



دانشگاه تهرجان

دانشکده فنی و مهندسی

عنوان پروژه:

طراحی و تحلیل و شبیه سازی آنتن آرایه ی انعکاسی آرایش پذیر

استاد راهنما:

دکتر حبیب الله زلفخانی

گردآورنده:

پریسا جزء پناهی

پاییز ۸۹

## فهرست مطالب

### چکیده

۱. معرفی آنتن های آرایه انعکاسی

۱.۲. معرفی آنتن های آرایه انعکاسی

۱.۳. توصیف یک آرایه انعکاسی

۱.۴. مزیت های آرایه انعکاسی

۱.۵. عیب های آرایه انعکاسی

۲. روند پیشرفت آرایه انعکاسی

۲.۱. ابداعات و پیشرفت های اولیه

۲.۱.۱. آرایه انعکاسی با موجبر (دهه ۱۹۶۰)

۲.۱.۲. آرایه انعکاسی با فاز دایروی (دهه ۱۹۷۰)

۲.۱.۳. آرایه انعکاسی با میکرواستریپ (دهه ۱۹۸۰)

۲.۲. پیشرفت های اخیر

۲.۳. مقایسه ای با تکنولوژی های مشابه

۲.۳.۱. Array-Lens

۲.۳.۲. Fresnel-Zone Plate Reflector

۳. تکنیک های آنالیز آنتن

۳.۱. معرفی

۳.۲. تکنیک های تحلیل

۳.۳. توزیع شیفیت فاز

۳.۴. تحلیل پیچ مستطیلی با استاب اتصالی

۳.۵. تحلیل تمام موج ساختارهای پریودیک چند لایه

۳.۵.۱. Characterization of a Periodic Interface as a Building Block

۳.۵.۲. تحلیل عنصر آرایه انعکاسی در یک محیط پریودیک

# فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی برق

۳۰	۳.۶. عنصر شیفیت دهنده فاز براساس پچ منفرد و یا دسته ای با اندازه متغیر
۳۰	۳.۶.۱. عنصر تک لایه
۳۱	۳.۶.۲. عناصر چند لایه
۳۳	۳.۶.۳. اندازه گیری شیفیت فاز و تلفات در شبیه ساز موج بر
۳۵	۳.۷. عنصر شیفیت دهنده ی فاز براساس ترویج شکاف
۳۶	۳.۷.۱. طراحی عنصر آرایه انعکاسی
۳۶	۳.۷.۲. منحنی های تأخیر فاز
۴۱	۴. راهبردهایی برای طراحی عملی
۴۱	۴.۱. تأثیر عنصر و چگونگی انتخاب آن
۴۱	۴.۱.۱. فاز انعکاسی عنصر
۴۳	۴.۱.۲. پهنای بیم عنصر
۴۳	۴.۱.۳. پهنای باند عنصر
۴۳	۴.۱.۴. بهره انعکاسی عنصر
۴۴	۴.۱.۵. فضای بین عناصر
۴۵	۴.۲. طول مسیر و محاسبه تأخیر فاز
۴۵	۴.۳. محاسبات پترن تشعشی
۴۶	۴.۴. طراحی هندسه آرایه انعکاسی
۵۰	۵. تحلیلی بر بهبود طراحی تلفات و پهنای باند آرایه انعکاسی براساس خصوصیات مواد
۵۰	۵.۱. معرفی
۵۱	۵.۲. تفاوت انواع گوناگون تلفات در آنتن های آرایه انعکاسی
۵۲	۵.۳. عملکرد پهنای باند آرایه انعکاسی و تاثیر مواد مختلف بر آن
۵۳	۵.۴. تحلیل فاز انعکاسی مواد گوناگون
۵۴	۵.۵. آنالیز عددی و پهنای باند
۶۲	۶. آنالیز عددی و پهنای باند

۵۷

۶. توزیع آرایه انعکاسی براساس عناصر میکرواستریپ و تأثیر تغییر چند بعدی عنصر بر آن

۵۸

۶.۲. تحلیل

۵۹

۶.۳. تغییر ابعاد روزنه در پچ مربعی و بیضی شکل

۶۰

۶.۴. تغییر طول و عرض یک دایپل چاپی

۶۱

۶.۵. تغییر طول و عرض پچ مستطیلی

۶۲

۶.۶. تغییر اندازه درونی و بیرونی حلقه مربعی و دایروی

۶۴

۷. آنتن های ماهواره ای براساسی آرایه انعکاسی قابل تنظیم با MEMS

۶۴

۷.۱. معرفی

۶۴

۷.۱.۱. لزوم آرایش پذیری آنتن ها

۶۴

۷.۲. عنصر آرایه انعکاسی آرایش پذیر

۶۵

۷.۳. طراحی و مدل سازی آرایه های انعکاسی قابل تنظیم (آرایش پذیر)

