

طراحی و شبیه‌سازی آرایه آنتن مایکرواستریپ با تغذیه سری

ناصر منتصری^{۱*}، یعقوب قانع قره‌باغ^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه شاهد، ۲- پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۴/۰۸/۲۴؛ پذیرش: ۹۵/۰۲/۲۵)

چکیده

در این مقاله، آرایه خطی (با ۲۰ المان در راستای افق) از آنتن مایکرواستریپ با قطبش افقی بررسی شده است. مجموعه شامل سه زیر لایه مایکرواستریپ می‌باشد که در دو زیرلایه پایینی شبکه تغذیه و زیرلایه بالایی پیچ‌های مایکرواستریپ قرار دارند. تحریک پیچ‌ها به صورت تزویج و از طریق شبکه تغذیه در دو زیرلایه پایینی صورت گرفته است. با استفاده از شیار بین پیچ‌ها و خطوط انتقال تغذیه، میدان‌های الکتریکی از شبکه تغذیه به پیچ‌ها تزویج شده‌اند. جدا شدن شبکه تغذیه از قسمت تشعشع‌کننده آنتن باعث شده است که مؤلفه قطبش متعامد کمتر از -50 dB شود. برای رسیدن به سطح گلبیگ‌های فرعی (SLL) مناسب در راستای افق، آرایه به صورت غیریکنواخت و با استفاده از ضرایب چبی‌شف تحریک شده‌اند. در شبیه‌سازی SLL آنتن کمتر از -18 dB حاصل شده است. این الگوی تشعشعی از نوع بادبزی می‌باشد و در سیستم‌های مخابراتی و راداری کاربردی است.

واژگان کلیدی

آرایه خطی، آنتن پیچ مایکرواستریپ، قطبش متعامد.

۱. مقدمه

حالت اول آرایه‌های رزونانسی به صورت موج ایستا تحریک شده‌اند و دو حالت دیگر به‌ازای آرایه‌های غیر رزونانسی تحریک شده با موج متحرک می‌باشند. همچنین روشی جدید برای تحریک المان‌های تشعشعی آنتن می‌تواند توسط موجبر زیرلایه همانند مقاله [۹] صورت پذیرد.

در این مقاله چگونگی طراحی آرایه مایکرواستریپ با الگوی تشعشعی بادبزی و قطبش^۶ افقی بررسی شده است. آرایه خطی شامل ۲۰ المان آنتن مایکرواستریپ با قطبش افقی می‌باشد. الگوی تشعشعی ساختار در شرایطی به صورت بادبزی است که در راستای افق و عمود، پهنای بیم الگوی تشعشعی به ترتیب باریک و پهن باشد. با توجه به افقی بودن قطبش آنتن، تغذیه المان‌ها به صورت سری انجام شده است. همچنین برای حذف تشعشعات ناخواسته از شبکه تغذیه، ساختار به صورت سه لایه طراحی شده طوری که دو لایه پایینی شبکه تغذیه و لایه بالایی شامل پیچ‌های آرایه می‌باشد. لازم به ذکر است که برای کاهش SLL در آنتن، پیچ‌های مایکرواستریپ به صورت غیر یکنواخت (ضرایب چبی‌شف^۷) تغذیه شده‌اند. همچنین برای شبیه‌سازی آنتن از نرم‌افزارهای HFSS و CST استفاده شده است.

در بسیاری از سیستم‌های مخابراتی خصوصاً انواع رادارهای جستجوگر زمینی، دریایی و ... نیاز است که از آنتن‌هایی با الگوی تشعشعی^۱ بادبزی^۲ استفاده شود. از طرفی آنتن‌های آرایه‌ای خطی می‌توانند این الگوی تشعشعی را تحقق دهند. در این مقاله برای ایجاد الگوی تشعشعی بادبزی، آرایه خطی^۳ آنتن مایکرواستریپ^۴ استفاده شده است. در آنتن‌های آرایه‌ای مایکرواستریپ، المان تشعشعی می‌تواند از طریق خط انتقال [۳-۱] و یا به صورت سری و پشت سر هم تغذیه شود [۴-۶]. در صورتی که خطوط انتقال تغذیه آنتن به صورت سری طراحی شود، آنتن فشرده‌تر و کوچکتر می‌شود. به عنوان مثال در [۷]، آرایه‌ای متشکل از ۱۸ تک سلول مایکرواستریپ به صورت سری تغذیه شده‌اند. البته در [۷]، آرایه‌ها به صورت غیر یکنواخت تحریک شده‌اند. این تحریک یکنواخت سبب بهبود SLL^۵ آنتن شده است. همچنین در [۸] نیز سه نمونه تحریک آرایه خطی آنتن مایکرواستریپ به صورت سری توضیح داده شده است. در

