

## آنتن موج سطحی انحنایزیر با الگوی دوجته نامتقارن

عیسی مزرعه فرد<sup>۱</sup>، ذاکر حسین فیروزه<sup>۲\*</sup>، حامد خیام نکویی<sup>۳</sup>

۱ و ۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان،

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۱۱، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۰۳)

**چکیده:** در این مقاله، آنتن موج سطحی انحنایزیر با الگوی دوجته نامتقارن با نیمرخ باریک ارائه شده است. در این آنتن به منظور هدایت امواج سطحی در راستای مطلوب، پیچ‌های مربعی شکل روی لایه دی‌الکتریک منحنی بارگذاری شده است. با تحریک پیچ دایروی که در داخل لایه دی‌الکتریک قرار دارد امواج سطحی منتشر شده و پراکندگی ناشی از آن‌ها در لبه‌ها، الگوی دوجته ایجاد می‌کند. آنتن موج سطحی انحنایزیر به دلیل نیمرخ باریک و قابلیت جاسازی بالا می‌تواند در تله‌متری کاربرد وسیعی داشته باشد. آنتن پیشنهادی در فرکانس ۵٫۸ GHz با نرم‌افزار تجاری CST طراحی و شبیه‌سازی گردید و به ترتیب دارای پهنای باند و بهره ۷٪ و ۸٫۸ dB می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آنتن موج سطحی، ساختارهای متناوب، آنتن اف معکوس، الگوی دوجته نامتقارن

### ۱- مقدمه

باعث حذف انتشار امواج سطحی در امتداد  $y \pm$  می‌شود. پیچ‌های متناوب در وسط ساختار، انتشار امواج سطحی در امتداد  $x \pm$  را پشتیبانی می‌کنند؛ بنابراین امواج سطحی شدیدی در امتداد  $x \pm$  منتشر شده که با برخورد به لبه صفحه زمین، پراکنده می‌شوند. تابش برگشتی از لبه‌های مقابل، یکدیگر را خنثی کرده و در  $\theta=0$  یک نول Null و الگوی دو جهته ایجاد می‌گردد. برای رسیدن به الگوی نامتقارن کافی است پیچ با تغذیه مرکزی در امتداد  $x \pm$  جابه‌جا شود. در پایان، آنتن بر روی یک استوانه ۳۰ cm قرار گرفته و تاثیر انحناسا در عملکرد آنتن شبیه‌سازی می‌شود. آنتن مذکور دارای الگوی شبیه به الگوی آنتن اف معکوس سیمی اما دارای حجم کم و تطابق آیرودینامیکی با بدنه می‌باشد. به عبارت دیگر، CSWA می‌تواند معایب WIFA را برطرف کند. آنتن موج سطحی انحنایزیر پیشنهاد شده کاربرد وسیعی در تله‌متری دارد. در این مقاله، ابتدا صفحه زمین مصنوعی به‌طور مفصل مورد مطالعه قرار گرفته و سپس مکانیزم تشعشع آنتن انحنایزیر در فرکانس ۵٫۸ GHz با نرم‌افزار CST تحلیل و بررسی خواهد شد.

### ۲- امواج سطحی در زیرلایه عایقی با پیچ‌های

#### متناوب و در ساختار EBG

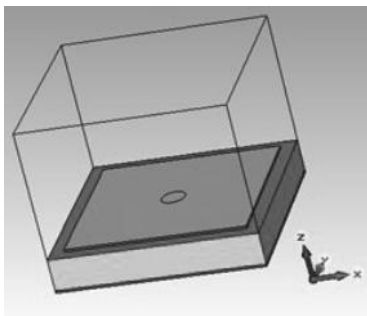
آنتن‌های اف معکوس سیمی (WIFAs)<sup>۱</sup> اغلب به دلیل الگوی دوجته نامتقارن برای تله‌متری در هواپیماهای بدون سرنشین استفاده می‌شوند [۱]. اما این آنتن‌ها مانند سایر آنتن‌های سیمی معایبی نظیر عدم تطابق آیرودینامیکی و دمای بالا روی بدنه هواپیما دارند [۲]. جهت برطرف کردن این معایب از آنتن‌های مسطح مانند آنتن موج سطحی با حجم کم (SWA)<sup>۲</sup> [۳-۸] و باند توقف الکترومغناطیسی (EBG)<sup>۳</sup> [۹-۱۲] استفاده می‌شود.

