

بررسی اثرات خطاهای تصادفی دامنه و فاز روی مشخصات آنتن آرایه فازی میکرواستریپ با روش Monte Carlo

فروهر فرزانه

ابوالقاسم زیدآبادی نژاد

استادیار دانشکده مهندسی برق
دانشگاه صنعتی شریف

دانشجوی دکترای مخابرات
دانشگاه صنعتی شریف

چکیده:

در این مقاله اثرات خطاهای تصادفی دامنه و فاز، توأم و به طور جداگانه روی فاکتور آرایه و پترن کلی یک آنتن آرایه فازی میکرواستریپ 8×8 با عناصر مستطیلی با روش Monte Carlo بررسی شده و تغییرات دایرکتیو، جهت اشعه اصلی، تراز گلبرگ کناری و پهنای اشعه -3dB را در دو صفحه اصلی به دست آورده ایم.

Consideration of The Effects of Random Amplitude and Phase Errors on The Characteristics of Microstrip Phased-Array Antenna by Monte Carlo Method

F.Farzaneh

A.Zeidaabadi Nezhad

Assistant Professor Elect. Eng. Dept
Sharif University of Technology

Ph. D. Student
Sharif University of Technology

Abstract

In this paper the effects of random amplitude and phase errors on the array factor and total pattern of an 8×8 microstrip phased - array consisting of rectangular patches are considered individually and jointly by Monte Carlo method, and deviations of directivity, main beam pointing, side lobe level, and -3dB (half power) beamwidths due to these error are obtained.

۱- مقدمه

روی فاکتور آرایه و پترن کلی یک آنتن آرایه فازی میکرواستریپ 8×8 با عناصر مستطیلی با استفاده از روش Monte Carlo بررسی شده است. Carver و سایرین در مقاله ای [۱] اولاً فقط جهت اشعه اصلی فاکتور آرایه را مد نظر قرار داده اند ثانیاً از اثرات خطای

در آرایه های آنتن، خطوط تغذیه و تغییر فاز دهنده ها باعث افت دامنه یا خطای فاز در ورودی هر آنتن شبکه می گردند. آگاهی از اثرات این خطاها بر روی عملکرد شبکه می تواند مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله اثرات خطاهای تصادفی دامنه و فاز، توأم و به طور جداگانه

اندازه گیری مشخصات نمونه های تغییر فاز دهنده های ساخته شده در آزمایشگاه انتخاب شده اند.

$$\begin{aligned} M=N=10 \\ dx=dy=0.4\lambda \\ \theta_0=45^\circ \\ \varphi_0=180^\circ \end{aligned} \quad (2)$$

- توزیع A_{mn} را یکنواخت در نظر گرفته ایم یعنی:

$$\begin{aligned} A_{mn} &= 1 \\ m &= 0, 1, \dots, M-1 \\ n &= 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (3)$$

- توزیع δA_{mn} را روی فاصله $[-0.3, 0]$ یکنواخت فرض کرده ایم که معادل 3dB افت توان می باشد.
- توزیع $\delta\phi_{mn}$ را روی فاصله $[-9^\circ, +9^\circ]$ یکنواخت فرض کرده ایم.

در این قسمت هدف به دست آوردن تغییرات دایرکتیویته D ، تراز گلبرگ کناری SLL و جهت اشعه اصلی $(\theta_{max}, \varphi_{max})$ است که نتایج پنجاه بار آزمایش تصادفی به شرح زیر است:

الف) کاهش D :
(کاهش)

$$\begin{aligned} \Delta D_{ave} &= 1.443 \text{ dB} \\ \Delta D_{rms} &= 0.0829 \text{ dB} \end{aligned}$$

ب) تغییر جهت بیم اصلی:
(کاهش)

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{ave} &= -0.0607^\circ \\ \Delta\theta_{rms} &= 0.0896^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{ave} &= -0.0944 \\ \Delta\varphi_{rms} &= 0.0887 \end{aligned} \quad (\text{کاهش})$$

ج) افزایش SLL:
(افزایش)

$$\begin{aligned} \Delta SLL_{ave} &= -0.0902 \text{ dB} \\ \Delta SLL_{rms} &= 0.3242 \text{ dB} \end{aligned}$$

