanma nümunələri

Əldə edilən nəticələrə əsasən belə qənaətə gəlmək olar ki, yuxarıda müzakirə olunan vibrator-dan ibarət halqa antenna qəfəsləri mobil Wi-Max sistemində abunəçi terminal antenası kimi istifadə edilə bilər. Bu, şüalanma diaqramlarının baza stansiyasına yönəldilmiş vəziyyətdə saxlanmasını təmin etmək üçün nəzərdə tutulur. Bundan əlavə, yerüstü və hava pilotsuz uçuş aparatlarının idarə etmə sistemlərinin avadanlıqlarında, nisbətən kiçik gücləndirmə əmsalı tələb olunan hallarda effektiv tətbiq edilə bilər. Gücləndirmə əmsalı 8-10 dB-dən yüksək olan və aşağı yan şüalanma səviyyəsinə malik antenalara ehtiyac duyulan hallarda, meridional müstəvidə şüalanma diaqramlarının daralmasını təmin edən və bununla da istiqamətliklik və gücləndirmə əmsalını artıran şaquli antenna qəfəslərindən ibarət halqa antenna qəfəslərinin istifadəsi məqsədəuyğundur.

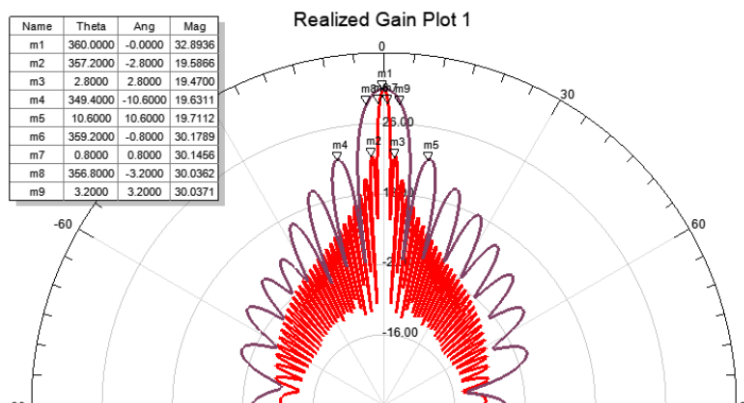
3,4-3,6 QHs tezlik diapazonu üçün nəzərdə tutulmuş mikrodalğalı zolaqlı halqa massivi, şüalanma diaqramını bucaqlı aralıqda skan edən rejimində ən azı 14 dB gücləndirmə əldə etmək üçün dizayn edilmişdir. Bu məqsədlə, halqa antenna qəfəsi bucaqlı aralıqla kollinear antenalar şəklində düzülmüş səkkiz elementdən ibarətdir.

Dairəvi halqa antenna qəfəsi sisteminin əmsalı (dairəvi antenna qəfəsindəki bütün şüalandırıcı elementlərin birgə təsirini müəyyən edən ədədi və ya riyazi faktor), bütün fərdi şüalandırıcı elementlərin elektromaqnit sahələrinin toplanması yolu ilə hesablanır. Bu halda, halqa antenna qəfəsinin müstəvisində yerləşən və koordinatları x_n, y_n olan hər bir element üçün faza yerdəyişməsi aşağıdakı düstur əsasında müəyyən edilir:

$$\psi_{xy} = 57,3 \cdot k \cdot (x_n \cdot \sin(\nu) \cdot \cos(\nu) \cdot \sin(\varphi)), \quad (1)$$

burada k dalğa ədədi; x_n, y_n – müvafiq olaraq X oxu (azimut müstəvisi) və Y oxu boyunca (yüksəklik müstəvisi) şüalandırıcının yerləşdiyi koordinatlar; φ – y və z oxları arasındakı bucaq, vektor yz müstəvisinə proyeksiyaya ortoqonaldır; ϑ – x oxu ilə yz müstəvisi arasındakı bucaqdır.

Elektrik skan etmənin antenna qəfəsinin parametrlərinə təsirinin təhlili yastı çox elementli aktiv fazalı antenna qəfəsləri üzərində aparılmışdır. Qəfəs diskret faza dəyişdiriciləri ilə signal ötürmə yollarından istifadə edir, diskretlik dərəcəsi 5,625 dərəcədir. Təhlil sonlu elementlər metodundan istifadə etməklə kompüter dəstəklili dizayn sistemində aparılmışdır. Aşağıda analizin qrafik formada nəticələri təqdim olunur: bərabər faza paylanmasına malik halqa antenna qəfəsinin hesablanmış şüalanma diaqramları şəkil 8-də göstərilmişdir. Hündürlük müstəvisində nəticələr təqdim olunmamışdır, çünki texniki spesifikasiyaya əsasən, kənara çıxırma ± 10 dərəcə daxilində tələb olunur və nəticədə əlavə tənzimləmə tələb olunmur.