آنتن‌های انحنایزیر [۱۸-۱۳] به دلیل قابلیت قرارگیری روی سطوح منحنی کاربرد وسیعی دارند. در این مقاله، آنتن موج سطحی انحنایزیر جدیدی (CSWA)<sup>۴</sup> با الگوی دوجته نامتقارن بر اساس آنتن موج سطحی SWA و ساختار باند توقف الکترومغناطیسی (EBG) ارائه شده است. آنتن SWA شامل دو بخش است؛ یکی پیچ با تغذیه مرکزی برای تحریک امواج سطحی و دیگری لایه دی‌الکتریک نازک بارگذاری شده با پیچ‌های متناوب جهت پشتیبانی از انتشار امواج سطحی است. ساختار EBG را می‌توان با اضافه کردن Via در دو سمت کناری پیچ‌های متناوب، مطابق شکل (۱) ایجاد کرد که

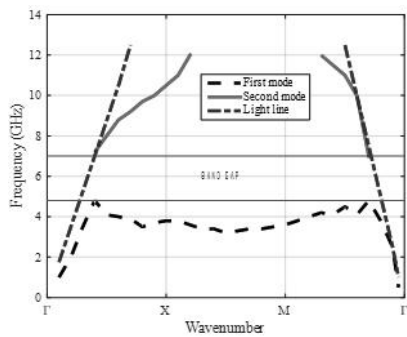
\* ایمیل نویسنده پاسخگو: zhfirouzeh@cc.iut.ac.ir

1- Wire inverted F antennas  
2- Surface wave antenna  
3- Electromagnetic band gap  
4- Conformal surface wave antenna

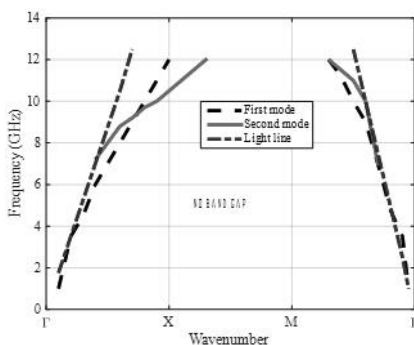
ساختار مذکور با هم ترکیب شده و صفحه زمین مصنوعی جدیدی مطابق شکل (۱) به دست آمده است. چهار ردیف از پیچ‌های متناوب جهت انتشار امواج سطحی در وسط (در امتداد محور  $x$ ) و دو ردیف EBG، در دو سمت کناری (در امتداد محور  $y$ )، جهت حذف امواج سطحی ایجاد شده است. به‌طور خلاصه، در صفحه زمین مصنوعی ارائه شده، امواج سطحی تقریباً فقط در امتداد یک راستا (در امتداد محور  $x$ ) می‌توانند منتشر شوند.



شکل ۲: سلول واحد ساختار EBG در نرم افزار CST



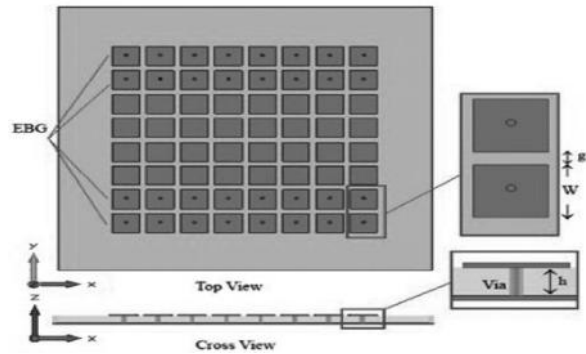
(الف)



(ب)

شکل ۳: نمودار پاشندگی دو زمین مصنوعی (الف) ساختار EBG قارچی (ب) ساختار قارچی شکل بدون Via

و ساختارهای EBG، به‌طور جداگانه مورد بحث قرار گرفته است [۳]. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد آنتن پیشنهادی ترکیب این دو ساختار با هم و ایجاد صفحه زمین مصنوعی جدید برای هدایت امواج سطحی در امتداد یک راستا ( $\pm x$ ) می‌باشد. زمین مصنوعی پیشنهادی در شکل (۱) مشاهده می‌شود.