*رایانامه نویسنده پاسخگو: n.montaseri@shahed.ac.ir

¹ Pattern

² Fan beam

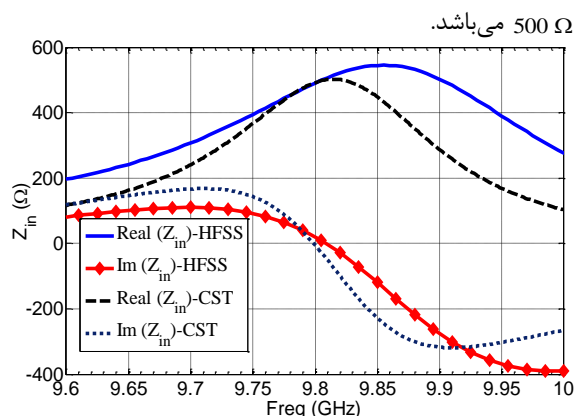
³ Linear array

⁴ Microstrip antenna

⁵ side lobe level (SLL)

⁶ Polarization

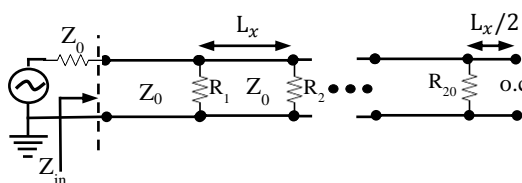
⁷ Chebyshev



شکل ۲. امیدانس ورودی تک سلول شبیه‌سازی شده آنتن مایکرواستریپ در نرم‌افزارهای HFSS و CST

۲-۲. تغذیه سری آرایه خطی ۲۰ المان

هدف اصلی از آرایه کردن آنتن، ایجاد الگوی تشعشعی با پهنای بیم باریک در راستای افق می‌باشد. همچنین در طراحی آرایه، بایستی قطبش افقی آنتن نیز منظور شود. بنابراین به عنوان نمونه در این مقاله آرایه‌ای از ۲۰ المان در راستای افق (x) بررسی شده است. در شکل ۳ مدار معادل آرایه در فرکانس مرکزی نشان داده شده است که L_x فاصله المان‌ها از یکدیگر می‌باشد. آرایه از طریق خط انتقال مایکرواستریپ با امیدانس مشخصه $Z_0 = 50 \Omega$ و عرض W_{50} تحریک شده است. نکته حائز اهمیت اینکه R_i ها ($i = 1, \dots, 20$) نشان دهنده امیدانس ورودی المان‌ها در نقطه تقاطع با خط انتقال 50Ω (یعنی نقطه تقاطع خط انتقال با عرض W_{50} و $W_{3,i}$) می‌باشند.



