Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:06 +0330 on Wednesday November 25th 2026

سال اول، شماره‌هاي ۱و ۲، پاییز و زمستان ۱۳۸۷
صص: ۳۱- ۳۹

فصلنامه علمي-پژوهشي
فنّاوری اطلاعات و ارتباطات ایران

محاسبه سریع انتگرالهای تشعشعی با روش FFT جهت کاربرد در تحلیل آنتنهای بازتابنده شکل‌یافته

ذاکر حسین فیروزه*[۱] ابوالقاسم زیدآبادی نژاد* حمید میرمحمد صادقی**

***دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان**

****پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه صنعتی اصفهان**

چکیده

در این مقاله، روشی سریع برای محاسبه پترن تشعشعی میدان دور آنتنهای بازتابنده[۲] با تحریک دلخواه در محل تغذیه ارائه می‌گردد. آنتن بازتابنده با روش نور هندسی GO[۳] تحلیل شده، سپس میدانهای تشعشعی با روش میدان دریچه AFM[۴] بدست آمده و انتگرالهای تشعشعی با تبدیل فوریه دوبعدی FFT مبتنی بر مش‌بندی بهینه دریچه محاسبه می‌شوند. براساس روش ارائه شده، نرم‌افزاری مبتنی بر MATLAB طراحی و پیاده‌سازی شده است که قابلیت شبیه‌سازی آنتنهای بازتابنده شکل‌یافته با ابعاد بزرگ نسبت به طول موج و تغذیه جابجا شده از کانون را دارد. به عنوان نمونه، دو آنتن مورد استفاده در صنایع نظامی از جمله آنتن رادار مراقبت هوایی و رادار تاکتیکی TPS-۴۳ تحلیل شده و با نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار FEKO و اندازه‌گیری مقایسه شده است. این روش در عین سادگی، سرعت و دقت مناسبی در تحلیل آنتنهای بازتابنده شکل‌یافته دارد. لذا نرم‌افزار حاصل در طراحی آنتنهای بازتابنده با تغذیه جابجا شده، می‌تواند یک ابزار مناسب جهت تعیین اولیه کارآیی آنتن و مشخصات تشعشعی موردنیاز باشد و در صورت حصول پارامترهای طراحی موردنظر، شبیه‌سازی دقیق‌تر با نرم‌افزارهایی نظیر FEKO یا NEC انجام شود و بدین صورت زمان موردنیاز در روند طراحی کمتر شود.

کلید واژگان: آنتن‌های بازتابنده، انتگرال‌های تشعشعی، FFT.

۱- مقدمه

امروزه انواع آنتنهای بازتابنده در صنایع مخابراتی و نظامی بکار برده می‌شوند و متناسب با کاربردشان شکل و تغذیه متفاوتی دارند. بویژه آنتنهای بازتابنده شکل‌یافته با تغذیه جابجاشده[۱] از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند زیرا دارای SLL[۲] بسیار پایین و انسداد تغذیه[۳] کم هستند و در نتیجه، آنتنهای مناسبی برای کاربرد در مخابرات ماهواره‌ای می‌باشند. همچنین به جای روشهای مکانیکی پرهزینه جهت حرکت کل سیستم آنتنی می‌توان بازتابنده‌های با تغذیه جابجاشده و آنتنهای چند پرتو[۴] با تغذیه چندگانه را جهت پویش پرتو اصلی استفاده نمود [۱-۷].

تاکنون مقالات زیادی برای تحلیل آنتنهای بازتابنده جهت محاسبه میدانهای تشعشعی و پارامترهای آنتنی ارائه شده است.

۱. **نویسنده عهده‌دار مکاتبات** (zhfirouzeh@aut.ac.ir)

۲.Reflector antennas

۳.Geometrical Optics

۴.Aperture Field Method

۱.Deplaced feeds

۲.Side Lobe Level

۳.Feed blockage

۴.Multi-beam

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:06 +0330 on Wednesday November 25th 2026

بطورکلی روشهای محاسبه میدانهای تشعشی حاصل از آنتن بازتابنده به دو دسته تقسیم می‌شود؛ میدان دریچه AFM و جریان القایی[1]. روش میدان دریچه AFM حل دقیقی روی محور و بخش جلوی آنتن و در اطراف پرتو اصلی[2] نسبت به محور می‌دهد. در این روش، تقریب نور فیزیکی PO[3] و نور هندسی GO GO برای محاسبه توزیع میدان روی دریچه[4] سطح بازتابنده بکار رفته و معمولا برای آنتنهای بازتابنده بزرگ نسبت به طول موج، معتبر است. این روش برای ناحیه سایه[5] آنتن بازتابنده مناسب نیست زیرا از جریانهای لبه و پشت بازتابنده صرفنظر می‌کند. لذا برای درنظرگرفتن آثار مذکور، از روشهای تفرق لبه[6] استفاده نموده و پاسخ بدست آمده را به حل روش AFM می‌افزایند [۸ و۹]. برای درنظرگرفتن تفرق لبه از روشهایی مانند GTD[7] یا UTD[8] استفاده کرده زیرا نتایج معتبری در ناحیه سایه بازتابنده داشته و جریانهای لبه را درنظر می‌گیرد ولی پیچیدگی محاسباتی بیشتری به روش AFM می‌افزاید [۱۰ و۱۱]. در روش جریان القایی، برای محاسبه توزیع جریان روی سطح بازتابنده از روشهایی نظیر روش ممان MoM[9] استفاده می‌گردد. اگرچه روشهایی دقیق هستند اما محاسبات پیچیده و زمان‌بری دارند. اخیرا، از روشهای ممان- موجکWBMM[10] جهت تحلیل آنتنهای بازتابنده بزرگ استفاده شده است. در روش ممان MoM[11] متداول با استفاده از توابع بسط و آزمون برای تبدیل معادلات انتگرال EFIE[12] به معادلات جبری، ماتریسهای امپدانس متراکم حاصل می‌شود. درصورتیکه در روش موجک، توابع موجک به عنوان توابع بسط و آزمون استفاده شده و باعث تنک[13] شدن ماتریسهای امپدانس شده و زمان محاسبات را کاهش می‌دهد. با این روش می‌توان جریانهای سطحی روی بازتابنده را سریعتر از روش متداول MoM محاسبه نمود [۱۲-۱۴].