۶۵

۷.۴. تئوری آرایه انعکاسی

۶۶

۷.۵. طراحی عنصر منفرد آرایه انعکاسی

۶۸

۷.۶. مدل کردن سلول پر یودیک

۷۱

۷.۶.۱. اعتبار سنجی و تصدیق مدل

۷۲

۷.۶.۲. اندازه گیری پارامترهای مربوط به سلول منفرد با کمک آزمایش

۷۴

فهرست

## چکیده

مفهوم آنتن آرایه انعکاسی برای اولین بار در سال ۱۹۶۳ با استفاده از مفهوم عناصر موجبر معرفی شد. اما پیشرفت واقعی این آنتن ها در اواخر دهه ۱۹۸۰ و با پیشرفت آنتن های چاپی و *Low-Profile* حاصل شد. یک آرایه ی انعکاسی از تعداد زیادی عناصر تشعشعی تشکیل شده است که توزیع فازی را برای تشکیل یک بیم متمرکز دلخواه ایجاد می کنند. این آرایه از عناصر توسط یک آنتن هورن مرکزی تغذیه می شود. درست همانند روشی که در یک آنتن سهموی به کار گرفته شده است. آرایه های انعکاسی چاپی ترکیبی از مزیت های آنتن های رفلکتور(انعکاسی) و آرایه های فازی هستند. این آرایه ها روی یک زیر لایه مسطح توسط تکنولوژی مدار چاپی تولید می شوند و همانند آرایه های فازی امکان هدایت بیم را در زوایای گوناگون می دهند. از سوی دیگر، مکانیزم تغذیه(درست همانند آنچه در رفلکتورها داریم) پیچیدگی و تلفات بالای یک شبکه تغذیه که در آرایه های فازی مورد استفاده قرار م یگیرند را حذف کرده و منجر به بهره بالا می شود.

## فصل اول

### معرفی آنتن های آرایه انعکاسی

برای بسیاری از ارتباطات رادار و راه دور، لزوم استفاده از آنتنی با بهره بالا ناگزیر است. غالباً در کاربردهای که نیازمند بهره ی بالایی هستند از آرایه ها و رفلکتورهای سهموی استفاده می شود. با این وجود، رفلکتورهای سهموی به خاطر سطوح منحنی وار خود برای تولید با مشکلات فراوانی رو به رو است. خصوصاً اینکه کاربردی در فرکانس های بالا دارند. از سوی دیگر، این رفلکتورها قابلیت اسکن بیم الکترونیکی را در سطح گسترده ای ندارند. از سوی دیگر، آنتن های آرایه ای با بهره بالا، وقتی با عناصر شیفت دهنده ی فاز قابل کنترل تجهیز می شوند قادر به اسکن در سطح گسترده ای هستند. اما عیب این ترکیب هزینه ی بالای آن است. تعداد زیاد مدول های تقویت کننده و ساختار پیچیده ی *Beam Former* می تواند دلیل عمده ی این هزینه باشد. بنابراین نوع سوم از آنتن ها با عنوان آرایه انعکاسی وارد کار شدند تا مشکلاتی را که غالباً همراه رفلکتورهای سهموی و آرایه های معمولی بودند را حل کند.

### ۱.۳. توصیف یک آرایه انعکاسی

یک آرایه انعکاسی آنتنی است مشتمل بر یک سطح مسطح و یک آنتن تغذیه کننده. شکل ۱.۱ نمونه ای از این آنتن را نشان می دهد. بر روی این سطح عناصر تابشی گوناگونی بدون وجود هیچ خط انتقال مقسم نیرو وجود دارند. از آن جمله می توان به موجبر با انتهای باز، پچ میکرواستریپ چاپی، دایپل و حلقه اشاره کرد. هر کدام از این عناصر که از قبل طراحی شده اند و بر روی سطح قرار گرفته اند توسط آنتن هورن تغذیه می شود. این عناصر میدان وارد شونده<sup>۲</sup> را با فاز الکتریکی مورد نیاز