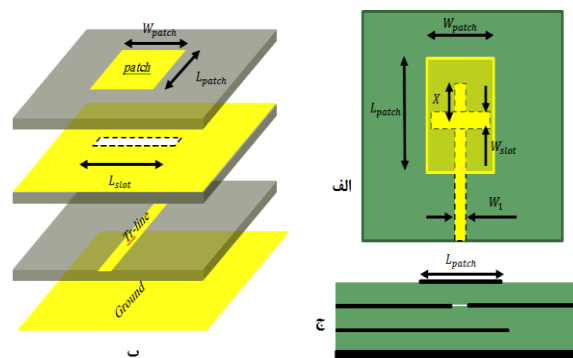
شکل ۳. مدار معادل آنتن در فرکانس مرکزی

در فرکانس 9.8 GHz، برای تحریک آرایه‌ها به صورت یکنواخت می‌بایست امیدانس ورودی از دید خط انتقال اصلی (W_{50}) برابر $R_i = 20Z_0 = 1000 \Omega$ ($i = 1, \dots, 20$) باشد ولی برای عملکرد بهتر آنتن، بایستی در راستای افق میزان SLL کمتر از 18 dB باشد. بنابراین نیاز است که آرایه‌ها به صورت غیر یکنواخت تحریک شوند. در شکل ۴ توزیع دامنه برای ۲۰ المان (با فاصله یکسان L_x از یکدیگر) در راستای افق به‌ازای دو حالت یکنواخت و غیر یکنواخت نشان داده شده است. در حالت غیر یکنواخت ضرایب دامنه المان‌ها (P_i) به‌ازای $SLL < -20$ dB و با استفاده از روش سنتز چپی شف محاسبه شده است. با توجه به شکل ۳ در حالت تطبیق $Z_{in} = Z_0$ می‌باشد که در حالت هنجار شده ضریب هدایت ورودی آنتن $g_{in} = 1/(Z_{in}/Z_0)$ می‌شود،

۲. آنتن مایکرواستریپ با سه زیر لایه

۲-۱. طراحی تک المان مایکرواستریپ

یکی از مهمترین چالش‌ها در طراحی آرایه آنتن‌های مایکرواستریپ، چگونگی تحریک المان‌ها و شبکه تغذیه آنتن می‌باشد. در آنتن‌های مایکرواستریپ، پیچ با استفاده از روش‌های مختلفی تحریک می‌شود. در این مقاله پیچ مایکرواستریپ از طریق تزویج میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی خط انتقال صورت می‌گیرد. در این طراحی، آنتن مایکرواستریپ از سه زیر لایه تشکیل شده است. زیر لایه‌ها از Rogers RO4003 با ضریب نفوذپذیری الکتریکی $\epsilon_r = 3.55$ ، ضریب تلفات $\tan \delta = 0.0027$ و با ضخامت 0.813 mm تشکیل شده‌اند. در شکل ۱ تک سلول آنتن مایکرواستریپ در نماهای مختلف نشان داده شده است. همچنین مقادیر پارامترهای آنتن در جدول ۱ آورده شده‌اند.



شکل ۱. تک سلول آنتن با سه زیر لایه مایکرواستریپ

جدول ۱. پارامترهای تک سلول آنتن مایکرواستریپ (mm)

W_{patch}	L_{patch}	W_{slot}	L_{slot}	x	W_1
5	7	0.7	4	3.2	0.3

با استفاده از خط انتقال مایکرواستریپ و شیار زیر پیچ، میدان الکتریکی روی خط انتقال، جریان سطحی را روی پیچ مایکرواستریپ تزویج می‌کند. در واقع شیاری که بین خط انتقال مایکرواستریپ و پیچ قرار دارد مثل یک مبدل امیدانسی عمل می‌کند. در ادامه مقاله نشان داده شده است که در طراحی آرایه با ۲۰ المان، نیاز است که امیدانس ورودی المان‌ها از نقطه تقاطع با خط تغذیه اصلی بین 750Ω تا 1875Ω متغیر باشند. برای تحقق دادن به این مقدار امیدانس ورودی، طراحی تک سلول بر اساس امیدانس ورودی زیاد (حدود 500Ω) در انتهای خط W_1 صورت گرفته است. برای شبیه‌سازی ساختار از دو نرم‌افزار HFSS و CST استفاده شده است. در شکل ۲ نمودارهای حقیقی و موهومی امیدانس ورودی آنتن (در انتهای خط انتقال W_1) در هر دو نرم‌افزار نشان داده شده است که در فرکانس 9.8 GHz حدوداً

بنابراین

$$g_{in} = \sum_{i=1}^{20} g_i = 1 \quad (1)$$

که $g_i = 1/(R_i/Z_0)$ ضرایب هدایت نرمالیزه شده هر یک از المان‌های آرایه می‌باشند. همچنین ضریب دامنه تحریک هر یک از المان‌های آرایه (P_i) که از روش سنتز چبی شف محاسبه شده است همان توان تلف شده در R_i ها (مطابق با شکل ۳) می‌باشد، در نتیجه