بعد از انتخاب روش تحلیل آنتن بازتابنده، محاسبه دقیق و سریع پترن تشعشعی بسیار اهمیت دارد. روش مستقیم که انتگرالهای تشعشعی را بصورت عددی محاسبه می‌نماید، بسیار زمان‌بر است. البته می‌توان از بسط انتگرالهای تشعشعی به یک سری مانند روش Jacobi-Bessel نیز استفاده کرد [۱۵]. روش Jacobi-Bessel برای محاسبه پترن آنتنهایی که دارای دریچه تصویر شده دایروی[1] هستند، بسیار مناسب هستند. زیرا چندجمله‌ای Jacobi ، نوع خاصی از رابطه بازگشتی استفاده می‌کند که برای محاسبه پترن تشعشعی آنتنهای بازتابنده سهموی[2] بسیار مناسب هستند.

در اینجا یک الگوریتم سریع برای محاسبه انتگرالهای تشعشعی آنتن بازتابنده دلخواه با روش FFT ارائه می‌گردد. روش پیشنهادی برای تمام آنتنهای بازتابنده شکل‌یافته با تغذیه جابجاشده از کانون قابل استفاده است. در این روش، ابتدا توسط نور هندسی GO میدانهای انعکاسی از روی سطح بازتابنده حاصل از تغذیه دلخواه بدست آمده، یعنی با ردگیری شعاع[3] انعکاسی، توزیع میدان روی دریچه[4] بازتابنده محاسبه می‌گردد. انتگرالهای تشعشعی بدست آمده از AFM با روش FFT محاسبه شده تا پترن تشعشعی آنتن و سایر پارامترهای تشعشعی نظیر بهره، پهنای پرتو نیم‌توان، SLL ونسبت F/B[5] و... حاصل گردد. نرم‌افزاری مبتنی بر MATLAB براساس روش مذکور طراحی و تهیه شده که قابلیت تحلیل و شبیه‌سازی آنتنهای بازتابنده شکل‌یافته با ابعاد بزرگ نسبت به طول موج را دارد. در سراسر این مقاله به نرم‌افزار تهیه شده براساس روش مذکور، عنوان "نرم‌افزار پیشنهادی" اطلاق می‌گردد.

در ادامه، روش محاسبه سریع انتگرالهای تشعشعی با FFT در بخش دو ارائه می‌گردد. گسسته‌سازی بهینه سطح بازتابنده جهت محاسبه انتگرالهای تشعشعی با دقت مطلوب و زمان کم در بخش سه بررسی می‌شود. برای تایید و اعتبار روش پیشنهادی، آنتنهای

۱.Induced current
۲.Main beam
۳.Physical Optics
۴.Aperture
۵.Shadow region
۶.Edge diffraction
۷.Geometrical Theory of Diffraction
۸.Uniform Theory of Diffraction
۹.Method of Moments
۱۰.Wavelet-Based Moment Method
۱۱.Method of Moments
۱۲.Electric Field Integral Equation
۱۳.Sparse

۱.Circular projected aperture
۲.Parabolic reflector antenna
۳.Ray tracing
۴.Aperture
۵.Front to Back

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:06 +0330 on Wednesday November 25th 2026

بسیاری شبیه‌سازی شده‌اند اما در اینجا دو نوع آنتن بازتابنده شکل‌یافته عملی در صنایع نظامی از جمله رادار مراقبت هوایی و رادار تاکتیکی AN/TPS-۴۳ با نرم‌افزار پیشنهادی، شبیه‌سازی شده و در بخشهای چهار و پنج با نتایج حاصل از نرم‌افزار FEKO و اندازه‌گیری مقایسه شده است. در بخش ششم، نتیجه‌گیری و توضیحات پایانی آمده است.

۲- محاسبه انتگرالهای تشعشعی با FFT

در شکل ۱ هندسه سه‌بعدی یک آنتن بازتابنده سهموی متقارن[۱] نشان داده شده است. تغذیه در محل کانون قرار گرفته و تصویر سطح بازتابنده روی صفحه دریچه – دهانه بازتابنده- را S_0 و روی صفحه کانونی S_0' نامیده می‌شود. انتگرالهای تشعشعی روی سطح S_0' برای محاسبه میدان دور بصورت زیر هستند [۱۶]:

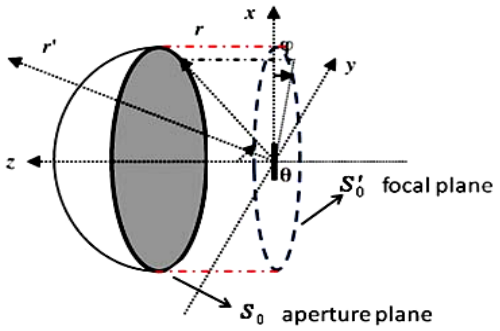
$$E_{\theta S} = \frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r}(1-\cos\theta)\iint_{S_0'}\left(-E_{ax}\cos\phi - E_{ay}\sin\phi\right)$$
$$\exp\left(j\beta\left(x'\sin\theta\cos\phi + y'\sin\theta\sin\phi\right)\right)\,dx'\,dy' \qquad (1a)$$

$$E_{\phi S} = \frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r}(1-\cos\theta)\iint_{S_0'}\left(-E_{ax}\sin\phi + E_{ay}\cos\phi\right)$$
$$\exp\left(j\beta\left(x'\sin\theta\cos\phi + y'\sin\theta\sin\phi\right)\right)dx'\,dy' \qquad (1b)$$