شکل ۱: صفحه زمین مصنوعی جدید

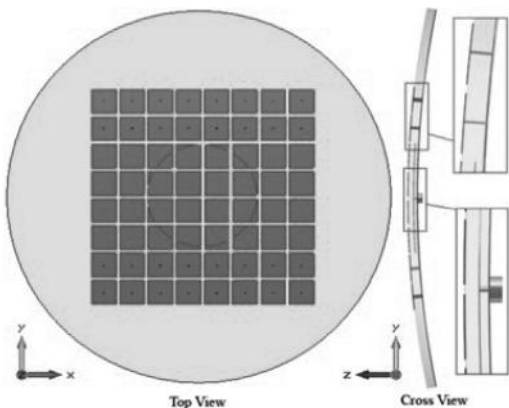
ابعاد ساختار متناوب مربوط به شکل (۱)، برای کاربرد مورد نظر به‌صورت زیر پیشنهاد می‌شود [۳]:

$$w=7.4\text{mm}, g=1.2\text{mm}, h=2.7\text{mm}, r=0.5\text{mm}, \epsilon_r=2.94 \quad (1)$$

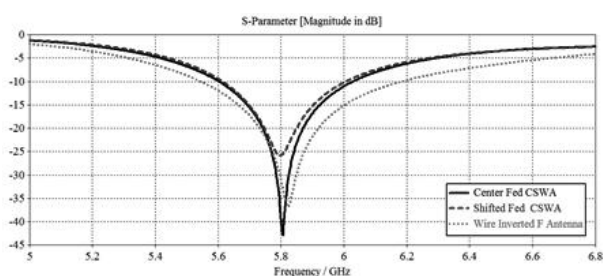
که در آن  $w$  عرض پیچ مربعی،  $g$  فاصله بین پیچ‌ها،  $h$  ضخامت لایه دی‌الکتریک،  $r$  شعاع Via در ساختار EBG و  $\epsilon_r$  ثابت عایقی می‌باشد. مطابق شکل (۲)، به کمک نرم افزار CST و با تعریف شرط مرزی متناوب در جهت  $x$  و  $y$ ، نمودار پاشندگی سطح مصنوعی متناوب با و بدون Via، مطابق شکل (۳) رسم شده است. در این شکل محور عمودی نشان‌دهنده فرکانس و محور افقی نشان‌دهنده عدد موج عرضی ( $k_x, k_y$ ) است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، برای ساختار EBG موج سطحی بین ۵ GHz و ۷ GHz حذف شده است، در حالی که برای لایه عایق بارگذاری شده با پیچ‌های متناوب، به دلیل حذف Via، مد اول موج سطحی در محدوده فرکانسی مذکور قابلیت انتشار دارد.

در شکل (۴) نمودار فاز بازتابی ساختار EBG قارچی شکل و ساختار بدون Via مقایسه شده‌اند. فاز بازتابی دو ساختار به‌طور پیوسته از ۱۸۰ تا ۱۸۰- درجه به‌طور تقریباً یکسان تغییر کرده است. واضح است که حذف Via اثر اندکی روی فاز بازتابی ساختار داشته است. فاز بازتابی صفر درجه در فرکانس ۷ GHz و فاز بازتابی ۹۰ درجه در فرکانس ۶ GHz حاصل می‌شود.

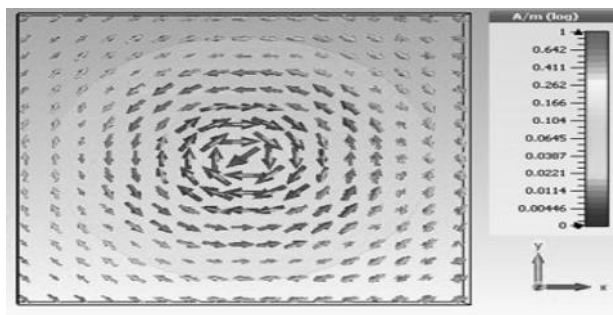
به‌طور خلاصه؛ ساختار در حضور و عدم حضور Via فاز بازتابی مشابهی دارد اما در عدم حضور Via، باند توقف حذف شده و در نتیجه امواج سطحی می‌توانند در این ساختار منتشر شوند. دو



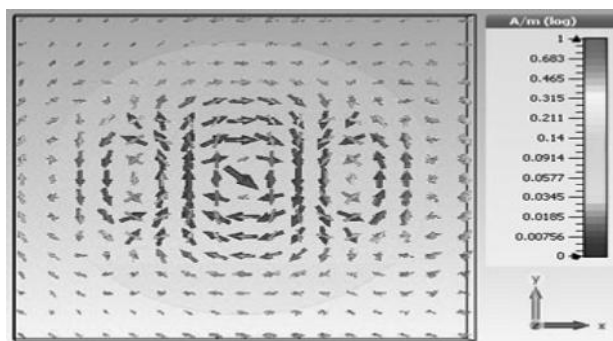
شکل ۵: آنتن موج سطحی انحنای پذیر (CSWA) با تغذیه مرکزی