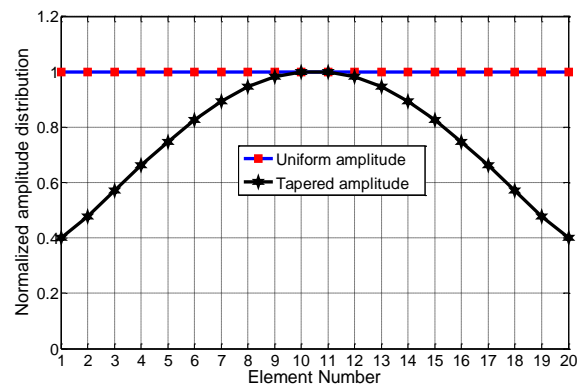
$$p_i = g_i \times v^2 \Rightarrow g_i = \frac{P_i}{v^2} \quad (i=1, \dots, 20) \quad (2)$$

با جایگذاری رابطه (۲) در (۱)

$$g_{in} = \frac{1}{v^2} \sum_{i=1}^{20} P_i = 1 \quad (3)$$

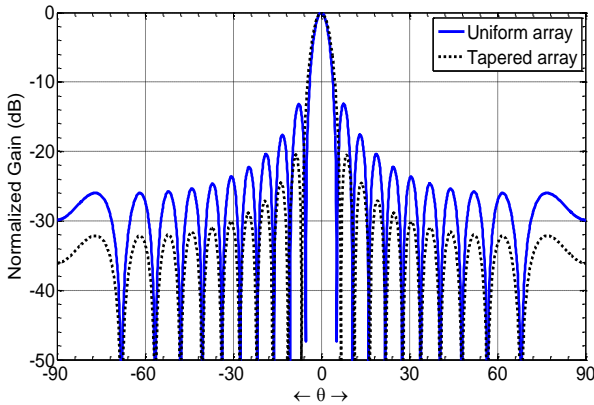
با جایگذاری ضرایب P_i ها که از روش سنتز چبی شف محاسبه شده‌اند در رابطه ۳، $v^2 = 15.0032$ به دست می‌آید. در نتیجه ضریب هدایت نرمالیزه شده المان‌های آرایه از $g_i = P_i / 15.0032$ ($i = 1, \dots, 20$) به دست می‌آید.

با توجه به شکل ۴، مقادیر حداقل و حداکثر دامنه تحریک المان‌ها به ترتیب $P_1 = P_{20} = 0.4$ و $P_{10} = P_{11} = 1$ می‌باشند. پس $R_1 = R_{20} = 1875 \Omega$ و $R_{10} = R_{11} = 750 \Omega$ به ترتیب حداکثر و حداقل امپدانس‌های ورودی به دست می‌آیند. به همین صورت نیز دیگر امپدانس‌های ورودی محاسبه می‌شوند.



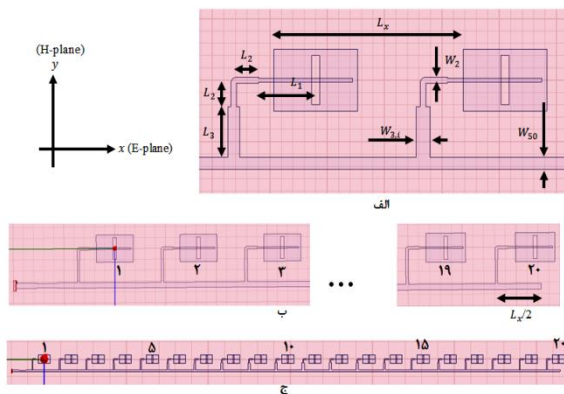
شکل ۴. توزیع دامنه تحریک یکنواخت و غیریکنواخت ۲۰ المان سری در راستای افق (محور x)

در شکل ۵، نمودارهای الگوی تشعشی نرمالیزه شده آرایه به‌ازای دو حالت تحریک یکنواخت و غیر یکنواخت (چبی شف) مشاهده می‌شود. کاملاً روشن است که به‌ازای توزیع یکنواخت، SLL آنتن شرایط خوبی ندارد ولی با توزیع چبی شف آرایه‌ها، SLL < -20 dB حاصل شده است.