Şəkil 8. Bərabər faza paylanması ilə antenna qəfəsinin şüalanma diaqramı

Şəkil 8-də azimut və yüksəklikdə 9 QHs tezliyində antenna qəfəsinin şüalanma diaqramının bölmələri göstərilmişdir. Yüksəklikdə şüalandırıcıların sayının az olması səbəbindən sonrakı analizlər yalnız azimutda aparılmışdır. Göründüyü kimi, əsas şüa normadan kənara çıxdıqda şüalanma sxeminin xüsusiyyətləri dəyişir.

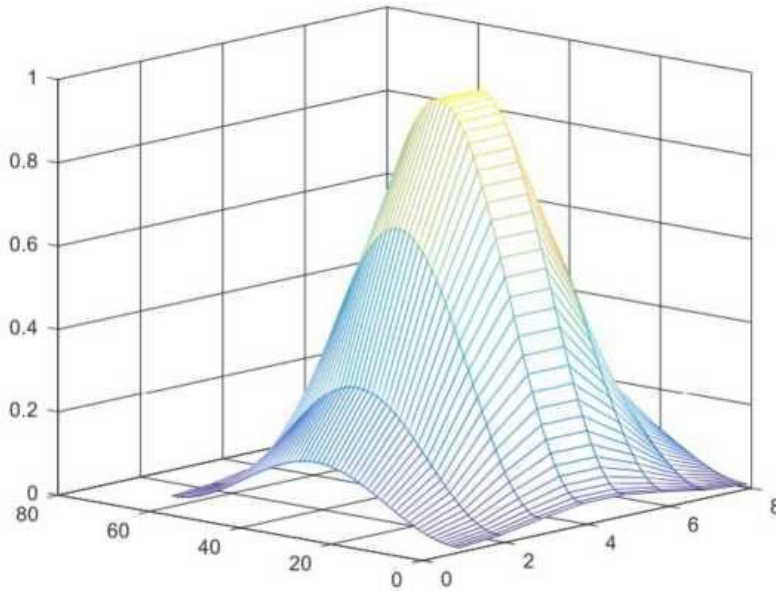
Şəkil 8-dən göründüyü kimi, elektron skanlama nəticəsində şüasının normadan kənara çıxması əsas şüalanma diaqramının eninə və daimi yan şüalanma səviyyələrinə birbaşa təsir göstərir. Şüa 60 dərəcəyə qədər yerdəyişdikdə qazanc 6,45 dB azalır, yan şüalanma səviyyəsi 1 dB pisləşir və 0,5 səviyyəsində əsas şüalanma səviyyəsinin eni iki dəfədən çox artır.

Şüalanma diaqramının xarakteristikalarını düzəltmək üçün, elektromaqnit sahəsinin intensivliyinin “kosinus kvadratı üzərində baza” amplitud paylanması istifadəsi təklif edilir, çünki bu üsul baza hündürlüyünün seçilməsi baxımından ən çevik metoddur:

$$A_n m = \left(\Delta x + (1 - \Delta x) \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi n}{N-1} \right) \right) \times \left(\Delta y + (1 - \Delta y) \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi m}{M-1} \right) \right), \quad (2)$$

burada $\Delta x, \Delta y$ – müvafiq olaraq x və y oxları boyunca postamentin hündürlüyü; n, m – müvafiq olaraq x və y oxları boyunca yerləşən emitentlərin mərkəzləri arasındakı məsafədir; N, M – müvafiq olaraq x və y oxları boyunca yerləşən şüalandırıcıların sayıdır.

Amplitud paylanmasının antenanın xarakteristikalarına təsirini təhlil etmək üçün X oxu boyunca postamentin sabit qiymətləri götürüldü: 0,5; 0,3; 0,15; 0,1; Y oxu boyunca: 0,5; 0,3; 0,1; 0,05; 0,01. Şəkil 9-da altıq üzərində kvadrat kosinus amplitud paylanmasının qrafik təsviri göstərilmişdir.



Şəkil 9. Altıq üzərində kvadrat kosinus amplitud paylanmasının qrafik təsviri

Bərabər faza paylanması üçün postamentdə ilkin kosinus-kvadrat amplitud paylanmasını müəyyən etmək, sonra şüa fırlanması üçün hesablanmış faza paylanmalarının xüsusiyyətlərinin təhrifini təhlil etmək lazımdır. Hər bir şüa istiqaməti üçün postament hündürlüyü seçimi antena şəbəkəsinin son xüsusiyyətlərini təyin edəcəkdir.

Şəkil 9-dan belə nəticə çıxır ki, qaldırma müstəvisində mövcud olan şüalandırıcıların sayı (8 ədəd) amplituda paylanmalarının tətbiq imkanlarını məhdudlaşdırır. Şüalanma diaqramının düzəlişlərinin dəqiqliyini artırmağın bir yolu şüalandırıcıların sayını artırmaqdır.