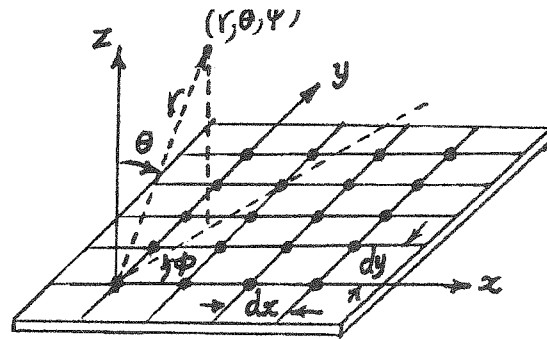
۲-۲- مقایسه نتایج روش Monte Carlo با روش تحلیلی

Carver و دیگران به طور تحلیلی [۱] با در نظر گرفتن خطای فاز به تنهایی برای انحراف جهت بیم اصلی روابط زیر را به دست آورده اند:

دامنه روی جهت اشعه اصلی صرف نظر کرده اند و یک رابطه تحلیلی برای انحراف جهت اشعه اصلی ارائه داده اند. سپس روش Monte Carlo را به یک آرایه خطی در این رابطه اعمال کرده اند. ما در این مقاله علاوه بر دو بعدی در نظر گرفتن آرایه تغییرات D دایرکتیویته، جهت اشعه اصلی، تراز گلبرگ کناری SLL و پهنای اشعه -3dB را در دو صفحه اصلی هم برای فاکتور آرایه و هم برای پترن کلی یک آنتن آرایه فازی میکرواستریپ در پنج حالت مختلف اعمال خطاهای دامنه و فاز، توأم و به طور جداگانه به دست آورده ایم.

۱-۲- بررسی اثرات خطای دامنه و فاز تغذیه روی فاکتور آرایه به روش Monte Carlo

یک آرایه $M \times N$ در صفحه xy مانند شکل (۱) در نظر بگیریم. اگر خطای دامنه و فاز تغذیه عنصر mn ام آن به ترتیب $\delta\phi_{mn}$ ، δA_{mn} باشند، فاکتور آرایه از رابطه (۱) به دست می آید.



شکل (۱) یک آرایه دو بعدی در صفحه xy

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{M=0}^{m-1} \sum_{N=0}^{n-1} (1 + \delta A_{mn}) A_{mn} \exp(j\delta\phi_{mn}) .$$

$$\begin{aligned} \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} [m d_x (\sin\theta \cos\varphi - \sin\theta_0 \cos\varphi_0) \right. \\ \left. + n d_y (\sin\theta \sin\varphi - \sin\theta_0 \sin\varphi_0)] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن A_{mn} دامنه تغذیه بدون خطا، (θ_0, φ_0) جهت اشعه اصلی در حالت بدون خطا، dx ، dy به ترتیب فاصله عناصر در جهت y, x و M, N به ترتیب تعداد میدان دهانه که می تواند کسینوسی، یکنواخت و غیره باشد بستگی دارد. ما مسأله را در شرایط زیر بررسی می کنیم. ابعاد به گونه ای است که فقط یک اشعه اصلی داشته باشیم و توزیع های δA_{mn} ، $\delta\phi_{mn}$ با توجه به

$$E_r \approx E_\theta \approx 0$$

$$E_\phi = -jhwkE_0 \frac{e^{-jkr}}{\pi r} \left\{ \sin\theta \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Z}{Z} \right] \right\}$$

$$\cos\left(\frac{kl}{2} \sin\theta \sin\phi\right) \quad (6)$$

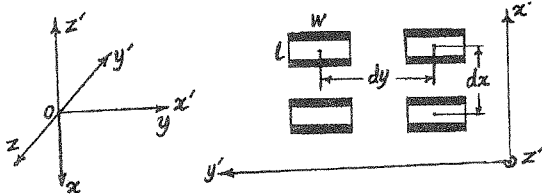
که در آن:

$$X = \frac{kh}{2} \sin\theta \cos\phi$$

$$Z = \frac{kw}{2} \cos\theta \quad (7)$$

می باشند.