شکل ۵. الگوی تشعشی نرمالیزه شده آرایه خطی ۲۰ المانی ایده‌آل در دو حالت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت

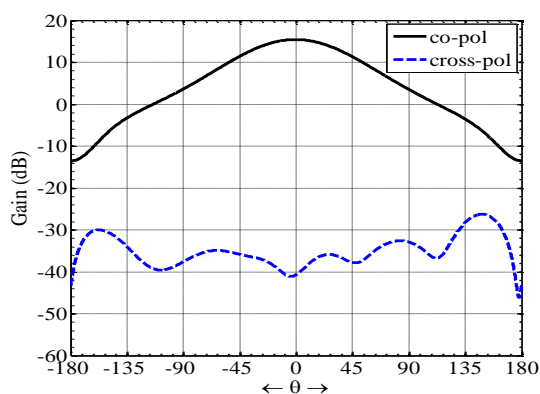
در شکل ۶ آرایه ۲۰ المانی آنتن مایکرواستریپ نشان داده شده است. با توجه به نوع تحریک پچ‌ها، صفحات E-plane و H-plane به ترتیب صفحات xz و yz در دستگاه مختصات دکارتی هستند. همچنین L_x برابر طول موج خط انتقال W_{50} تنظیم شده است در نتیجه همه المان‌های آرایه به صورت هم‌فاز تحریک می‌شوند. در جدول ۲ مقادیر پارامترهای آرایه خطی آنتن مایکرواستریپ مشخص شده‌اند.



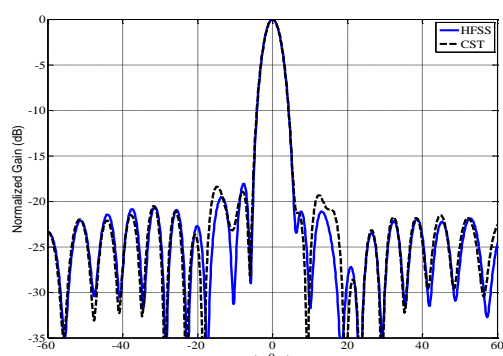
شکل ۶. آرایه سری ۲۰ المانی آنتن مایکرواستریپ

جدول ۲. مقادیر پارامترهای آرایه سری آنتن مایکرواستریپ (mm)

	L_1	L_2	L_3	L_x	W_2	W_{50}
	۵	۱/۹	۴/۱	۱۶/۵	۰/۵	۱
i	۱/۳۰	۲/۱۹	۳/۱۸	۴/۱۷	۵/۱۶	۶/۱۵
$W_{3,i}$	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹
					۱	۱/۲
					۱/۴	۱/۶

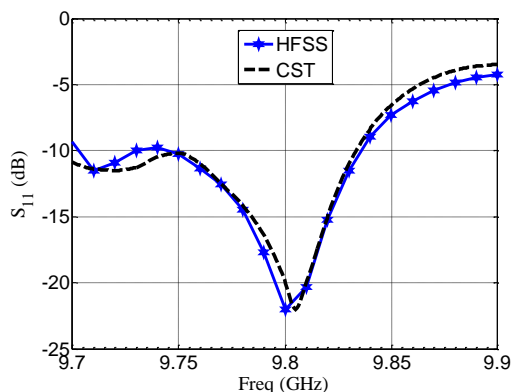


شکل ۹. نمودارهای co-pol و cross-pol آنتن آرایه‌ای در صفحه H (yz) در نرم‌افزار HFSS



شکل ۱۰. نمودار نرمالیزه‌شده الگوی آنتن در صفحه افق و در دو نرم‌افزار HFSS و CST

شکل ۱۱ نمودار S_{11} (dB) آرایه خطی 20×20 المانی را در باند فرکانسی به‌ازای امپدانس مرجع 50Ω در دو نرم‌افزار HFSS و CST نشان می‌دهد که در فرکانس 9.8 GHz ، $S_{11} < -20 \text{ dB}$ می‌باشد. برای مشاهده وضعیت الگوی آنتن در پهنای باند، الگوی آنتن در سه فرکانس 9.75 GHz ، 9.8 GHz ، 9.85 GHz نیز با استفاده از نرم‌افزار HFSS بررسی شده است (شکل ۱۲). هر چند فقط در فرکانس مرکزی $SLL < -19.5 \text{ dB}$ است، ولی در دو فرکانس دیگر نیز $SLL < -16 \text{ dB}$ است.



