

آنالیز برداری آنتن صفحه‌ای مناطق فرنل در حالت فرستندگی

دکتر فرخ آرزوم

دانشیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مهندس علیرضا شوشتری

دانشجوی دوره دکتری مهندسی برق - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

چکیده

در این مقاله آنتن صفحه‌ی فرنل با لایه‌ی دی‌الکتریک و حلقه‌های فلزی چاپ‌شده روی آن در حالت فرستندگی و جریانهای معادل مغناطیسی برای میدانهای تابیده شده از تغذیه، میدان دور پترن و بهره این آنتن بررسی و میدان تغذیه با مدل مناسبی تقریب زده شده است. در این مدل، تغذیه بدون مؤلفه پلاریزاسیون متقابل با بهره متغیر در نظر گرفته شده است. این بررسی با نتیجه تجربی ساخت چند نوع آنتن مقایسه شده است.

مقدمه

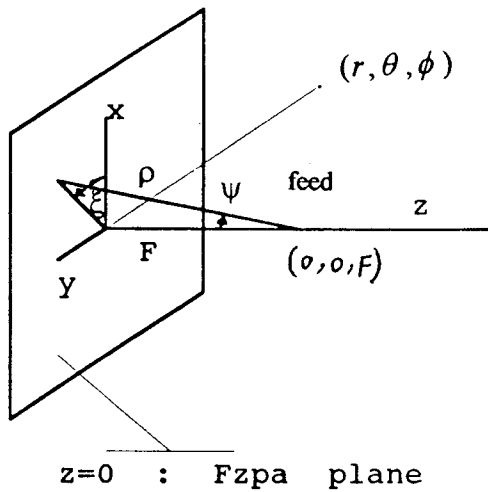
در سالهای اخیر آنتن صفحه‌ای مناطق فرنل به عنوان یک رقیب برای آنتن منعکس‌کننده سهموی مطرح شده است. مهمترین سودمندی آن ارزانی و ضعف آن، بهره کم نسبت به آنتنهای سهموی می‌باشد. تاریخچه این آنتنها از کاربرد عدسی‌های مناطق فرنل در فرکانسهای نوری شروع می‌شود، در سالهای ۱۹۶۰ اولین توجه به این آنتن در فرکانسهای مایکروویو آغاز شده، [۱،۲،۳] و به علت رشد سریع ماهواره‌های پر قدرت محلی استفاده از آنها به سرعت رواج پیدا خواهد کرد.

می‌توان دودیدگاه متفاوت برای بررسی این آنتنها بکاربرد. اولین دیدگاه این است که آنتن را در حالت گیرندگی فرض کنیم که بر روی آن یک موج صفحه‌ای می‌تابد این آنتن این موج صفحه‌ای را در نقطه کانونی خود متمرکز می‌کند

چنین دیدگاهی در [۴] بررسی شده است. اگر چه این دیدگاه مفاهیم اصلی آنتن مناطق فرنل مانند تابع تصحیح فاز و بازدهی نسبت به تابع تصحیح بهینه را مشخص می‌کند و می‌تواند برای طراحی مناسب باشد، ولی در هر حال نمی‌تواند پترن در جهت‌های مختلف و اثرات نوع تغذیه را در روی آن بررسی کند. یک دیدگاه دیگر این است که آنتن را در حالت فرستندگی در نظر بگیریم. این دیدگاه قبلاً برای یک آنتن صفحه‌ای فرنل با حلقه‌های جذب‌کننده و عبور دهنده بودن لایه دی‌الکتریک در [۵] بررسی شده است. این مقاله با استفاده از جریانهای معادل مغناطیس ناشی از میدان تغذیه به بررسی این آنتن می‌پردازد.

۲- شکل آنتن و پترن تغذیه

شکل (۱) یک آنتن فرنل صفحه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (۲): مختصات آنتن و تغذیه

چنین انتخابی موجب می‌شود که اگر یک موج تابشی صفحه‌ای در جهت محور آنتن به روی آن بتابد این ترکیب آن را در روی کانون F متمرکز کند.