Nəticə

Həlqəvi antena qəfəsinin modelləri hazırlanmış və bu antena qəfəsinin əsas xarakteristikalarının təhlili aparılmışdır. Alınmış nəticələr onu deməyə əsas verir ki, çəki, ölçü və elektrik xüsusiyyətləri nəzərə alınmaqla azimutal şüalanma sxemlərinin diskret skanlanması ilə mikrodalğalı halqa antena

qəfəsinin nəzərdən keçirilən variantları radiorabitə, radiolokasiya və radionəzarət sistemlərinin avadanlıqlarında istifadə üçün perspektivli görünür. Həm də hazırlanmış həlqəvi antena qəfəsinin istiqamətlənmə diaqramlarının təhriflərinin aradan qaldırılması üçün üsul təklif edilmişdir. Bu texnikanı həyata keçirmək üçün istiqamətlənmə diaqramında təhrifləri kompensasiya etmək üçün elektromaqnit sahəsinin gücünün amplitud paylanması elektromaqnit sahəsinin gücünün faza paylanmasıdan dəyişdirilməsi alqoritmi hazırlanmışdır.

ƏDƏBİYYAT

1. Pinuela M., Mitcheson P.D., Lucyszyn S. Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(7), pp. 2715-2726.
2. Prabhu P., Poongodi C., Sarwesh P., Shanmugam A. Design a low profile printed monopole antenna for RFID applications. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, 2013, 2(2), pp. 454-459.
3. Resti M.M., Kurvinen J., Ala-Laurinaho J., Khripkov A., Ilvonen J., Wouterghem J., Viikari V. Dual-Polarized mm-Wave Endfire Chain-Slot Antenna for Mobile Devices. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(1), pp. 25-34.
4. Gyoungdeuk K., Kim D., Lim K., Yang C., You C., Kim S. Dual-Band and Dual-Polarized Rhombic Patch Antenna Array for 5G mmWave RF Front End Antenna-in-Package Module. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(7), pp. 2120-2124.
5. Hong W. The role of millimeter-wave technologies in 5G/6G wireless communications. *IEEE J. Microw.*, 2021, 1(1), pp. 101-122.
6. Xia R.L., Qu S.W., Li P.F., Jiang Q., Nie Z.P. An efficient decoupling feeding network for microstrip antenna array. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2015, 14, pp. 871-874.
7. Caratelli D., Toso G., Stukach O.V., Panokin N.V. Deterministic constrained synthesis technique for conformal aperiodic linear antenna arrays-Part I: theory. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(9), pp. 5951-5961.
8. Changwu T., Yang N., Leung K.W., Liu G. Design of MIMO Antennas with DRAs and a Dual-Function Decoupling/Radiating Monopole Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(4), pp. 3874-3885.
9. Charles A.G., Guo Y. A General Approach for Synthesizing Multibeam Antenna Arrays Employing Generalized Joined Coupler Matrix. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 256, pp. 7556-7564.
10. Ao L., Kwal-Man L. Single-layer wideband end-fire dual-polarized antenna array for device-to-device communication in 5G wireless systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(5), pp. 5142-5150.
11. Avishek D., Durbadal M., Rajib K. An optimal circular antenna array design considering the mutual coupling employing ant lion optimization. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2021, 13(2), pp. 164-172.
12. Barannikov I.A., Berdnikov K.A., Derevyankin S.I., Ishchenko E.A., Smuseva K.V., Fyedorov S.M. Reflector antenna based on SIW technology. *Radio engineering and communications*, 2022, 18(2), pp. 72-76.
13. Basit A., Wang W.Q., Nusenu S.Y. Adaptive transmit beamspace design for cognitive FDA radar tracking. *Radar Sonar Navig.*, 2019, 13(12), pp. 2083-2092.
14. Bo-Yu R., Xian-Qiang L., Yuan-Cheng Q., Hao D., Liang-Chang F., Rui H. Novel numerical analysis of electric fields in the near field of very-low-frequency antennas based on the charge simulation method. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2024, 18(8), pp. 618-628.

MİKRODALĞA DİAPAZONUNDA İŞLƏYƏN FAZLAŞDIRILMIŞ ANTENA QƏFƏSİNİN MODELLEŞDİRİLMƏSİ

M.A.Abdullayev

Xülasə. Həlqəvi antena qəfəsinin modelləri hazırlanmış və bu antena qəfəsinin əsas xarakteristikalarının təhlili aparılmışdır. Alınmış nəticələr onu deməyə əsas verir ki, çəki, ölçü və elektrik xüsusiyyətləri nəzərə alınmaqla azimutal şüalanma sxemlərinin diskret skanlanması ilə mikrodalğalı halqa antena qəfəsinin nəzərdən keçirilən variantları radiorabitə, radiolokasiya və radionəzarət sistemlərinin avadanlıqlarında istifadə üçün perspektivli görünür. Həm də hazırlanmış həlqəvi antena qəfəsinin istiqamətlənmə diaqramlarının təhriflərinin aradan qaldırılması üçün üsul təklif edilmişdir. Bu texnikanı həyata keçirmək üçün istiqamətlənmə diaqramında təhrifləri kompensasiya etmək üçün elektromaqnit sahəsinin gücünün amplitud paylanması elektromaqnit sahəsinin gücünün faza paylanmasıdan dəyişdirilməsi alqoritmi hazırlanmışdır.

Açar sözlər: antena qəfəsi, mikrodalğa diapazonu, istiqamətlənmə diaqramı, güclənmə əmsali, modelləşdirmə.

Accepted: 19.12.2025