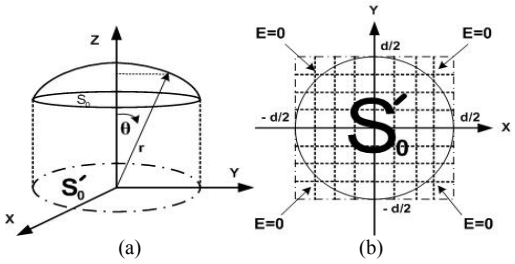
$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}\quad,\quad u = \sin\theta\cos\phi \qquad v = \sin\theta\sin\phi \qquad (1c)$$

در معادلات (۱) ، E_{ax} و E_{ay} مولفه‌های میدان الکتریکی انعکاسی روی صفحه کانونی S_0' می‌باشد. اگر تغذیه در محل کانون آنتن سهموی قرار داشته باشد، اشعه حاصل در امتداد محور اصلی خواهد بود. بنابراین اختلاف بین میدان روی صفحات S_0 و S_0' تنها اختلاف فاز حاصل از فاصله بین دو صفحه مذکور است و محاسبه انتگرالهای تشعشعی روی هر دو صفحه مذکور معتبر است. درصورتیکه تغذیه ازمحل کانون جابجا شود، یک اختلاف و اغتشاش فازی بین دو صفحه S_0 و S_0' بوجود می‌آید. بنابراین انتگرالهای تشعشعی تنها روی صفحه دریچه S_0 بایستی محاسبه گردد.

روش پیشنهادی اگرچه برای آنتن بازتابنده سهموی توضیح داده می‌شود اما برای سایر آنتنهای بازتابنده نیز قابل استفاده است. ویژگی مهم این روش، انتگرال‌گیری سریع روی صفحه دریچه برای هرنوع تغذیه بامحل دلخواه هست درصورتیکه، انتگرال‌گیری روی سطح بازتابنده زمانیکه تغذیه از کانون افست[۲] داشته باشد یا پترن تشعشعی تغذیه نامتقارن باشد، بسیار زمانبر است. برای محاسبه میدان



شکل ۱: هندسه سه‌بعدی آنتن بازتابنده سهموی متقارن



شکل ۲: (a) صفحه S_0' تصویر سطح رفلکتور روی صفحه کانونی است. (b) یک شبکه مش مستطیلی روی صفحه S_0' ایجاد می‌شود.

انعکاسی از بازتابنده، صفحه کانونی S_0' مطابق شکل ۲a مش‌بندی شده است. با استفاده از تقریب نور فیزیکی PO میدانهای انعکاسی در خارج از صفحه S_0' برابر صفر درنظر گرفته می‌شود.

تبدیل فوریه دوبعدی FFT۲ برای محاسبه انتگرالهای ۱a و ۱b بکار می‌رود [۱۷]. لذا انتگرالهای P_x و P_y بصورت زیر تعریف می‌گردند:

۱.Paraboloidal reflector antenna

۲.Offset

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:06 +0330 on Wednesday November 25th 2026

$$P_x = \iint_{S_0'} E_{ax}\ e^{j\beta(x'u+y'v)}\,dx'\,dy'$$
$$P_y = \iint_{S_0'} E_{ay}\ e^{j\beta(x'u+y'v)}\,dx'\,dy' \qquad (۲)$$

در روابط مذکور E_{ax} و E_{ay} مولفه‌های میدان انعکاسی روی صفحه S_0' است. با استفاده از روابط (۲) میدانهای تشعشعی $E_{\theta S}$ و $E_{\phi S}$ بصورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$E_{\theta S} = \frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r}(1-\cos\theta)\{-P_x\cos\phi - P_y\sin\phi\}$$
$$E_{\phi S} = \frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r}(1-\cos\theta)\{-P_x\sin\phi + P_y\cos\phi\} \qquad (۳)$$

شبکه مش با کمک روابط زیر ایجاد می‌گردد:

$$dx' = \frac{d}{M-1}\ ,\ x' = -d/2 + m.dx'\ ,\ m = 0,1,2,...,M-1$$
$$dy' = \frac{d}{N-1}\ ,\ y' = -d/2 + n.dy'\ ,\ n = 0,1,2,...,N-1 \qquad (۴)$$

M و N به ترتیب تعداد نقاط توزیع شده بطور یکنواخت در امتداد x و y روی صفحه S_0' می‌باشد. قطر دریچه بازتابنده سهموی برابر d است. با جایگذاری روابط (۴) در معادلات (۲)، P_x و P_y بصورت زیر در می‌آید:

$$P_x = \exp\left(-j\beta u\frac{d}{2}\right)\exp\left(-j\beta v\frac{d}{2}\right)\ dx'\,dy'$$
$$\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1} E_{ax}(m,n)\,e^{j\beta v\frac{nd}{N-1}}\ e^{j\beta u\frac{md}{M-1}}$$
$$P_y = \exp\left(-j\beta u\frac{d}{2}\right)\exp\left(-j\beta v\frac{d}{2}\right)\ dx'\,dy'$$
$$\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1} E_{ay}(m,n)\,e^{j\beta v\frac{nd}{N-1}}\ e^{j\beta u\frac{md}{M-1}} \qquad (۵)$$