پترن تغذیه می‌تواند با توانی از کسینوس تقریب زده شود:

$$G_f(\psi) = 2(n+1) \cos^n(\psi) \quad 0 \leq \psi < \frac{\pi}{2}$$

$$= 0 \quad \psi \geq \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

پلاریزاسیون تغذیه طوری انتخاب می‌شود که هیچ مؤلفه پلاریزاسیون متقابلی (برای پلاریزاسیون جهت x) ایجاد نکند، چنین پلاریزاسیونی را می‌توان ناشی از منابع هویگنس در نظر گرفت [۶]. بر همین اساس پلاریزاسیون تغذیه بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\hat{e}_f(\xi, \psi) = -\cos(\xi) \hat{e}_\psi + \sin(\xi) \hat{e}_\xi \quad (4)$$

ψ و ξ در شکل (۲) نشان داده شده‌اند و در واقع (ρ, ψ, ξ) مختصات کروی متصل به تغذیه می‌باشند. این انتخاب پترن به خوبی در [۵] بیان شده است.

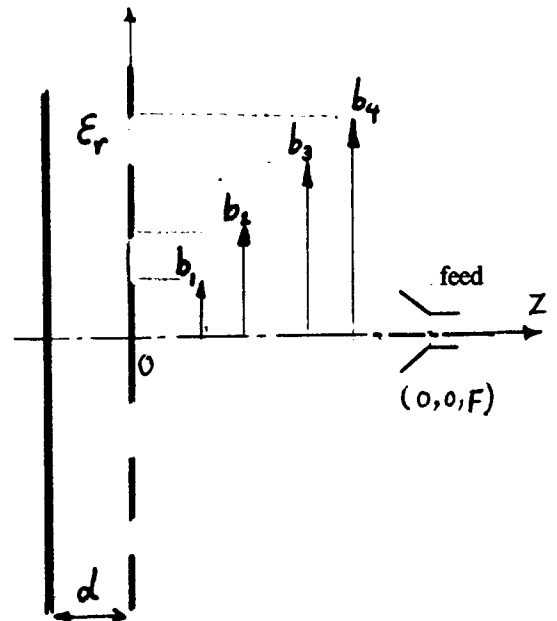
مقدار $2(n+1)$ در واقع بهره تغذیه می‌باشد بنابراین n می‌تواند برای هر تغذیه‌ای برآورد شود. البته تغذیه‌های

صفحه هادی کامل زمین که همراه با لایه دی‌الکتریک به ضخامت d و ثابت دی‌الکتریک ϵ_r روی آن، که زمینه خوانده می‌شود و در روی آن حلقه‌های فلزی به شعاع b_n قرار دارد. فرض کنید که تغذیه در فاصله F و بروی آنتن قرار دارد. همانطور که در [۴] نشان داده شده است یک طراحی مناسب برای فرکانس f_0 این آنتن این است که شعاعهای حلقه‌ها از رابطه (۱) بدست آید:

$$b_m = \sqrt{m\lambda_0 \left(F + \frac{m\lambda_0}{4} \right)} \quad (1)$$

که در این رابطه λ_0 طول موج در فرکانس f_0 در خلاء می‌باشد. ضخامت لایه دی‌الکتریک نیز باید در رابطه (۲) صدق کند:

$$d = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$



شکل (۱): آنتن صفحه‌ای فرنل با حلقه‌های فلزی

در صفحه $z=0$ را می توان با مختصه (ψ, ξ) مشخص کرد (شکل ۲). مختصه ρ فاصله این نقطه از صفحه $z=0$ تا تغذیه از رابطه (۶) بدست می آید:

$$\rho = \frac{F}{\cos(\psi)} \quad (۶)$$

می توان با توجه به مفاهیم انعکاس از یک هادی کامل میدان بازگشتی در صفحه $z=0$ در نقطه (ψ, ξ) روی حلقه های فلزی را بدست آورد:

$$\hat{z} \times \bar{E}^R(\psi, \xi) = -\hat{z} \times \bar{E}_f \left(\rho = \frac{F}{\cos(\psi)}, \psi, \xi \right) \quad (۷)$$