اما دستگاه مختصات مطلوب ما $x' y' z'$ مانند شکل (۳) می باشد:



شکل (۳) دستگاه $x' y' z'$ مناسب آرایه میکرواستریپ.

تبدیل دو دستگاه به شرح زیر است:

$$x' = y$$

$$y' = -z$$

$$z' = -x$$

$$r' = r$$

$$\cos\theta = -\sin\theta' \sin\phi'$$

$$\sin\theta = \sqrt{\cos^2\theta' + \sin^2\phi' \cos^2\phi'}$$

$$\sin\theta = \frac{\sin\theta' \cos\phi'}{\sin\theta}$$

$$\cos\phi = \frac{-\cos\theta'}{\sin\phi} \quad (8)$$

پارامترهای در نظر گرفته شده، به شرح زیرند:

$$f = 10 \text{ GHz}$$

$$W = \frac{3}{4} \lambda_g$$

$$\epsilon_r = 2.35$$

$$l = \frac{1}{2} \lambda_g$$

$$\Delta\theta_{\text{rms}} = \frac{S}{kd \cos\theta_0 \sqrt{F}} \quad (4)$$

$$\Delta\theta_{\text{rms}} = \frac{S}{kd \sin\theta_0 \sqrt{G}} \quad (5)$$

که در آن:

$$F = (M+1)(N+1)[M(M+2)\cos^2\phi_0 + N(N+2)\sin^2\phi_0]$$

$$+ N(N+2)\sin^2\phi_0]$$

$$G = (M+1)(N+1)[M(M+2)\sin^2\phi_0 + N(N+2)\cos^2\phi_0]$$

$$+ N(N+2)\cos^2\phi_0]$$

S میزان خطای فاز برای توزیع یکنواخت

$$S = 2 \times 9^\circ = 18^\circ$$

$$\theta_0 = 45^\circ$$

θ_0 و $\phi_0 = 180^\circ$ جهت اصلی اشعه آنتن هستند.

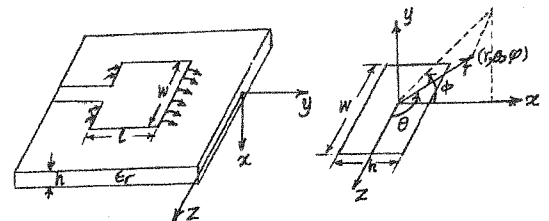
جدول (۱) نتایج مقایسه

	روش تحلیلی	روش Monte Carlo	درصد خطای نسبی
$\Delta\theta_{\text{rms}}$	0.0841°	0.0896°	6.5%
$\Delta\phi_{\text{rms}}$	0.0841°	0.0887°	5.5%

به نظر می رسد خطای حاصل از مقایسه، ناشی از اثر خطای دامنه تغذیه باشد که در روش تحلیلی در نظر گرفته نشده است.

۳- بررسی اثرات خطای دامنه و فاز روی پترن کلی آنتن در آرایه های میکرواستریپ با روش Monte Carlo

میدان های یک Patch مستطیلی میکرواستریپ در دستگاه مختصات xyz مانند شکل (۲) به قرار زیر است [۲]:



شکل (۲) آنتن میکرواستریپ و دستگاه مختصات

که در آن:

$$C = -\sin\theta_{\max}$$

$$A = (\cos\theta_{\max} \cos\varphi_{\max}) \cos\theta_{\max} + (\cos\theta_{\max} \sin\varphi_{\max}) \sin\varphi_{\max}$$

حال در این صفحه پهنای اشعه بر حسب زاویه γ یعنی زاویه نسبت به جهت اشعه اصلی را به دست می آوریم و

$$\gamma = \pm \cos^{-1} [\sin\theta_{\max} \sin\varphi_{\max} \cos(\varphi_{\max} - \varphi) + \cos\theta_{\max} \cos\theta] \quad (14)$$

علامت (+) برای $\varphi > \varphi_{\max}$ و علامت (-) برای $\varphi < \varphi_{\max}$ در این قسمت روش کار بدین ترتیب است که طی پنج مرحله به شرح زیر، خطاهای دامنه و فاز را اعمال می کنیم و تغییرات پارامترهای مورد نظر را به دست می آوریم.