$E_{ax}(m,n)$ و $E_{ay}(m,n)$ میدانهای الکتریکی در نقاط مش (m,n)ام صفحه S_0' هستند. با مقایسه روابط (۵) با فرمولهای FFT، θ_{kl} و φ_{kl} زوایای مختصات کروی بوده که میدانهای تشعشعی در آن نقاط محاسبه می‌شوند:

$$A = \frac{d}{\lambda}\frac{M}{M-1}\ ,\ k = -A\sin\theta_{kl}\cos\phi_{kl}\ ,\ k = 0,1,2,...,M-1$$
$$B = \frac{d}{\lambda}\frac{N}{N-1}\ ,\ l = -B\sin\theta_{kl}\sin\phi_{kl}\ ,\ l = 0,1,2,...,N-1$$
$$0 \le \theta_{kl} \le \pi\ ,\ 0 \le \varphi_{kl} \le 2\pi\ \ or\ \ -\pi \le \varphi_{kl} \le \pi$$

$$\theta_{kl} = Sin^{-1}\left(\left[\left(\frac{k}{-A}\right)^2 + \left(\frac{l}{-B}\right)^2\right]^{1/2}\right) \qquad (۶a)$$
$$\varphi_{kl} = \tan^{-1}\left(\frac{-Al}{-Bk}\right) \qquad (۶b)$$

با استفاده از تبدیل فوریه دوبعدی FFT۲، روابط (۵) بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$P_x = \exp\left(-j\beta u\frac{d}{2}\right)\exp\left(-j\beta v\frac{d}{2}\right)\ dx'\,dy'\ FFT\ 2\left(E_{ax}\right)$$
$$P_y = \exp\left(-j\beta u\frac{d}{2}\right)\exp\left(-j\beta v\frac{d}{2}\right)\ dx'\,dy'\ FFT2\left(E_{ay}\right) \qquad (۷)$$

سرانجام میدانهای تشعشعی $E_{\theta S}$ و $E_{\phi S}$ براساس FFT۲ بصورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$E_{\theta S} = \frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r}(1-\cos\theta_{kl})\{-\cos\phi_{kl}P_x - \sin\phi_{kl}P_y\}$$
$$E_{\phi S} = \frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r}(1-\cos\theta_{kl})\{-\sin\phi_{kl}P_x + \cos\phi_{kl}P_y\} \qquad (۸)$$

براساس معادلات (۷) و (۸) میدانهای دور $E_{\theta S}$ و $E_{\phi S}$ محاسبه می‌گردد و θ_{kl} مطابق رابطه (۶b) بدست می‌آید. مقادیر منفی l و k برای یافتن میدانها در سایر نواحی بکار می‌رود. علاوه براین تعداد نقاط روی پرتو اصلی به دلیل استفاده از FFT محدود است، لذا از درونیابی[۱] برای بدست آوردن تمام نقاط فضا استفاده می‌گردد. پترنهای تشعشعی صفحات E و H به ترتیب به ازای $\phi = \frac{\pi}{2}$ و $\phi = 0$ قابل محاسبه است. سمتگرایی[۲] آنتن بصورت زیر محاسبه می گردد [۱۸]:

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$
$$\Omega_A = \iint_{u^2+v^2\le 1} |F(u,v)|^2\ \frac{dudv}{\sqrt{1-u^2-v^2}} \qquad (۹)$$

۱.Interpolation

۲.Directivity

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:06 +0330 on Wednesday November 25th 2026

$F(u,v)$ پترن تشعشعی آنتن بازتابنده برحسب متغیرهای u و v است. در این بخش، معادلات اصلی برای تحلیل بازتابنده سهموی و محاسبه پارامترهای تشعشعی آنتن بدست آمده است. روش بکار رفته با کمی تغییر با نرم‌افزار پیشنهادی در محیط MATLAB قابل اعمال به تمام آنتنهای بازتابنده شکل‌یافته با تغذیه جابجاشده می‌باشد به شرط آنکه ابعاد دهانه بازتابنده نسبت به طول موج بزرگ باشد.

۳- محاسبه مش‌بندی بهینه

اگر x(t) تابعی پیوسته از متغیر t در بازه [a,b] باشد، زوج تبدیل فوریه x(t) بصورت زیر تعریف می‌گردد [۱۷]:

$$\begin{cases} x(t)=\int_{-\infty}^{+\infty} X(f)\,e^{+j2\pi ft}\,df \\ X(f)=\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\,e^{-j2\pi ft}\,dt \end{cases} \qquad (۱۰)$$

برای اینکه بتوان انتگرالهای فوریه را بصورت عددی محاسبه کرد بازه [a,b] با N نقطه، به N-۱ جزء مساوی ΔT تقسیم می‌گردد.

$$\Delta T=\frac{b-a}{N-1} \qquad (۱۱)$$
$$t=a+n\Delta T \quad , \quad n=0,1,2,...,N-1$$

بعد از جایگزینی رابطه (۱۱) در انتگرالهای فوریه و مقایسه با تبدیل فوریه گسسته[۱]، می‌توان نوشت:

$$X(k)=\sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad k=0,1,2,...,N-1 \qquad (۱۲a)$$

$$k=N\Delta Tf \Rightarrow f_k=\frac{k}{N\Delta T}\Rightarrow f_{\max}=\frac{N-1}{N\Delta T} \qquad (۱۲b)$$