شکل ۶: ضریب انعکاس آنتن CSWA با تغذیه مرکزی و شیفت یافته و آنتن اف معکوس سیمی (WIFA)

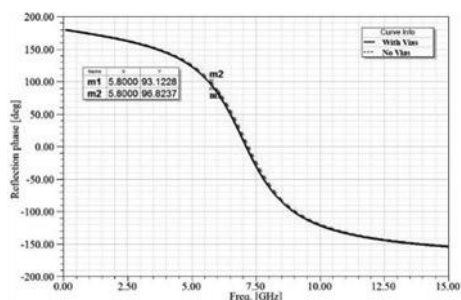


(الف)



(ب)

شکل ۷: جریان سطحی آنتن با تغذیه مرکزی در صفحه XY: (الف) بدون Via (ب) با Via



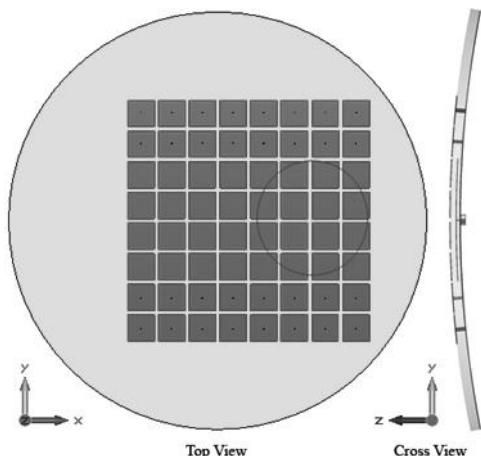
شکل ۴: نمودار فاز بازتابی ساختار EBG فارچی شکل و ساختار فارچی شکل بدون Via

### ۳- آنتن موج سطحی انحنای پذیر با زمین مصنوعی جدید

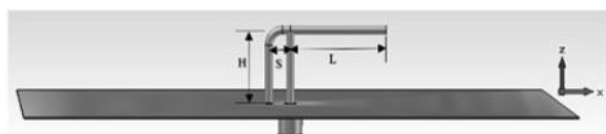
در این بخش، جهت طراحی آنتن موج سطحی انحنای پذیر از زمین مصنوعی جدید استفاده شده است. این آنتن شامل دو بخش است؛ یکی پیچ با تغذیه مرکزی برای تحریک امواج سطحی و دیگری لایه دی الکتریک نازک بارگذاری شده با  $8 \times 8$  پیچ متناوب جهت پشتیبانی از انتشار امواج سطحی است. شعاع صفحه زمین  $58.5$  mm است و پیچ تحریک دایره‌ای است به شعاع  $16.7$  mm که ارتفاع آن از زمین PEC،  $1$  mm می‌باشد. ابعاد پیچ‌های متناوب و جنس لایه دی الکتریک مطابق معادله (۱) است.

مطابق شکل (۵)، انحنای آنتن منطبق بر استوانه‌ای به شعاع  $30$  cm است. مطابق شکل (۶) آنتن طوری بهینه شده است که میزان تلفات برگشتی در فرکانس  $5.8$  GHz، بیش از  $40$  dB است. با تغذیه پیچ دایره‌ای به کمک کابل کوکسیال  $50 \Omega$ ، امواج سطحی داخل زمین مصنوعی تحریک می‌شوند و به دلیل وجود ساختار EBG در دو طرف محور  $y$ ، انتشار امواج سطحی در امتداد  $\pm y$  تا حد زیادی حذف می‌شود. در نتیجه، امواج سطحی تنها در امتداد  $\pm x$  منتشر خواهند شد. این استدلال در شکل (۷) که جریان سطحی آنتن در دو حالت قبل (۷-الف) و بعد از اضافه کردن Via (۷-ب) را نشان می‌دهد به روشنی قابل مشاهده است.