مرحله اول: فقط خطای دامنه δAmn به تنهایی با توزیع یکنواخت روی فاصله $[-0.3, 0]$

مرحله دوم: فقط خطای فاز $\delta\varphi mn$ به تنهایی با توزیع یکنواخت روی فاصله $[-10^\circ, +10^\circ]$

مرحله سوم: فقط خطای فاز $\delta\varphi mn$ به تنهایی با توزیع یکنواخت روی فاصله $[-30^\circ, +30^\circ]$

مرحله چهارم: خطای دامنه δAmn با توزیع یکنواخت روی فاصله $[-0.3, 0]$ توأم با خطای فاز $\delta\varphi mn$ با توزیع یکنواخت روی فاصله $[-10^\circ, +10^\circ]$

مرحله پنجم: خطای دامنه δAmn با توزیع یکنواخت روی فاصله $[-0.3, 0]$ توأم با خطای فاز $\delta\varphi mn$ با توزیع یکنواخت روی فاصله $[-30^\circ, +30^\circ]$

نتایج چهار بار آزمایش تصادفی در جداول ۲، ۳، ۴ و ۵ داده شده اند.

۳- نتایج تأثیرات خطای دامنه و فاز تغذیه روی پارامترهای پترن کلی آنتن

۳-۱- کاهش دایرکتیویته D

جدول (۲) مقدار متوسط و rms کاهش D

	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله چهارم	مرحله پنجم
$\Delta D_{ave}(dB)$	1.4479	0.0383	0.3761	1.4876	1.8543
$\Delta D_{rms}(dB)$	0.0984	0.0080	0.0468	0.0820	0.0708

$$h = 0.381 \text{ mm}$$

$$d_x = \frac{1}{2} \lambda g + 1 \text{ cm}$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = 2.3$$

$$d_y = \frac{3}{4} \lambda g + \frac{3}{4} \text{ cm}$$

$$\lambda g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (9)$$

در این قسمت هدف به دست آوردن تغییرات چهار پارامتر زیر است:

الف) دایرکتیویته D

ب) جهت اشعه اصلی $(\theta_{\max}, \varphi_{\max})$

ج) تراز گلبرگ کناری SLL

د) پهنای اشعه نصف توان در دو صفحه عمود بر هم که از نقطه $(\theta_{\max}, \varphi_{\max})$ می گذرند.

تعریف دو صفحه: صفحه شبه E را همان صفحه $(\varphi' = \varphi_{\max})$ که از محور Z' می گذرد تعریف می کنیم و در حالتی که $\varphi_{\max} = 0$ یا π باشد دقیقاً همان صفحه E است و صفحه شبه H را صفحه عمود بر صفحه شبه E که از نقطه $(\theta_{\max}, \varphi_{\max})$ می گذرد تعریف می کنیم و معادله آن به شرح زیر است:

بردار یکه عمود بر صفحه

$$\hat{a}_0' = \cos\theta_{\max} \cos\varphi_{\max} \hat{x}' + \cos\theta_{\max} \sin\varphi_{\max} \hat{y}' - \sin\theta_{\max} \hat{z}' \quad (10)$$

یک نقطه از صفحه

$$x'_o = r' \sin\theta_{\max} \cos\varphi_{\max}$$

$$y'_o = r' \sin\theta_{\max} \sin\varphi_{\max}$$

$$z'_o = r' \cos\theta_{\max}$$

(11)

معادله صفحه

$$\begin{aligned} & (\sin\theta' \cos\varphi' - \sin\theta_{\max} \cos\varphi_{\max}) \cos\theta_{\max} \cos\varphi_{\max} \\ & + (\sin\theta' \sin\varphi' - \sin\theta_{\max} \sin\varphi_{\max}) \cos\theta_{\max} \sin\varphi_{\max} \\ & + (\cos\theta' - \cos\theta_{\max}) (-\sin\theta_{\max}) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