رابطه (۱۲b) نشان می‌دهد که ΔT بایستی کمتر از $\frac{N-1}{N}\frac{1}{f_{\max}}$ باشد تا ماکزیمم فرکانس موجود در x(t) با تبدیل فوریه گسسته قابل آشکارسازی باشد. چون N مقدار بزرگی دارد، رابطه (۱۲b) را می‌توان بصورت زیر ساده کرد:

$$\Delta T \le \frac{1}{f_{\max}} \qquad (۱۳)$$

مشاهده می‌شود که انتگرالهای تشعشعی تبدیل فوریه مکانی میدانهای الکتریکی روی دریچه هستند لذا k_x و k_y فرکانسهای طیفی متناظر با مکانهای x و y می‌باشند. با استفاده از رابطه (۱۳) و (۶a) اندازه مش بهینه حاصل می‌گردد:

$$\Delta x<\frac{1}{k_x} \ , \ k_x=\frac{u}{\lambda}\Rightarrow \Delta x<\frac{\lambda}{u} \ , \ Max(u)=1\Rightarrow \Delta x<\lambda \qquad (۱۴)$$

بطور مشابه می‌توان $\Delta y<\lambda$ را اثبات کرد. بنابراین برای اینکه میدانهای الکتریکی دریچه بطور صحیح نمونه‌برداری گردد تا محاسبات حاصل از FFT معتبر باشد، لازم است که اندازه مش‌ها کمتر از طول موج شبیه‌سازی باشد. اگر تعداد نقاط نمونه‌برداری از مقدار مذکور بیشتر گردد، اطلاعات بیشتری از میدان بدست نمی‌آید و تنها زمان شبیه‌سازی بدون افزایش کارآیی محاسباتی، زیاد می‌گردد.

برای مشاهده اثر نمونه‌برداری صحیح و اندازه مش‌ها در محاسبه پترن تشعشعی، یک آنتن بازتابنده سهموی با آنتن هورن[۱] واقع در کانون تحریک شده است. فرکانس کاری آنتن ۱.۳GHz و قطر دهانه بازتابنده و فاصله کانونی آن به ترتیب ۱۳.۵m و ۵.۳۱m است. نتایج شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف مش‌بندی با نرم‌افزار پیشنهادی در جدول۱ نشان داده شده است. برای اندازه مش‌های بزرگتر از λ=۲۳.۰۸cm پارامترهای تشعشعی آنتن نظیر بهره و پهنای پرتو نیم‌توان HP[۲] مقادیر قابل قبولی نیستند. ولی برای اندازه مش‌های کمتر از λ شرط رابطه (۱۴) محقق می‌گردد و مشخصات تشعشعی آنتن به درستی محاسبه می‌شود. وقتی‌که نقاط مش‌بندی M=۱۲۸ و N=۱۲۸ انتخاب می‌گردند، پرتو اصلی در زاویه θ=۱۸۰° قرار داشته و بهره برابر ۳۸.۹۱dB بدست می‌آید. پهنای پرتو نیم‌توان در صفحه E برابر ۲.۳۴° و در صفحه H برابر ۰.۹° است و سطح گلبرگهای کناری SLL در صفحات E و H، به ترتیب،

۱.Discrete Fourier Transform

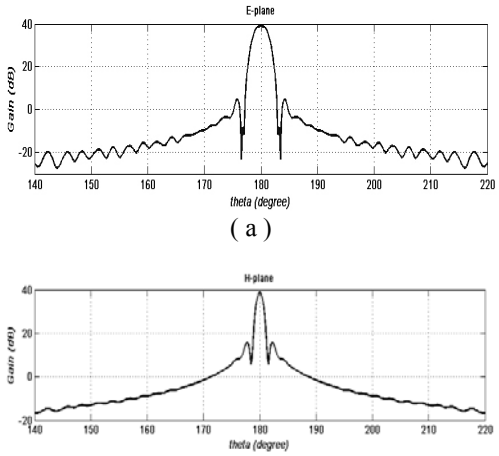
۱.Horn antenna

۲.Half Power beamwidth

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:06 +0330 on Wednesday November 25th 2026

برابر ۳۵dB- و ۲۵dB- است. پترن تشعشعی در صفحات E و H در شکل۳ نمایش داده شده است.

آنتن سهموی مذکور با نرم‌افزار FEKO با ترکیب روش ممان و PO تحلیل شده است و نتایج حاصل از آن درجدول ۲ با نرم‌افزار تهیه شده در MATLAB مقایسه شده است. اختلافات مشاهده شده به دو دلیل می‌باشد؛ اختلافات حاصل در گلبرگهای کناری بخاطر صرفنظر کردن از اثرات لبه در نرم‌افزار پیشنهادی می‌باشد اما اختلافات در بهره و پهنای پرتو نیم‌توان به دلیل خطای درونیابی در پیوسته نمودن پترن تشعشعی است. نکته قابل توجه آن است که زمان شبیه‌سازی در نرم‌افزار FEKO سه برابر



(a)

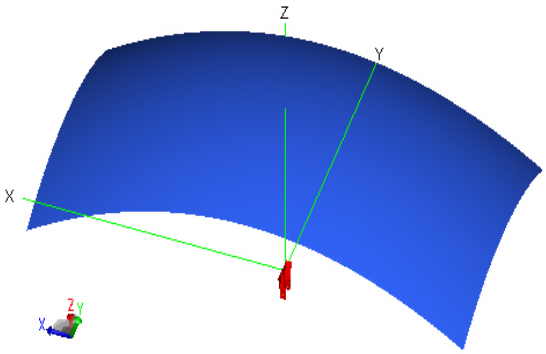
شکل۳: (a) پترن تشعشعی در صفحه E و (b) پترن تشعشعی در صفحه H