بنابراین امواج سطحی شدیدی در امتداد  $\pm x$  منتشر شده و با برخورد این امواج به مرز صفحه زمین پراکنده شده و موج برگشتی از لبه‌های مقابل، یکدیگر را خنثی کرده و در نتیجه در  $\theta=0$ ، یک Null به وجود می‌آید. به این ترتیب الگوی دوجبهته متقارن با بهره  $9.4$  dB مطابق شکل (۸) و شکل (۹-ب) حاصل می‌شود.



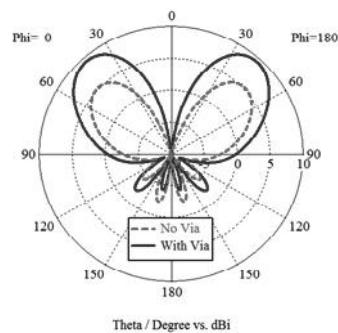
شکل ۱۰: آنتن موج سطحی انحنایزیر (CSWA) با تغذیه شیفت یافته



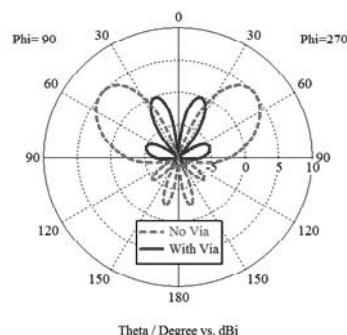
شکل ۱۱: ساختار آنتن اف معکوس سیمی (WIFA)

به‌منظور مشاهده اثر via، الگوی دو بعدی آنتن موج سطحی انحنایزیر با تغذیه مرکزی در حضور و عدم حضور via رسم شده و در شکل (۸) قابل مشاهده است. در این شکل مشاهده می‌شود با اضافه کردن via، بهره صفحه XZ به اندازه ۵ dB افزایش و بهره صفحه YZ به اندازه ۵ dB کاهش می‌یابد و الگوی دوجبهته به‌دست می‌آید. همچنین به‌منظور مشاهده الگوی آنتن در سایر صفحات، الگوی سه‌بعدی آنتن با تغذیه مرکزی در دو حالت با و بدون via، در شکل (۹) آمده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود قبل از اضافه کردن via، الگو همه‌جبهته بوده ولی با اضافه کردن via، الگوی دوجبهته متقارن به‌دست می‌آید.

جهت رسیدن به الگوی دوجبهته نامتقارن، پیچ‌های متناوب و پیچ تغذیه به ترتیب ۱۰ mm و ۲۵ mm مطابق شکل (۱۰) در جهت  $x \pm$  نسبت به مرکز دایره جای‌جا شده‌اند در نتیجه امواج سطحی در امتداد x منتشر و با برخورد به لبه صفحه زمین، پراکنده شده و الگوی نامتقارن دوجبهته، مطابق شکل (۱۲) به‌دست می‌آید. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است الگوی آنتن، نامتقارن و دوجبهته است که Null عمیقی در  $\theta=0$  دارد، بیشینه بهره آن در  $\theta=50^\circ$ ،  $8/8$  dB می‌باشد و اختلاف دو لوب در صفحه XZ،  $1/6$  dB است. به‌منظور مقایسه الگوی این آنتن با آنتن WIFA، الگوی آنتن WIFA که ساختار آن در شکل (۱۱) آمده است، شبیه‌سازی شده و نتایج آن نیز در شکل (۱۲) ارائه شده است. مطابق این مقایسه، بهره

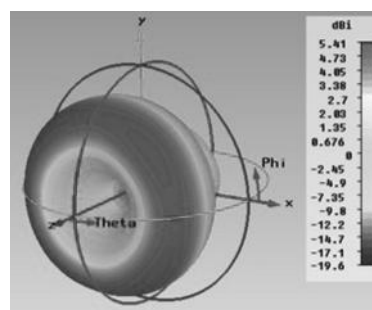


(الف)

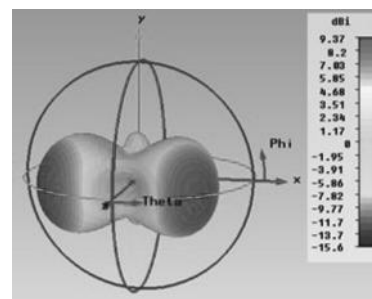


(ب)

شکل ۸: الگوی دوبعدی آنتن موج سطحی انحنایزیر با تغذیه مرکزی در حضور و عدم حضور via: (الف) صفحه XZ (ب) صفحه YZ