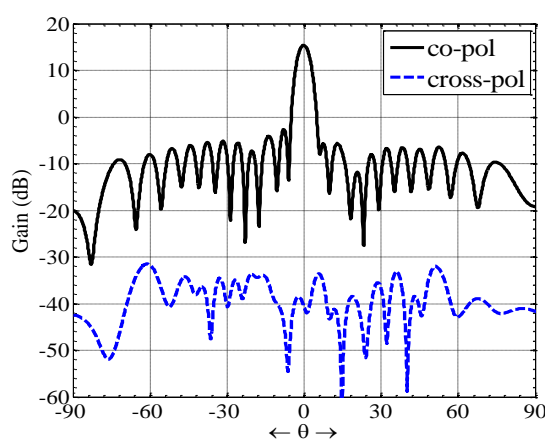
شکل ۱۱. نمودار S_{11} (dB) آرایه سری 20×20 المانی در دو نرم‌افزار HFSS و CST

با متغیر کردن عرض خط انتقال $W_{3,i}$ ، امپدانس ورودی هر یک از المان‌ها تنظیم می‌شود. این امر سبب عدم توزیع یکنواخت دامنه در هر یک از المان‌ها شده است (مطابق با شکل ۴). شکل ۷ توزیع غیر یکنواخت جریان سطحی القا شده روی هر یک از پیچ‌های آرایه را در نرم‌افزار HFSS نشان می‌دهد که پیچ‌های دارای رنگ روشن‌تر نشان‌دهنده دامنه جریان سطحی بیشتری هستند. روشن است که سهم پیچ‌های کناری از توزیع دامنه کمتر از پیچ‌های میانی می‌باشد. با توجه به روش سنتز چپی‌شف و پیاده‌سازی آن در آرایه، الگوی تشعشعی آنتن دارای میزان $SLL < -18 \text{ dB}$ می‌باشد.

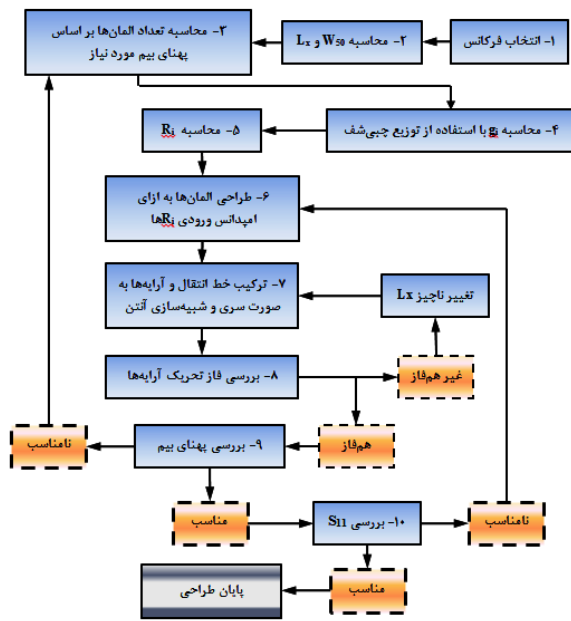


شکل ۷. توزیع غیر یکنواخت جریان سطحی رو هر پیچ در طول آرایه به خاطر تحریک غیر یکنواخت پیچ‌ها

در شکل ۸ نمودارهای co-pol و cross-pol الگوی تشعشعی آنتن در صفحه E-plane (به صورت بزرگنمایی شده) نشان داده شده است. به دلیل عدم دخالت خطوط انتقال تغذیه آنتن در الگوی تشعشعی، میزان $SLL < -50 \text{ dB}$ می‌باشد. در شکل ۹ نمودارهای co-pol و cross-pol الگوی تشعشعی در صفحه H-plane نشان داده شده است. برای اطمینان از نتایج آرایه، آنتن آرایه‌ای با استفاده از نرم‌افزار CST نیز شبیه‌سازی شده است. در شکل ۱۰ نمودار نرمالیزه‌شده الگوی تشعشعی آنتن آرایه‌ای (به صورت بزرگنمایی شده) در دو نرم‌افزار HFSS و CST نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل پیداست، $SLL < -19.5 \text{ dB}$ می‌باشد.