زمان شبیه‌سازی در نرم‌افزار پیشنهادی است. در طراحی آنتنهای بازتابنده بزرگ اگر یک پیش شبیه‌سازی امکان‌پذیر باشد تا اعتبار طراحی در پارامترهای حساس و مهم آنتن نظیر بهره، پهنای پرتو نیم‌توان در صفحات E و H و سطح گلبرگهای کناری تعیین گردد، می‌توان زمان زیادی را در فرآیند طراحی و شبیه‌سازی کاهش داد و سپس برای نهایی کردن طراحی، از نرم‌افزارهای دقیق نظیر FEKO یا NEC استفاده شود. در بخش بعدی دو آنتن کاربردی در صنایع نظامی با نرم‌افزار پیشنهادی، شبیه‌سازی شده و با نرم‌افزار FEKO و نتایج اندازه‌گیری شده، مقایسه می‌گردد.

۴- تحلیل و شبیه‌سازی آنتن بازتابنده شکل‌یافته با تغذیه‌های هورن جابجاشده

یک آنتن بازتابنده شکل‌یافته که توسط دو هورن جابجاشده تغذیه می‌گردد در شکل ۴ نمایش داده شده است. فرکانس کاری برابر ۱.۴GHz و طول و عرض دهانه بازتابنده به ترتیب برابر ۱۳.۵m و ۷.۰m با فاصله کانونی ۵.۳۱m است. منحنی پروفایل سمت[1] بازتابنده، سهمی و منحنی پروفایل ارتفاع[2] بازتابنده، از نوع شکل یافته است. تابع سه‌بعدی توصیف کننده سطح رفلکتور بصورت زیر است:

$$z = -0.0471x^2 + 5.3100\cos^{0.6364}\left(\frac{y}{4.9267}\right) \quad (۱۵)$$



شکل۴: آنتن شکل‌یافته تغذیه شده با دو هورن

هورنهای تغذیه در امتداد محور y بصورت متقارن نسبت به مبدا مختصات (کانون آنتن بازتابنده) قرارگرفته‌اند. هورن قرار گرفته در محل (۰,۰,-۰.۱۸۵m) ایجاد پرتو بالایی و هورن دیگر واقع در (۰,۰,+۰.۱۸۵) پرتو پایینی را تولید می‌کند.

نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار پیشنهادی در جدول ۳ ارائه شده است. تعداد نقاط مش برای M و N برابر ۱۲۸ است. نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار FEKO در جدول ۴ آورده شده است. به دلیل ابعاد بزرگ آنتن، پترن تشعشعی و بهره در سایت فضای باز[1] اندازه‌گیری شده است. بهره پرتو

۱.Azimuth profile

۲.Elevation profile

۱.Open site

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:06 +0330 on Wednesday November 25th 2026

بالایی برابر ۳۵.۵dB و بهره پرتو پایینی برابر ۳۴.۵dB است. پهنای پرتو نیم‌توان صفحه سمت HP_H° برابر 1.2° و صفحه ارتفاع HP_E° برابر 10.5° است. نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار پیشنهادی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی با FEKO و اندازه‌گیری تطبیق خوبی دارد. اما زمان شبیه‌سازی با نرم‌افزار پیشنهادی کمتر از یک-سوم زمان شبیه‌سازی با FEKO می‌باشد.

۵- تحلیل و شبیه‌سازی آنتن رادار AN/TPS-۴۳

رادار AN/TPS-۴۳ یک رادار تاکتیکی سه‌بعدی مراقبت هوایی بوده که در باند فرکانسی ۲.۹GHz تا ۳.۱GHz تا برد ۲۰۰mile کار می‌کند [۱]. آنتن بازتابنده از نوع سهموی با دهانه بیضوی است. طول و عرض دهانه، به ترتیب، ۶.۲۰m و ۴.۲۷m با فاصله کانونی ۲.۶m است.

جدول۱: نتایج شبیه‌سازی برای اندازه‌های مختلف مش‌بندی

M	N	dx (cm)	dy (cm)	Main beam θ (deg.)	HP_E°	HP_H°	Gain (dB)
۳۲	۳۲	۴۳.۵۵	۴۳.۵۵	۱۸۰	۶۲.۸۹	۳۲.۴۲	۱۱.۰۶
۴۸	۴۸	۲۸.۷۲	۲۸.۷۲	۱۸۰	۲۴.۶۲	۱۴.۱۲	۱۸.۷۳
۵۶	۵۶	۲۴.۵۵	۲۴.۵۵	۱۸۰	۵.۲۴	۲.۳۲	۳۳.۳۰
۶۴	۶۴	۲۱.۴۷	۲۱.۴۷	۱۸۰	۲.۳۴	۰.۹	۳۸.۸۳
۱۲۸	۱۲۸	۱۰.۶۳	۱۰.۶۳	۱۸۰	۲.۳۴	۰.۹	۳۸.۹۱

جدول۲: مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزارهای پیشنهادی و FEKO

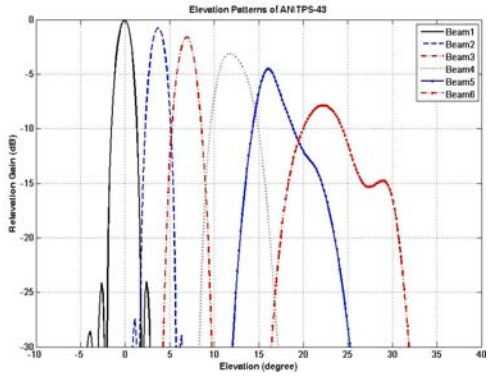
	Main beam θ (deg.)	HP_H°	HP_E°	Gain (dB)	SLL_E (dB)	SLL_H (dB)
Proposed Method	۱۸۰	۲.۳۴	۰.۹	۳۸.۹۱	-۳۵	-۲۵
FEKO	۱۸۰	۲.۵	۱.۱	۳۹.۲	-۳۳	-۲۲