<sup>1</sup> Reflectarray Antenna

<sup>2</sup> Incident Field

برای تشکیل یک موج صفحه ای در فاصله دور<sup>۳</sup> منعکس و پخش می کنند. به عبارت دیگر برای دستیابی به توزیع فاز مورد نظر، برای هر فاز دلخواه باید طول مسیره های مختلف از آنتن هورن مرکزی تا عنصر مربوطه در نظر گرفته شوند. شکل ۱.۱ را ببینید. [S1, S2, ..., Sn]

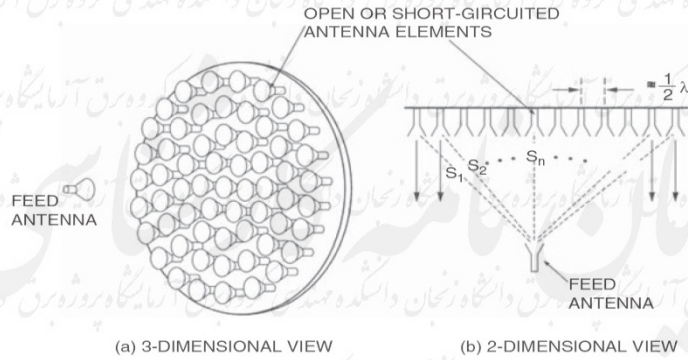


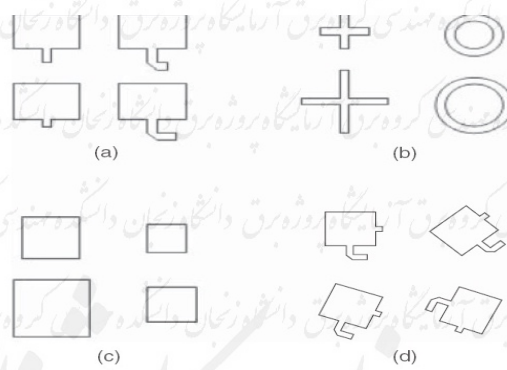
Figure 1.1. Configuration of a reflectarray antenna.

این عملکرد درست شبیه عملکرد آنتن رفلکتور سهموی است که از ساختار منحنی وار خود برای انعکاس و تشکیل یک موج صفحه ای زمانی که آنتن تغذیه آن در نقطه ی کانونی قرار گرفته شود استفاده می کند. بنابراین عبارت رفلکتور مسطح<sup>۴</sup> گاهی برای توصیف آرایه انعکاسی که از هر دو تکنولوژی رفلکتورها و آرایه ها بهره می گیرد به کار می رود. همان طور که در شکل (۱.۲) میبینید راه های گوناگونی برای طراحی عناصر آرایه وجود دارد تا به موج صفحه ای دست یابند.

یکی از این روش ها استفاده از پیچ های میکرواستریپ همسانی است که خطوط تاخیر فاز با طول متغیر به آنها متصل شده است. روش دیگر استفاده از عناصری با اندازه های گوناگون می باشد. عناصری مانند پیچ میکرواستریپ، حلقه و یا دایبل. هر کدام از این عناصر با توجه به امیدانس پراکندگی متفاوتی که دارند می توانند تاخیر فاز مورد نیاز را به ازای طی مسیره های مختلف از آنتن هورن تا عنصر مربوطه را جبران نمایند. روش سوم که تنها برای عناصری مورد کاربرد دارد که با پلاریزاسیون دایروی قطبیده شده باشند، از عناصر همسانی که زاویه چرخش متفاوتی دارند بهره می گیرد.

<sup>3</sup> Far-Field

<sup>4</sup> Flat Reflector



**Figure 1.2.** Various reflectarray elements, (a) identical patches with variable-length phase delay lines, (b) variable-size dipoles or loops, (c) variable-size patches, (d) variable angular rotations.

#### ۱.۴. مزیت های آرایه انعکاسی

درست همانند یک رفلکتور سهموی، آرایه انعکاسی می تواند به بهره بسیار بالایی ( $> 0.5$ ) برای یک دهانه ی بزرگ دست یابد. چرا که هیچ نیازی به تقسیم کننده قدرت ندارد و با مقاومت ورودی بسیار کوچکی در این ساختار رو به رو هستیم. از سوی دیگر، آرایه انعکاسی قادر است به گونه ای طراحی شود که از جهت بروود ساید خود، زاویه ای معادل با ۵۰ درجه را اسکن کند. شیفت دهنده های فاز را می توان به عنوان عناصری در نظر گرفت که به آرایه قابلیت اسکن بیم در طیف وسیعی را می دهند. با این قابلیت دیگر نیازی به شبکه ی پرتلفات و پیچیده ی تشکیل بیم<sup>۵</sup> و مدول های تقویت کننده ی فرستنده و گیرنده ی یک آرایه فازی معمول نیست. آرایه های انعکاسی همانند رفلکتورهای سهموی قابلیت تولید بیم های چندگانه را با قرار دادن چند آنتن هورن تغذیه کننده را دارا می باشند.