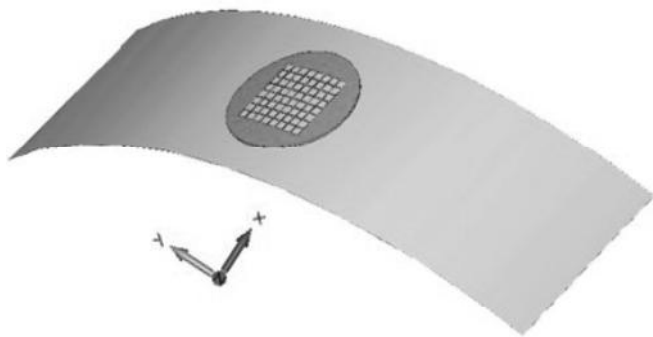


(الف)



(ب)

شکل ۹: الگوی سه‌بعدی موج سطحی انحنایزیر با تغذیه مرکزی: (الف) بدون via (ب) با via

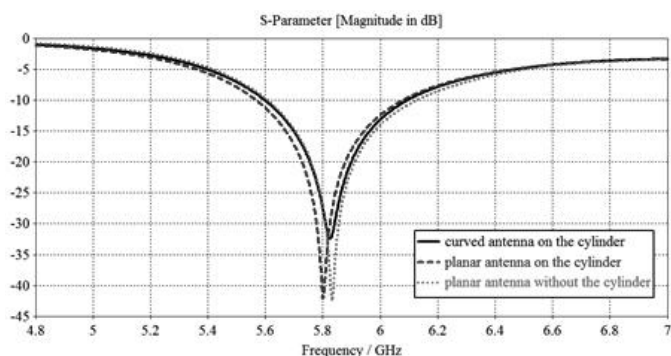


آنتن پیشنهادی در صفحه مورد نظر (صفحه xz) به اندازه ۸/۳ dB نسبت به بهره آنتن WIFA افزایش می یابد. مطابق شکل (۶)، این دو آنتن نیز در فرکانس ۵٫۸ GHz، با تلفات برگشتی بیش از ۲۵ dB رزونانس می کنند. ابعاد آنتن WIFA که در شکل (۱۱) آمده است به صورت زیر است:

$$H = 5.5 \text{ mm}, S = 1.7 \text{ mm}, L = 7.7 \text{ mm}, \quad (۲)$$

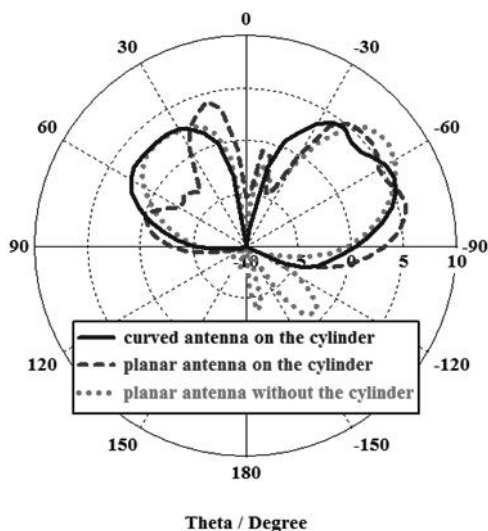
و صفحه زمین آن مربعی به ضلع ۴۳ mm و از جنس PEC است.

شکل ۱۳: آنتن موج سطحی انحنای پذیر روی قسمتی از استوانه هادی



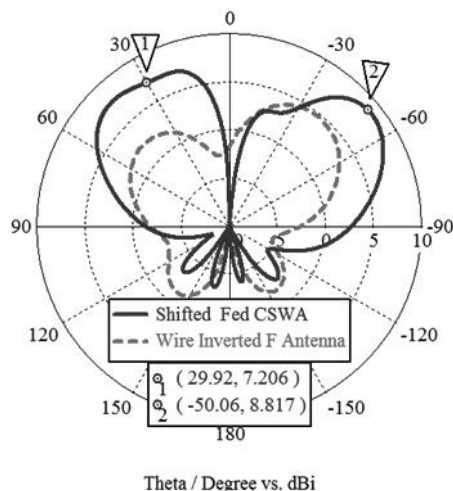
شکل ۱۴: ضریب انعکاس آنتن در سه حالت: (۱) آنتن مسطح روی