جدول۳: نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار پیشنهادی

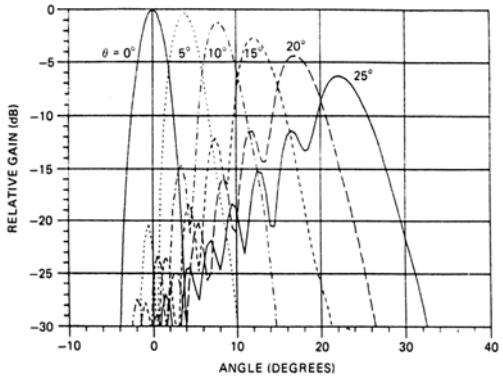
Beam	Y (m)	Elevation(deg.)	Azimuth(deg.)	Gain (dB)	HP_E°	HP_H°	SLL_E (dB)	SLL_H (dB)
Low	+۰.۱۸۵	-۱.۸۵	+۹۰	۳۴.۱	۱۱.۱	۱.۰	-۴۰	-۳۵
High	-۰.۱۸۵	+۱.۸۵	+۹۰	۳۴.۱	۱۱.۱	۱.۰	-۴۰	-۳۵

جدول۴: نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار FEKO

Beam	Y (m)	Elevation (deg.)	Azimuth(deg.)	Gain (dB)	HP_E°	HP_{XOZ}°	SLL_E (dB)	SLL_{XOZ} (dB)
Low	+۰.۱۸۵	-۲	+۹۰	۳۳.۴	۱۲.۲	۰.۸	-۳۴	-۳۲
High	-۰.۱۸۵	+۲	+۹۰	۳۳.۴	۱۲.۲	۰.۸	-۳۴	-۳۲



شکل۵: پترنهای تشعشعی ارتفاع آنتن AN/TPS-۴۳ حاصل از نرم‌افزار پیشنهادی



شکل۶: پترنهای تشعشعی ارتفاع آنتن AN/TPS-۴۳ گزارش شده توسط M. I. Skolnik [۱]

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:06 +0330 on Wednesday November 25th 2026

آنتن بازتابنده با یک آرایه ۱۵تایی از آنتنهای هورن که بر روی یک منحنی از بالا تا پایین قرار گرفته‌اند، تغذیه می‌گردد. هورن دوم (از بالا) در کانون رفلکتور قرار گرفته است. خروجی هورنها وارد یک ماتریس استریپ‌لاین[۱] شده و شش پرتو جهت ارتفاع‌یابی بدست می‌آید. پترن تشعشعی فرستندگی رادار از نوع پرتو بادبزنی[۲] برای عملیات جستجو ولی پترن تشعشعی گیرندگی یک پشته از پرتوها[۳] می‌باشد که ارتفاع هدف را نیز آشکارسازی می‌کند.

آنتن AN/TPS-۴۳ با نرم‌افزار پیشنهادی، شبیه‌سازی شده و نتایج آن در جدول۵ و شکل۵ نمایش داده شده است. به علت عدم دسترسی به دفترچه راهنمای رادار مذکور، نتایج شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده مرجع [۱] -که توسط M. I. Skolnik گزارش شده- در شکل۶ مقایسه شده است. اختلافات بین شکلهای ۵ و ۶ به دلیل یکسان نبودن آنتنها و نیز درنظر نگرفتن تقرق لبه بازتابنده می‌باشد. بخشهای مورد توجه نتایج شبیه‌سازی محل شش پرتو در صفحه ارتفاع، پهنای پرتو نیم‌توان در صفحه ارتفاع، سطح گلبرگ کناری هر پرتو و محل‌های تقاطع اول[۱] و دوم[۲] پرتوهای مجاور هم می‌باشد. زمان شبیه‌سازی هر پرتو با نرم‌افزار پیشنهادی بسیار کمتر از زمان شبیه‌سازی موردنیاز با نرم‌افزار FEKO می‌باشد.

	Elevation (deg.)	Azimuth (deg.)	Gain (dB)	HP_E (deg.)	HP_H (deg.)
Beam ۱	۰	۰	۳۹.۰۵	۱.۸۰	۰.۹
Beam ۲	٤.۳۲	۹۰	۳۸.۱۲	۱.۹۸	۰.۹
Beam ۳	۷.۱۵	۹۰	۳۷.۰٦	۱.۹۸	۰.۹
Beam ٤	۱۲.۳۰	۹۰	۳٦.۱۰	۳.۷۸	۰.۹
Beam ٥	۱۷.٥۰	۹۰	۳٥.۰۳	٤.۳۰	۰.۹
Beam ٦	۲۳.٤۰	۹۰	۳۱.۲۰	٥.۲۲	۱.۲٦