#### ۱.۵. عیب های آرایه انعکاسی

با وجود تمام مزیت هایی که برای آرایه انعکاسی برشمردیم یکی از مهمترین عیوب این آنتن، مشخصه ی پهنای باند باریک این ساختار است. پهنای باند در این آرایش به طور معمول نمی تواند بیش از ۱۰٪ افزایش یابد. این مشخصه بستگی شدیدی به طراحی عناصر آرایه، اندازه عناصر و فاصله کانونی دارد. مشخصه پهنای باند آرایه انعکاسی هیچ تناسبی با پهنای باند رفلکتور سهموی ندارد. از نظر تئوری پهنای باند نامحدودی برای رفلکتور در نظر گرفته می شود. برای یک آرایه انعکاسی چاپی، عموماً دو عامل محدودیت برای مشخصه پهنای باند وجود دارد: پهنای باند باریک یک پیچ میکرواستریپ به عنوان عنصر آرایه و عامل بعدی *Differential Spatial Phase Delay* می باشد.

<sup>5</sup> Beam Forming Networks

<sup>6</sup> Differential Spatial Phase Delay



## محدودیت پهنای باند ناشی از مشخصه عنصر آرایه

یک پیچ میکرواستریپ معمولاً پهنای باندی در حدود ۳-۵٪ دارد. برای دستیابی به پهنای باندی وسیعتر برای یک آرایه میکرواستریپ معمول تکنیک هایی از قبیل استفاده از زیر لایه با ضخامت بالا برای پیچ، انباشت چندگانه ی پیچ<sup>۷</sup> و همین طور استفاده از عناصر زیر آرایه که به صورت حلقه ای در حال چرخش هستند مورد کاربرد قرار گرفته اند. با اعمال این روش ها افزایش پهنای باندی در حدود ۱۵٪ مشاهده شده است.

## محدودیت پهنای باند ناشی از Differential Spatial Phase Delay

دومین فاکتور که منجر به کاهش پهنای باند آرایه انعکاسی می شود Differential Spatial Phase Delay است که با مراجعه به شکل (۱.۴) میتوان به خوبی این موضوع را درک کرد. با مراجعه به شکل در می یابیم که همان  $\Delta S$  Differential Spatial Phase Delay است که اختلاف فاز بین دو مسیر  $s_1$  و  $s_2$  از آنتن تغذیه تا عنصر تابشی آرایه را نشان می دهد.  $\Delta S$  ضریبی از طول موج در فرکانس مرکزی است. که میتواند از فرمول زیر محاسبه شود.  $\Delta S = (N + d)\lambda$

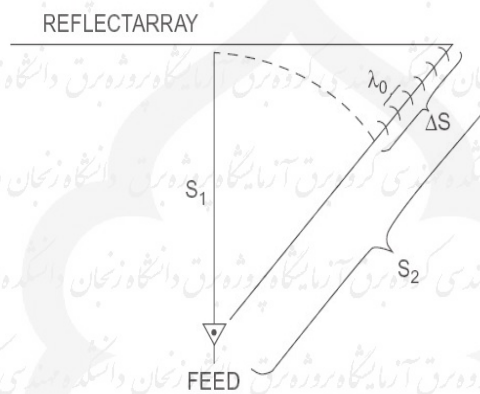


Figure 1.4. Differential spatial phase delay of reflectarray.

جائیکه  $N$  عددی صحیح است و  $d$  کسری از طول موج فضای آزاد است. برای هر تک عنصر،  $d$  با یک طراحی مناسب عنصر آرایه و تاخیر فاز لازم جبران میشود (راه کارهایی چون ایجاد آرایه انعکاسی مشتمل بر عناصر با اندازه های مختلف و یا متغیر بودن اندازه خطوط تاخیر). با تغییر فرکانس کار، عبارت  $(N + d)\lambda$  به  $(N + d)(\lambda + \Delta\lambda)$  تبدیل خواهد شد. از آنجائیکه طراحی و جبران فاز برای هر عنصر در فرکانس مرکزی ثابت فرض شده است، خطای فرکانسی<sup>۸</sup> در توزیع فاز موج بازتابش به وجود خواهد آمد. مقدار تغییر فاز در هر مسیر وقتی که با یک مسیر مرجع، در اینجا  $s_1$  مقایسه می شود همین  $(N + d)\lambda$  است که بخش قابل توجهی از طول موج می باشد.