استوانه (۲) آنتن مسطح روی

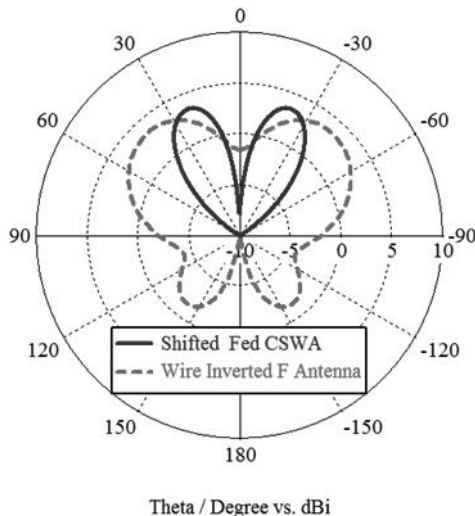


شکل ۱۵: الگوی آنتن در سه حالت: (۱) آنتن مسطح روی

استوانه (۲) آنتن مسطح روی (۳) آنتن انحنای پذیر منطبق بر استوانه



(الف)



(ب)

شکل ۱۲: الگوی آنتن موج سطحی انحنای پذیر (CSWA) با تغذیه

شیفت یافته و آنتن اف معکوس سیمی (WIFA):

(الف) صفحه xz (ب) صفحه yz

- [2] B. R. Motlhabane and D. Gray, "TE-monopole radiation pattern DRA for UAVs," *Antennas and Propagation (ISAP), International Symposium on*, pp. 499–502, Nov. 2012.
- [3] F. Yang, A. Aminian, and Y. Rahmat-Samii, "A novel surface-wave antenna design using a thin periodically loaded ground plane," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 47, pp. 240–245, Nov. 2005.
- [4] F. Yang, Y. Rahmat-Samii, A. Kishk, "Low-profile patch-fed surface wave antenna with a monopole-like radiation pattern," *Microwaves, Antennas & Propagation, IET*, vol. 1, pp. 261–266, Feb. 2007.
- [5] A. Al-Zoubi, F. Yang, and A. Kishk, "A Low-Profile Dual-Band Surface Wave Antenna With a Monopole-Like Pattern," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 12, pp. 3404–3412, Dec. 2007.
- [6] F. Yang, A. Aminian, and Y. Rahmat-Samii, "A low profile surface wave antenna equivalent to a vertical monopole antenna," *IEEE Antennas Propag. Soc. Symp.* 2004, vol. 2, 2004.
- [7] F. Yang, Y. Rahmat-Samii, and A. Kishk, "A novel surface wave antenna with a monopole type pattern: A thin periodically loaded slab excited by a circular disk," in *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, vol. 1A, pp. 742–745, 2005.
- [8] F. Y. F. Yang, A. Al-Zoubi, and A. Kishk, "A Dual Band Surface Wave Antenna with a Monopole Like Pattern," *2006 IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, 2006.
- [9] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, vol. 47, no. 11, pp. 2059–2074, Nov. 1999.
- [10] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering," Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2009.
- [11] C. R. Simovski, P. D. Maagt, and I. V. Melchakova, "High-impedance surfaces having stable resonance with respect to polarization and incidence angle," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, pp. 908–914, 2005.
- [12] H. Mosallaei and Y. Rahmat-Samii, "Periodic bandgap and effective dielectric materials in electromagnetics: Characterization and applications in nanocavities and waveguides," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, pp. 549–563, 2003. (In Persian)