۶- نتیجه‌گیری

محاسبه سریع پترن تشعشعی میدان دور آنتنهای بازتابنده با تغذیه دلخواه در محل مطلوب با روش FFT ارائه شده است. بازتابنده با روش نور هندسی GO تحلیل شده، سپس میدانهای تشعشعی با روش میدان دریچه AFM بدست آمده و انتگرالهای تشعشعی با تبدیل فوریه دوبعدی FFT محاسبه شده‌اند. اندازه مش بهینه از لحاظ دقت شبیه‌سازی و زمان شبیه‌سازی بدست آمده و با روابط و نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است که کوچکترین مش بایستی دارای ابعادی کمتر از یک طول موج داشته باشد. بر اساس روش پیشنهادی، نرم‌افزاری در محیط MATLAB تهیه شده که می‌تواند تمام آنتنهای بازتابنده شکل‌یافته با ابعاد بزرگ نسبت به طول موج را در فرکانس موردنظر شبیه‌سازی نماید. به عنوان نمونه دو آنتن مورد استفاده در صنایع نظامی از جمله آنتن رادار مراقبت هوایی و رادار تاکتیکی TPS-۴۳ تحلیل شده و با نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار FEKO و اندازه‌گیری تطبیق خوبی داشته است. روش ارائه شده در عین سادگی، سرعت و دقت مناسبی در تحلیل بازتابنده‌های شکل‌یافته - که دارای ابعاد بزرگ نسبت به طول موج هستند- دارد. لذا نرم‌افزار پیشنهادی در طراحی آنتنهای بازتابنده با تغذیه افست‌دار می‌تواند یک ابزار مناسب جهت تعیین اولیه کارآیی آنتن و مشخصات تشعشعی موردنیاز باشد و در صورت احراز پارامترهای طراحی موردنظر، شبیه‌سازی دقیق‌تر با نرم‌افزارهایی نظیر FEKO یا NEC - که زمان زیادی برای شبیه‌سازی نیاز دارند- انجام شود و بدین صورت زمان موردنیاز در روند طراحی کمتر شود. همچنین نرم‌افزار پیشنهادی، دارای کتابخانه‌ای از آنتنهای بازتابنده رایج بوده و امکان تعریف بازتابنده دلخواه را دارد.

مراجع

[۱] Skolnik, M. I., Radar Handbook, ۲nd ed, McGraw-Hill, New York, ۱۹۹۰.

[۲] Chu, T. S. and R. H. Turrin, "Depolarization properties of offset reflector antennas," IEEE Trans. Antennas & Propagation, Vol. ۲۱, May ۱۹۷۳

[۳]Rudge, A. W., "Offset reflector antennas with offset feeds," Electronic Letters, ۶۱۱-۶۱۳, Nov. ۱۹۷۳.

[٤] Janken, J. A., W. J. English and D. F. DiFonzo, "Radiation from multimode reflector antennas," G-AP Symp. Digest, ۳۰۶-۳۰۹, ۱۹۷۳.

[٥] Ingerson, P.G. and W. C. Wong, "Focal region characteristics of offset fed reflectors," IEEE/AP-S Symp. Program & Digest, ۱۲۱-۱۲۳, June ۱۹۷۴.

۱.Stripline Matrix

۲.Fan beam

۳.Stacked beams

۱.First cross-over

۲.Second cross-over

Downloaded from jor.iranaict.ir at 9:06 +0330 on Wednesday November 25th 2026

[٦] Karimkashi, S. and J. Rashed-Mohassel, "Sidelobe level reduction in symmetric dual-reflector antennas using a small lens antenna", J. of Electromagn. Waves and Appl., Vol. ٢٠, No. ١٣, ١٨٠٧–١٨١٦, ٢٠٠٦.

[٧] Tian, Y., Y. H. Zhang and Y. Fan," The analysis of mutual coupling between paraboloid antennas," J. of Electromagn. Waves and Appl., Vol. ٢١, No. ٩, ١١٩١–١٢٠٣, ٢٠٠٧.

[٨] Rusch, W. V. T. and P. D. Potter, Analysis of Reflector Antennas, New York, Academic Press, New York, ١٩٧٠.

[٩] Kauffman, J. F., W. F. Croswell, and L. J. Jowers, "Analysis of the radiation patterns of reflector antennas," IEEE Trans. Antennas & Propagation, Vol. ٢٤, ٥٣–٦٥, Jan. ١٩٧٦.

[١٠] Love, A. W., Reflector Antennas, John Wiley & Sons, ١٩٧٨.

[١١] Kouyoumjian, R.G. and P. H. Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," Proceedings of the IEEE, Vol. ٦٢, No. ١١, ١٤٤٨–١٤٦١, Nov. ١٩٧٤.

[١٢] Lashab, M., C. Zebiri and F. Benabdelaziz, "Wavelet-based moment method and physical optics use on large reflector antennas," Progress In Electromagnetics Research M, Vol. ٢, ١٨٩–٢٠٠, ٢٠٠٨.

[١٣] Lashab, M., F. Benabdelaziz and C. Zebiri, "Analysis of electromagnetic scattering from reflector and cylindrical antennas using wavelet-based moment method," Progress In Electromagnetics Research, PIER ٧٦, ٣٥٧–٣٦٨, ٢٠٠٧.

[١٤] Herzberg, Thomas, Rodica Ramer and Stuart Hay, "Antenna analysis using wavelet representations," Progress In Electromagnetics Research Symposium ٢٠٠٥, Hangzhou, China, August ٢٢-٢٦.

[١٥] Galindo-Israel, V. and R. Mittra, "A new series representation for the radiation integral with application to reflector antennas," IEEE Trans. Antennas & Propagation, Vol. ٢٥, No. ٥, ٦٣١-٦٤١, Sept. ١٩٧٧.

[١٦] Balanis, C. A., Antenna Theory, Anlaysis and Design, John Wiley & Sons, ١٩٨٢.

[١٧] Bracewell, R. N., The Fourier Transform and Its Applications, ٢nd ed., McGraw-Hill, New York, ١٩٨٦.

[١٨] Stutzman, W. L. and G. A. Thiele, Antenna Theory and Design, ٢nd ed., John Wiley & Sons, ١٩٩٧.