بخشی از میدان تابیده شده به لایه دی الکتریک منعکس شده و بخش دیگری از آن وارد لایه دی الکتریک می شود. از معادله (۴-۶۵) مرجع [۶]، ضریب انعکاس در حالت پلاریزاسیون موازی، حالت مورد نظر، به صورت زیر بیان می شود:

$$\Gamma(\psi) = \frac{\epsilon_r \cos \psi - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \psi}}{\epsilon_r \cos \psi + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \psi}}$$

مقدار Γ در بیشتر موارد عملی نزدیک صفر می باشد. مثلاً در حالت $\epsilon_r = 2.5$ ، برای $\psi = 0^\circ$ و $\psi = 50^\circ$ این ضریب به ترتیب 0.22 و 0.07 می باشد. یعنی فقط به ترتیب 0.048 و 0.005 توان تابیده شده به دی الکتریک بازگشت می کند. بنابراین می توان گفت که میدان مماسی در اثر عبور از لایه دی الکتریک تغییر اندکی می کند و می توان میدان بازگشتی را در نقطه (ψ, ξ) نقطه ای از صفحه $z=0$ به صورت زیر نوشت:

$$\hat{z} \times \bar{E}^R(\psi, \xi) = -\hat{z} \times \bar{E}_f \left(\rho^* = \frac{F}{\cos(\psi^*)}, \psi^*, \xi \right) \cdot \exp\left(-j \frac{2 k_0 d \sqrt{\epsilon_r}}{\cos(\psi_1)}\right) \quad (۸)$$

واقعی دارای مؤلفه کراس پلاریزاسیون اندکی می باشند و در واقع این انتخاب صرفاً یک تقریب می باشد.

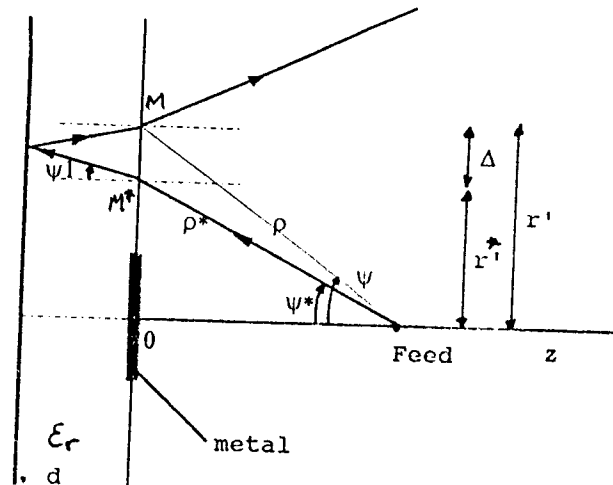
میدان ناشی از تغذیه در نقطه ای به مختصات (ρ, ψ, ξ) به صورت زیر بیان می شود.

$$\bar{E}_f(\rho, \psi, \xi) = \sqrt{\frac{2P_T \eta_0}{4\pi}} \sqrt{G_f(\psi, \xi)} \frac{e^{jk_0 \rho}}{\rho} \hat{e}_f \quad (۵)$$

که در این معادلات P_T توان داده شده به تغذیه می باشد و η_0 امپدانس مشخصه فضای آزاد برابر 377Ω می باشد.

۳- بیان میدان دور:

میدان تغذیه به روی صفحه آنتن مناطق فرنل تابش می کند و در برخورد با حلقه های فلزی منعکس می شود ولی از لایه دی الکتریک عبور کرده و در برخورد با صفحه زمین بازگشت می کند.