در این صفحه رابطه θ' و φ' به قرار زیر است:

$$\theta = -\tan^{-1} \left(\frac{C}{A} \right) \quad (13)$$

۳-۲- تغییر جهت اشعه اصلی

جدول (۳) مقدار متوسط و rms تغییرات جهت اشعه اصلی.
($\phi_{max} = 59^\circ$ و $\theta_{max} = 7.9^\circ$ بدون خطا)

	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله چهارم	مرحله پنجم
ΔD_{ave}°	-0.0887	-0.1253	-0.2625	-0.1401	-0.3025
ΔD_{rms}°	0.0471	0.0912	0.2298	0.0991	0.1922
$\Delta \phi_{ave}^\circ$	-0.0752	-0.0048	0.0920	-0.0936	-0.2590
$\Delta \phi_{rms}^\circ$	0.0399	0.02390	0.8908	0.2540	0.8245

۳-۳- تغییر پهنای اشعه 3dB

جدول (۴) مقدار متوسط و rms تغییرات پهنای اشعه 3dB
(در حالت بدون خطا $BWQH-plane = 9.31^\circ$
($BWQE-plane = 8.97^\circ$).

	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله چهارم	مرحله پنجم
$\Delta BWQE_{ave}^\circ$	0.0400	0.000825	0.0090	0.0375	0.0757
$\Delta BWQE_{rms}^\circ$	0.0501	0.0047	0.0438	0.0358	0.0568
$\Delta BWQH_{ave}^\circ$	-0.0496	-0.1415	-0.1606	-0.1037	-0.2358
$\Delta BWQH_{rms}^\circ$	0.0349	0.1687	0.2404	0.0929	0.1751

۳-۴- تغییر تراز گلبرگ کناری SLL

جدول (۵) مقدار متوسط و rms تغییرات SLL (بدون خطا $SLL = 13.6736$ dB)

	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله چهارم	مرحله پنجم
$\Delta SLL_{ave}(dB)$	-0.1341	-0.1348	-0.3982	-0.5241	-0.0057
$\Delta SLL_{rms}(dB)$	0.2840	0.3620	1.1725	0.5892	1.2491

۴- نتیجه گیری

می‌رسد، اثرات آن قابل ملاحظه می‌گردد. (0.3761 dB) در مقابل 1.4479 dB برای خطای فاز یکنواخت روی فاصله $[-30^\circ, +30^\circ]$. تأثیر خطای دامنه روی جهت اشعه اصلی در مقایسه با اثر خطای فاز قابل ملاحظه است و تأثیر خطاهای تصادفی روی پهنای اشعه ناچیز است. به علاوه تأثیر خطاهای تصادفی SLL را در حد چند دهم دسی بل تغییر می‌دهند. اثر عمده در این مورد اضافه شدن یک مقدار ثابت به پترن است که صفرهای پترن بدون خطا را افزایش می‌دهد [۳].

روش مونت کارلو برای بررسی اثرات خطاهای تصادفی روی مشخصات آنتن آرایه فازی مفید و کارآمد است و نتایج آن با نتایج روش‌های تحلیلی موجود سازگاری دارد. از این شبیه‌سازی نتایج زیر حاصل شد. اثرات خطای فاز روی کاهش بهره یا دایرکتیویته در مقایسه با اثرات خطای دامنه ناچیز است. (0.0383 dB) در مقابل 1.4479 dB برای خطای فاز یکنواخت روی فاصله $[-10^\circ, +10^\circ]$. اما وقتی خطای فاز زیاد می‌شود و به چند ده درجه

منابع

- [1] Keith R. Carver, W.K. Cooper, and Warren L. Stutzman, "Beam-Pointing Errors of Phased-Arrays." IEEE Trans. on Antenna and Propag. March 1973, PP. 199-202.
- [2] Costantine A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", John Wiley and Sons 1982.
- [3] Robert J. Maillous, "phased Array Antenna Handbook, Artech House 1994. pp. 395.
- [4] Henning Bach, "Directivity of Basic Linear Arrays", IEEE Trans. on Antenna and Propag. January 1970, pp 107 - 110.