<sup>7</sup> Stacking Multiple patches

<sup>8</sup> Frequency Excursion

برای کاهش میزان خطای فرکانسی عدد صحیح  $N$  باید کاهش یابد. روش های گوناگونی برای کاهش  $N$  وجود دارد. یکی

از این روش ها طراحی آرایه انعکاسی با  $f/D$  (نرخ فاصله کانونی بر قطر آرایه) بزرگتر می باشد که منجر به کاهش اختلاف طول بین  $(S1, S2)$  می شود. روش دوم استفاده از آرایه ای است که قطر کوچکی داشته باشد. و در نهایت روش سوم

کاهش استفاده از  $Time\ Line\ Delay$  به جای  $Phase\ Delays$ . بعبارت دیگر، وقتی از تکنیک خط تاخیر فاز به جای تکنیک پیچ با اندازه متغیر استفاده میکنیم، به جای استفاده از  $d\Delta\lambda$  برای طول خط تاخیر، از  $(N + d)\Delta\lambda$  برای این منظور استفاده می شود. که این انتخاب تلفات ورودی خط را بیشتر می کند.

## کامران نامد کارشناسی



## فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی برق

# کتابخانه دانشکده مهندسی گروه برق

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.



- [1] Huang, J. and J. A. Encinar, *Re<sup>o</sup>ectarray Antennas*, Wiley-Interscience, New Jersey, 2008.
- [2] K.Y.SZE and L. Shafal "Analysis of phase variation due to varying patch length in a microstrip reflectarray". IEEE 1998.
- [3] J.Huang and R.J. Pogorzelski,"macrostrip reflectarray with elements having variable rotation angle", IEEE AP-S Symposium Digest,pp.1280-1283 April 1993.
- [4] David M. Pozar, D. Targonski, and H.D Syrigos, "Design of Millimeter Wave Microstrip Reflectarrays", IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 45, NO 2, February 1997.
- [5] R.D Javor, X.D. Wu, K. chang, "Design and Performane of Microstrip Reflectarray Antenna", IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol43, No9 pp. 932-938,sep 1995.
- [6] S. D. Targonski and D. M. Pozar, "Analysis and Design of a Microstrip Reflectarray Using Patches of Variable Size", IEEE AP-S/URSI Symposium, Seattle, Washington, pp. 1820{1823, June 1994.
- [7] M.Inam and M.Y. Ismail, "Numerical Analysis and Equivalent Circuit Modeling for Loss Quantification of Reflectarrays Using Different Substrate Materials", Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Antennas, Propagation and Systems (INAS 2009),Dec. 2009.
- [8] Hum, S. V., M. Okoniewski, and R. J. Davies, \Modeling and design of electronically tunable reflectarrays," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 55, No. 8, 2200{2210, Aug. 2007.
- [9] Legay, H., Pinte, B., Charrier, M., Ziaei, A., Girard, E. and Gillard, R.: A steerable reflectarray antenna with MEMS controls. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 14-17 Oct. 2003 Page(s):494 - 499.
- [10] Marin, R., Messinger, A., Freese, J., Müller, S. and Jakoby, R.: Basic Investigations of 35 GHz Reflectarrays and Tunable Unit-Cells for Beamsteering Applications. Proceedings of the 8th European Microwave Week, Page(s): 291 - 294, Paris, Oct. 2005.
- [11] Legay, H., et al., \Satellite antennas based on MEMS tunable reflectarrays," Proc. Antennas and Propagation, EuCAP 2007, 1{ 6, Nov. 11{16, 2007.
- [12] Legay, H., et al., \MEMS controlled linearly polarised reflectarray elements," 12th Int. Antenna Technol. Appl. Electromagn. Symp. , Montreal, QC, Canada, Jul. 16{19, 2006.
- [13] Hum, S. V., M. Okoniewski, and R. J. Davies, \Realizing an electronically tunable reflectarray using varactor diode-tuned elements," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 15, No. 6, 422{424, Jun. 2005.
- [14] Goldsmith, C. L., Z. Yao, S. Eshelman, and D. Denniston, \Performance of low-loss RF MEMS capacitive switches," IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 8, No. 8, 269{271, Aug. 1998.