شکل ۳- الف: برخورد اشعه های ناشی از تغذیه بر روی لایه دی الکتریک و بازتابش آنها در برخورد با صفحه زمین

اگر میدانهای الکتریکی روی صفحه $z=0$ را بدست آوریم، می توانیم از روی آن میدان دورنهایی آنتن فوق را بدست آوریم. میدانهای بازگشتی در صفحه $(z=0)$ در دو قسمت مختلف، روی حلقه های فلزی و روی لایه دی الکتریک با بیانهای مختلفی مشخص می شوند. هر نقطه

مختصات (ψ, ξ) مشخص کرد با استفاده از این تغییر متغیر خواهیم داشت:

(۱۳-الف)

$$da = F^2 \frac{\tan(\psi)}{\cos^2(\psi)} \cdot d\psi d\xi$$

(۱۳-ب)

$$\mathbf{r}' = (\rho \sin(\psi) \cos(\xi), \rho \sin(\psi) \sin(\xi), 0)$$

$$\rho = \frac{F}{\cos(\psi)}$$

انتگرال گیری نسبت به ξ را مستقیماً به صورت تحلیلی

می توان بدست آورد که نهایتاً انتگرال (۱۱) به معادله زیر تبدیل می شود:

$$\bar{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) = \bar{\mathbf{E}}_{\text{metal}}(\mathbf{r}) + \bar{\mathbf{E}}_{\text{dielectric}}(\mathbf{r}) \quad (14)$$

$$\bar{\mathbf{E}}_{\text{metal}}(\mathbf{r}) = -\sum_{n=0}^{24} \pi C(n) \hat{\mathbf{e}}_r \times \int_{\psi_m}^{\psi_{m+1}} O(\psi) \exp(M_1(\psi)) \bar{\mathbf{V}}(\psi) d\psi \quad (15)$$

$$\bar{\mathbf{E}}_{\text{dielectric}}(\mathbf{r}) = -\sum_{n=1}^{357} \pi C(n) \hat{\mathbf{e}}_r \times \int_{\psi_m}^{\psi_{m+1}} O(\psi) \exp(M_2(\psi)) \bar{\mathbf{V}}(\psi) d\psi \quad (16)$$

که در این معادلات داریم:

$$O(\psi) = \sqrt{G_r(\psi)} \frac{F \tan(\psi)}{\cos(\psi)} \quad (17)$$

$$M_1(\psi) = \frac{-jk_0 F}{\cos(\psi)} \quad (18)$$

$$M_2(\psi) = \frac{-jk_0 F}{\cos(\psi^*)} - jk_0 \frac{2d}{\cos(\psi_1)} \sqrt{\epsilon_r} \quad (19)$$

$$\bar{\mathbf{V}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin(2\phi) (\cos(\psi)-1) \cdot J_2(N) \\ (1+\cos(\psi))J_0(N) + \cos(2\phi)[1-\cos(\psi)]J_2(N) \end{bmatrix} \quad (20)$$

فاز مسیر داخل لایه دی الکتریک است. $k_0 \sqrt{\epsilon_r} \frac{2d}{\cos \psi_1}$ و ψ^* و ψ_1 با توجه به معادلات شکست نور در داخل دی الکتریک باید از مجموعه معادلات زیر بر حسب ψ بدست آیند:

$$\sqrt{\epsilon_r} \sin(\psi_1) = \sin(\psi^*) \quad (9\text{-الف})$$

$$\Delta = 2d \tan(\psi_1) \quad (9\text{-ب})$$

$$\tan(\psi^*) = \frac{r'}{F} = \frac{r' - \Delta}{F} \quad (9\text{-پ})$$

$$\tan(\psi) = \frac{r'}{F} \quad (9\text{-د})$$

برای یک ψ مشخص، ψ_1 و ψ^* می تواند با تقریب خوبی از معادلات زیر بدست آیند. این معادلات از طریق فرض کردن $\psi \approx \psi^*$ در معادله (9الف) بدست آمده اند، این فرض با توجه به اینکه $(d \sim \Delta) \ll F$ می باشد با تقریب خوبی صحت دارد.

$$\psi_1 = \text{Arcsin} \left(\frac{\sin(\psi)}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \quad (10\text{-الف})$$

$$\Delta = 2d \tan(\psi_1) \quad (10\text{-ب})$$

$$\psi^* = \text{Arctan} \left(\frac{F \tan(\psi) - \Delta}{F} \right) \quad (10\text{-پ})$$

میدان دور ناشی از این میدان بازگشتی با استفاده از اصل هم ارزی "جریانهای معادل مغناطیسی روی روزنه $z=0$ " بدست می آید.