شکل ۸. نمودارهای co-pol و cross-pol آنتن آرایه‌ای در صفحه E (xz) در نرم‌افزار HFSS



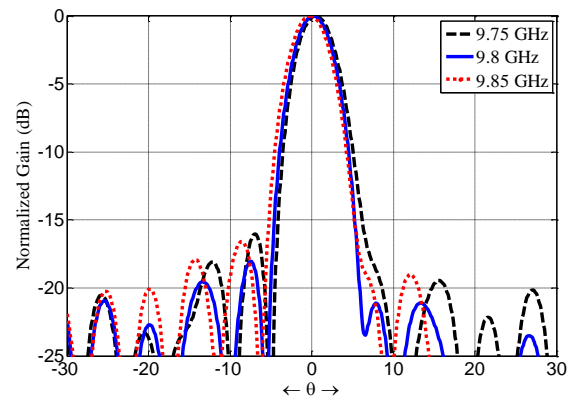
شکل ۱۳. فلوجارت طراحی آنتن آرایه‌ای با تغذیه سری

۳. نتیجه گیری

در این مقاله آرایه خطی شامل ۲۰ المان سری آنتن مایکرواستریپ در فرکانس مرکزی ۹.۸ GHz بررسی شده است. با توجه به این که قطبش افقی و پهنای بیم باریک در صفحه افق (الگوی تشعشعی بادبزی) مد نظر بود، آرایه‌ها از طریق تزویج خط انتقال و پچ‌های مایکرواستریپ تغذیه شده‌اند. در این ساختار حذف اثرات ناشی از شبکه تغذیه در تشعشع آنتن باعث بهبود میزان cross-pol شده است. همچنین برای این که $SLL < -18$ dB باشد، آرایه‌ها به صورت غیریکنواخت و با استفاده از ضرایب چپی شف تحریک شده‌اند. تغذیه غیریکنواخت و از روش تزویج (کوپلینگ) المان‌های آرایه، میزان $SLL < -18$ dB و cross-pol 50 dB از مهمترین دستاوردهای این مقاله به شمار می‌آید. همچنین در این مقاله برای شبیه‌سازی آنتن از دو نرم‌افزار HFSS و CST استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از هر دو نرم‌افزار کاملاً با یکدیگر تطابق داشته و صحت نتایج را اثبات می‌کنند.

۴. مراجع

- [1] S. S. Zhong, X. X. Yang, S. Ch. Gao, and J. H. Cui, "Corner-fed Microstrip Antenna Element and Arrays for Dual-Polarization Operation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 10, pp. 1473-1480, 2002.
- [2] L. Roselli, F. Alimenti, M. Comez, V. Palazzari, F. Placentino, N. Porzi, and A. Scarponi, "A Cost Driven 24 GHz Doppler Radar Sensor Development for Automotive Applications," *In Proc. Eur. Radar Conf. 2005*, pp.335-338.



شکل ۱۴. نمودار الگوی نرمالیزه شده آرایه خطی ۲۰ المانی در صفحه E-plane (XZ) و در فرکانس‌های ۹.۷۵، ۹.۸، ۹.۸۵ GHz (HFSS)