(۱۱)

$$\bar{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) = \frac{-jk_0}{4\pi r} \hat{\mathbf{e}}_r \times \int_{sa} \bar{\mathbf{J}}_m(\mathbf{r}') \exp(j k_0 \hat{\mathbf{e}}_r \cdot \mathbf{r}') da'$$

که در این معادله $\bar{\mathbf{J}}_m$ جریان سطحی معادل است که به صورت معادله (۱۲) تعریف می شود.

$$\bar{\mathbf{J}}_m(\mathbf{r}') = -2\hat{\mathbf{e}}_z \times \bar{\mathbf{E}}^R(\mathbf{r}') \quad (12)$$

بردار $\bar{\mathbf{E}}$ بردار مکان نقطه مشاهده به مختصات کروی (r, θ, ϕ) می باشد و \mathbf{r}' یک نقطه از صفحه آنتن (صفحه $z=0$) می باشد. $\hat{\mathbf{e}}_r$ بردار یکه در جهت شعاعی نقطه مشاهده می باشد. همانطوریکه قبلاً نیز اشاره شد، صفحه $z=0$ را می توان با

آنتن فرنل به توان داده شده به تغذیه تعریف می‌شود. از آنجائی که فرض کرده‌ایم که لایه دی‌الکتریک ϵ_r بدون تلف است، پس توان بازتابیده شده از آنتن فرنل همان توان تابیده شده روی این آنتن می‌باشد. بنابراین بازدهی آنتن را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$\text{eff} = \frac{P_{\text{rad}}}{P_T} = 1 - \cos^{n+1}(\psi_a) \quad (25)$$

که در این معادله ψ_a همان زاویه ψ مربوط به لبه آخرین شعاع آنتن فرنل می‌باشد:

$$\tan(\psi_a) = \frac{D}{2F} \quad (26)$$

(فرض کرده‌ایم که آنتن دایره‌ای شکل به قطر D می‌باشد) بهره آنتن را می‌توان از تعریف آن و اینکه در جهت $\theta=0$ ماکزیمم تشعشع را در فرکانس و فاصله کانونی مورد نظر دارد، بدست آورد:

$$\text{Gain} = \frac{(1/2\eta_0)(P_T/4\pi)}{r^2 |E(\theta=0)|^2} \quad (27)$$

که در این معادله E در $\theta=0$ از معادله (۱۴) بدست می‌آید. در معادله فوق، عامل P_T از صورت و مخرج کسر حذف می‌شود.

با داشتن بهره آنتن، نسبت روزنه (aperture ratio) به راحتی بدست می‌آید:

$$\text{Aperture ratio} = \frac{\text{Gain} \cdot \lambda^2 / 4\pi}{\pi(D/2)^2} \quad (28)$$

(D قطر آنتن و λ_0 طول موج در فضای آزاد می‌باشد)

مؤلفه کراس و کوپلاریزاسیون، پترن آنتن فوق مطابق

تعریف ارائه شده در [۶] به صورت زیر بدست می‌آید:

$$E_{\text{co}} = \hat{a}_2 \cdot \bar{E}(r, \theta, \phi) \quad \hat{a}_1 = \hat{a}_\theta \sin(\phi) + \hat{a}_\phi \cos(\phi)$$

$$E_{\text{cross}} = \hat{a}_1 \cdot \bar{E}(r, \theta, \phi) \quad \hat{a}_2 = \hat{a}_\theta \cos(\phi) - \hat{a}_\phi \sin(\phi)$$

(۲۹)

در این معادلات $\bar{E}(r, \theta, \phi)$ میدان دور آنتن در نقطه مشاهده (r, θ, ϕ) و \hat{a}_1 و \hat{a}_2 جهتهای یکه مربوط به مؤلفه‌های

$$N = k_0 F \sin(\theta) \tan(\psi) \quad (21)$$

$$C(r) = \frac{jk_0}{2\pi r} \sqrt{\frac{2P_T}{4\pi}} \eta_0 \quad (22)$$

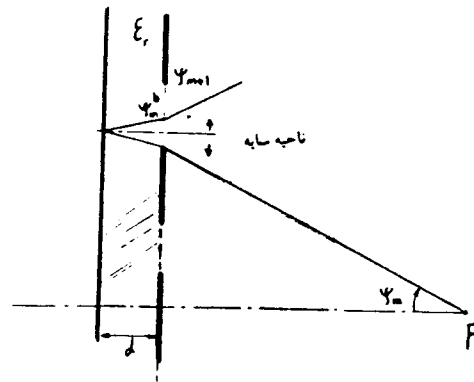
$$\psi_m = \text{Arc tan} \left(\frac{b_m}{F} \right) \quad (23)$$

در این معادلات \bar{V} در مختصات دکارتی تعریف شده است. ψ_1 و ψ^* از معادلات (۱۰) بدست می‌آیند. از روی میدان دور می‌توان تمامی پارامترهای دیگر آنتن را بدست آورد.

توجه داریم که در انتگرالهای معادله (۱۶)، انتگرالگیری نمی‌تواند به طور کامل روی لایه دی‌الکتریک انجام گیرد، و به علت وجود ناحیه سایه حدود انتگرالگیری از ψ_m^b می‌باشد که از معادله زیر بدست می‌آید:

$$\psi_1 = \text{Arc sin}(\sin(\psi_m)/\sqrt{\epsilon_r}) \quad \Delta = 2d \tan(\psi_1)$$

$$r' = F \tan(\psi_m) + \Delta \quad \psi_m^b = \tan^{-1} \left(\frac{r'}{F} \right) \quad (24)$$



شکل ۳-ب- ناحیه سایه و حدود انتگرالگیری معادله (۱۶) (توضیح در متن).

بازدهی و بهره آنتن

بخشی از توان داده شده به تغذیه (P_T) بعد از بازتابش از حلقه‌های فلزی و صفحه زمین آنتن فرنل، بازتابش می‌شود و بخش دیگری از اشعه ناشی از تغذیه حتی به آن برخورد نیز نمی‌کند. بازدهی آنتن به صورت نسبت توان بازتابیده شده از

آنتن با تعداد حلقه‌های $N=3$ بر حسب تابعی از فاصله کانونی نشان می‌دهد.

توافق سه منحنی مختلف تئوری از مرجع [۴] و تجربی و روش حاضر قابل توجه است. مرجع [۴] با روشی غیر دقیق این بهره را بدست آورده است. شکل (۸) تغییرات بهره را بر حسب فرکانس برای تغذیه‌های مختلف و تعداد حلقه‌های مختلف نشان می‌دهد.

Geometry of antenna

Frequency (GHz)= 11.3250

canonical distance (meter)= 0.5

radius of rings (meter)=

0.1158 0.1649 0.2033 0.2363 0.2657 0.2929

Constant of dielectric= 2.5400

Thickness of dielectric (mm)= 4

Gain of feed db=16.2325

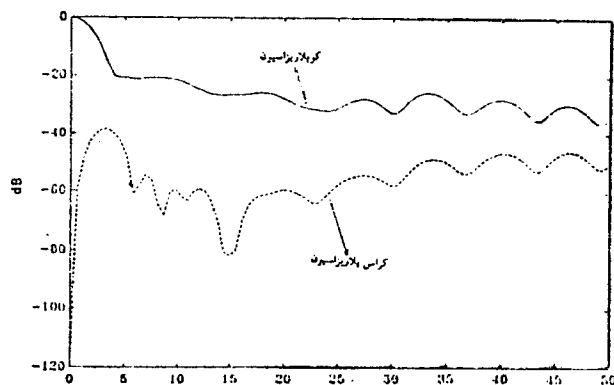
Most Impotant Antenna characteristic:

Efficiency (radited power/feed power)= 0.9481

Gain dB= 31.7671

Aperture Ratio (percent)= 37.8134

جدول ۱: مشخصات یک آنتن فرنل با سه حلقه فلزی چاپ شده روی لایه دی‌الکتریک $d=4 \text{ mm}, \epsilon_r=2.54$



شکل (۴): پاترن تشعشعی مؤلفه‌های کوپلاریزاسیون و کراس پلاریزاسیون در صفحه $\phi = 45^\circ$ مشخصات آنتن همان مشخصات جدول یک می‌باشد.