برای طراحی آرایه‌ای مشابه در فرکانسی دیگر می‌توان مراحل زیر را به ترتیب اجرا نمود: (۱) در نظر گرفتن فرکانس مورد نظر، (۲) محاسبه عرض خط تغذیه ($W50$) و طول موج تغذیه (Lx) با در نظر گرفتن فرکانس طراحی، (۳) تعیین تعداد المان‌ها بر اساس پهنای بیم مورد نیاز (که در این پروژه ۲۰ المان در نظر گرفته شده است)، (۴) محاسبه ضرایب دامنه هر یک از المان‌ها (Rgi) به صورت نرمالیزه با استفاده از روش چپی شف، (۵) تعیین امیدانس ورودی مورد نیاز هر یک از المان‌ها (Ri) با استفاده از ضرایب دامنه محاسبه شده در مرحله ۵ (Rgi), (۶) طراحی المان‌ها به گونه‌ای که امیدانس ورودی آنها با Ri ها برابر باشد، (۷) پس از انجام این شش مرحله خط انتقال و المان‌ها به صورت سری به یکدیگر متصل می‌شوند. (۸) شبیه‌سازی کل ساختار و بررسی فاز تحریک المان‌ها. در صورتی که المان‌ها به صورت هم‌فاز تحریک نشده باشند، الگوی آنتن دارای جابجایی کمی نسبت به broadside خواهد بود. بنابراین در این مرحله کفایت که Lx به میزان بسیار کمی تغییر کند و مراحل ۷ به بعد تکرار گردد. (۹) در این مرحله پهنای بیم نیم‌توان آنتن بررسی می‌شود. در صورتی که پهنای بیم مورد نیاز حاصل نشده باشد بایستی تعداد المان‌ها تغییر کند و مراحل ۳ به بعد تکرار گردد. (۱۰) در این مرحله تطبیق ورودی آرایه بررسی می‌گردد. در صورتی که آرایه تطبیق نباشد بایستی تک المان طراحی شده بهینه‌سازی و یا طراحی مجدد شود. تمامی مراحل ذکر شده به صورت فلوجارت در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این نمودار می‌تواند در طراحی آنتن آرایه‌ای (مشابه ساختار ارائه شده) در دیگر فرکانس‌ها و به‌ازای پهنای بیم‌های مختلف مفید و مؤثر باشد.

- [3] A. Valecchi, and G. B. Gentili, "Dual-Polarized Linear Series-Fed Microstrip Arrays with Very Low Losses and Cross Polarization," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 123–126, 2004.
- [4] E. E. Okon, and C. W. Turner, "Design of Broadband Microstrip Series Array for mm-wave Applications," *Electron. Letters*, vol. 38, no.18, pp. 1036–1037, 2002.
- [5] B. J. Bevan, F. Y. M. Chow, and A. W. Seto, "The Synthesis of Shaped Patterns with Series-Fed Microstrip Patch Arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 6, pp. 1206–1212, 1982.
- [6] K. Wincza, S. Gruszczynski, and J. Borgosz, "Microstrip Antenna Array with Series Fed Through Element Coupled Patches," *Electron Letters*, vol. 43, no. 9, pp. 487–489, 2007.
- [7] J. Huang, "A Parallel-Series-Fed Microstrip Array with High Efficiency and Low Cross-Polarization," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 230-233, 1992.
- [8] D. M. Pozar, D. H. Schaubert, "Comparison of Three Series Fed Microstrip Array Geometries", In *Proc of the int. Conf. on Antennas and Propagation Society*, 1993, pp. 728-731.
- [9] E. Soltani, B. Zakeri, and S. M. Hosseini Andargoli, "Design, Simulation and Fabrication of 2x2 Microstrip Patch Antenna Array Fed by Substrate Integrated Waveguide at x Band," *Journal of Radar*, vol. 3, no. 3, pp. 11–20, 2015. (in Persian)

Designing and Simulation of the MicroStrip Antenna Array with Series Feed

N. Montaseri*, Y. Qaneh Qarehbagh

Shahed University

(Received: 15/11/2015, Accepted: 14/05/2016)

Abstract

In this article, the linear array (with 20 elements in the horizontal orientation) of microstrip antenna is examined with horizontal polarization. The set includes three microstrip substrates. There is a power network in two lower substrates and microstrip patches in the upper substrate. Excitation of patches has been done as coupled through the power network in two lower substrates. Using the slot between patches and feed transmission lines, the electric fields are coupled from the power network to the microstrip patches. Separation of the feed network from the radiating part of the antenna causes for the cross-polarization component to be less than -50 dB. On the other hand, in order to reach the appropriate side lobe level (SLL) in the horizontal orientation, the array is tapered using Chebyshev weights. After antenna simulation, $SLL < -18$ dB is achieved in the final structure. This radiation pattern is fan beam and can be used in radar and communication systems.

Keywords: Linear Array, Microstrip Patch Antenna, Cross-Polarization

* Corresponding author E-mail: n.montaseri@shahed.ac.ir