کراس و کوپلاریزاسیون می‌باشد.

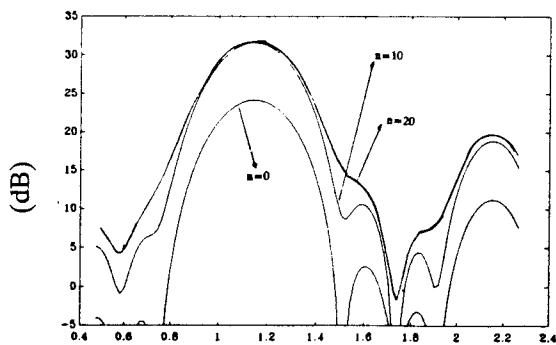
۵- نتایج عددی و تجربی

جدول یک مشخصات یک آنتن فرنل با سه حلقه فلزی چاپ شده روی لایه دی‌الکتریک 2.54 با ضخامت چهار میلی‌متر را نشان می‌دهد. نتایج عددی این تحلیل برای تغذیه‌ای با بهره (16.23dB)، $(n=20)$ در همین جدول آمده است. نتایج تجربی ساخت این آنتن علی‌رغم مشکلات فراوان در ساخت با نتیجه عددی فوق موافقت خوبی دارد (این مقایسه در شکل (۵) آمده است).

شکل (۴) و (۵) پترن همین آنتن را نشان می‌دهد. شکل (۴) مؤلفه‌های کراس و کوپلاریزاسیون را در صفحه $\phi=45^\circ$ را نشان می‌دهد، و شکل (۵) پترن در صفحه $\phi=0^\circ$ را در شکل (۵) نتایج تجربی و تئوری پترن با هم مقایسه شده است. که یک توافق خوب را نشان می‌دهد. بعضی از تفاوتها در این دو منحنی را می‌توان ناشی از خطای اندازه‌گیری میدان دانست، از آنجا که اندازه‌گیری تجربی آنتن در فاصله ۱۰ متری فرستنده بوده است این فاصله در میدان دور آنتن نیست.

شکل (۶) تغییرات بهره در جهت محوری دو آنتن را بر حسب تابعی از فرکانس نشان می‌دهد. آنتنهای فوق برای فاصله کانونی ۰/۵ متر و همان لایه دی‌الکتریک با تعداد حلقه‌های $N=3$ و $N=7$ طراحی شده‌اند. بهره در جهت محوری لزوماً بهره در جهت ماکزیمم نیست، بنابراین ممکن است در بعضی فرکانسها عدد بهره کمتر از صفر نیز شود. این خاصیت نشان دهنده عرض باند کم آنتن فرنل است که یک نقطه ضعف نسبت به آنتن منعکس‌کننده سهموی می‌باشد زیرا که آنتن منعکس‌کننده سهموی یک آنتن با عرض باند وسیع می‌باشد.

شکل (۷) تغییرات بهره در جهت محوری را برای همان



Frequency (Hz) $\times 10^{16}$

شکل ۸: تغییرات بهره به ازای تغذیه‌های مختلف بر حسب تابعی از فرکانس
 $n=20$ $n=10$ $n=0$

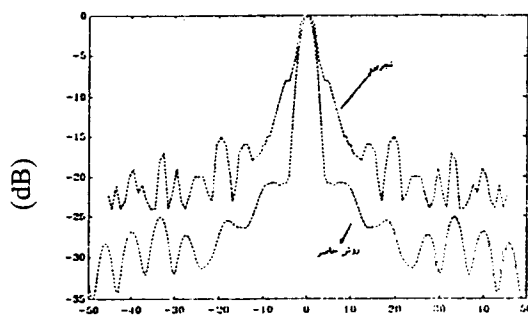
بهره سیستم با افزایش بهره تغذیه افزایش می‌یابد، البته این افزایش بهره بعد از یک حد معین افزایش بهره تغذیه چندان چشمگیر نیست و با افزایش تعداد حلقه‌ها عرض باند آنتن کم می‌شود.

عـ نتیجه گیری

با استفاده از اصل هم‌ارزی و جریانهای مغناطیسی یک روش دقیق برای آنالیز آنتن صفحه‌ای مناطق فرنل ارائه شد. عرض باند کم این آنتن در مقایسه با آنتن منعکس‌کننده سهموی یک نقطه ضعف است. افزایش تعداد حلقه‌ها این عرض باند را کم می‌کند ولی در عوض بهره آنتن افزایش می‌یابد. افزایش تعداد حلقه‌های فلزی هم چنین حساسیت بهره را نسبت به نقطه تغذیه افزایش می‌دهد. چنین آنالیزی را هم چنین می‌توان برای عدسیهای فرنل بکار برد.

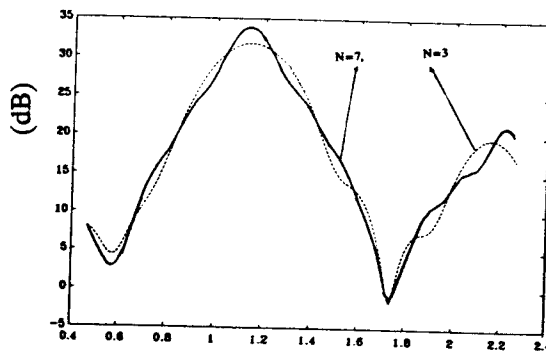
۷- قدردانی

نویسندگان مایلند که از همکاران طرح پژوهشی فوق، آقایان دکتر صفی‌الدین صفوی، مهندس عامری و مهندس بوربور تشکر نمایند. همچنین از زحمات خانم لیلا بیابانی برای کمک در تهیه این مقاله تشکر فراوان می‌شود.



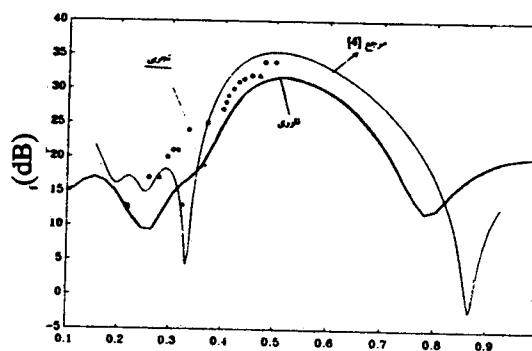
teta degree

شکل ۹: پترن در صفحه $\phi=0$ و مقایسه تجربی با آن.



frequency $\times 10^{10}$ (Hz)

شکل ۱۰: بهره به عنوان تابعی از فرکانس: همان آنتن که تنها تعداد حلقه‌های فلزی آن متفاوت است $N=7, N=3$.



canonical distance (meter)

شکل ۱۱: بهره به عنوان تابعی از فاصله کانونی. تغذیه با فاکتور $n=20$ همان آنتن جدول یک، نتایج تجربی، مرجع [4] و روش حاضر

فهرست منابع

- [1] W. Rotman, "Analysis of an EHF aplanatic zone dielectric lens antenna, IEEE Trans. Antennas propagat., Vol. AP-32, June 1984, pp. 611-617.
- [2] L. F. Van Buskirk and C.E. Hendrix, "The zone plate as a radio-frequency focusing element", IECE Trans. Antennas propagat., Vol. AP-9, May 1961, pp. 319-320.
- [3] D. Black & J. Wiltse, "Millimeter - Wave characteristics of phase correcting Fresnel zone plates," IEEE Trans. Microwave theory techniques, Vol. MTT-35, No.12, December 1987, pp.1122-1129.
- [4] فرخ آرزوم و علیرضا شوشتری "آنتن صفحه‌ای فرنل به عنوان یک متمرکزکننده امواج الکترومغناطیس" نشریه دانشکده فنی، ۱۳۷۴.
- [5] L. Leyton and H.A.J. Herben, "far field analysis of Fresnel - Vectorial zone plate antenna: a comparison with the parabolic reflector antenna", Microwave and optical technology letters, Vol. 5, No.2, February 1992, pp.49-59.
- [6] R.E. Collin, Antennas radio wave propagation, McGrawHill Company, 1985.