#### ۴- اثر سطوح فلزی انحنای پذیر روی مشخصات آنتن موج سطحی

آنتن‌ها معمولاً روی سطوح فلزی مانند بدنه هواپیما مطابق شکل (۱۳) نصب می‌شوند، این امر مشخصات آنتن مانند الگو را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین بهتر است اثر آن در شبیه‌سازی در نظر گرفته شود تا مشخصات مطلوب به دست آید. در اینجا اثر بخش بزرگی از استوانه هادی، روی مشخصات آنتن موج سطحی بررسی می‌شود. به این منظور مشخصات آنتن در سه حالت: (۱) آنتن مسطح (۲) آنتن مسطح روی استوانه (۳) آنتن انحنای پذیر منطبق بر استوانه بررسی می‌شود. ضریب انعکاس این سه حالت در شکل (۱۴) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان تلفات بازگشتی برای سه حالت در فرکانس مورد نظر بیش از ۲۵dB است. توجه شود که طول این قسمت از استوانه ۲۰ cm، کمان آن ۳۶ cm و شعاع آن ۳۰ cm می‌باشد. با توجه به شکل (۱۵)، وقتی آنتن مسطح روی استوانه قرار می‌گیرد الگو آن خراب شده و اعوجاج شدیدی پیدا می‌کند. حال اگر آنتن انحنای پذیر بر سطح استوانه منطبق شود، الگو آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله آنتن موج سطحی انحنای پذیر با الگو دوجهته نامتقارن با نیم‌رخ باریک ارائه شد. این خاصیت با استفاده از زمین مصنوعی جدید به دست آمد. الگو این آنتن مشابه با الگو آنتن WIFA بوده و در فرکانس ۵.۸GHz، دارای بهره ۸/۸ dB و پهنای باند ۷٪ می‌باشد. برخلاف آنتن WIFA، آنتن پیشنهادی، دارای حجم کم، بهره بالا و تطابق آیرودینامیکی با بدنه است. در ضمن با انطباق این آنتن بر روی سطح استوانه‌ای هادی، الگو به‌صورت چشم‌گیری نسبت به آنتن مسطح بهبود می‌یابد. بنابراین این آنتن به‌دلیل دارا بودن نیم‌رخ باریک و قابلیت جاسازی بالا می‌تواند جایگزین مناسبی برای آنتن WIFA بوده و کاربرد وسیعی در تله‌متری داشته باشد.

#### قدردانی

نویسندگان از پژوهشکده اویونیک دانشگاه صنعتی اصفهان به‌دلیل حمایت از این پروژه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

#### ۶- مراجع

- [1] H. Nakano, Y. Asano, and J. Yamauchi, "A wire inverted F antenna on a finite-sized EBG material," *IEEE International Workshop on*, pp. 13–16, March 2005.

- [16] R. Zentner, Z. Sipus, N. Herscovici and J. Bartolic, "Omnidirectional stacked patch antenna printed on circular cylindrical structure," Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002. IEEE, vol. 2, pp. 272-275, 2002.
- [17] J. Ashkenazy, S. Shtrikman and D. Treves, "Electric surface current model for the analysis of microstrip antennas on cylindrical bodies," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 33, no. 3, pp. 295-300, Mar. 1985.
- [18] G. Gottwald and W. Wiesbeck, "Radiation efficiency of conformal microstrip antennas on cylindrical surfaces," Antennas and Propagation Society International Symposium, 1995. AP-S. Digest, vol.4, no., pp.1780,1783 vol.4, 18-23 June 1995.
- [13] Q. Jinghui, Z. Lingling, D. Hailong and L. Wei, "Analysis and simulation of cylindrical conformal omnidirectional antenna," Microwave Conference Proceedings, 2005. APMC 2005. Asia-Pacific Conference Proceedings, vol. 4, no 4, pp. 4-7, Dec. 2005.
- [14] N. Herscovici, Z. Sipus and P.-S. Kildal, "The cylindrical omnidirectional patch antenna," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 49, no. 12, pp. 1746-1753, Dec. 2001.
- [15] K. M. Luk and W. Y. Tam, "Patch antennas on a spherical body," Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings H, vol. 138, no. 1, pp. 103-108, Feb. 1991.

## **A Conformal Surface-Wave Antenna with Bidirectional Asymmetric Radiation Pattern**

**I. Mazrae-Fard<sup>1</sup>, Z. Hossein-Firouzeh<sup>\*2</sup>, H. Khayyam-Nekuee<sup>3</sup>**

<sup>\*</sup> Esfahan University of Technology

(Receive: 2014/09/14, Accept: 2015/08/25)

### **Abstract**

*A conformal surface wave antenna (CSWA) with a low profile configuration and a bidirectional asymmetric radiation pattern is proposed. Periodic square patches on a curved dielectric slab are used to support the propagation of the surface waves in the desired direction to obtain an asymmetric radiation pattern. The diffraction of surface waves at the edges of the ground plane generates a bidirectional radiation pattern. The antenna pattern is similar to that of wire inverted F antennas (WIFAs). However, It is low-profile, without aerodynamic drag and without high degree of electromagnetic coupling to the fuselage. In fact, the CSWA eliminates the disadvantages of WIFAs. The proposed conformal surface wave antenna exhibits a great potential for telemetry applications when a bidirectional asymmetric radiation pattern with a low-profile and conformal geometry is desired. The proposed antenna is simulated at 5.8 GHz with commercial CST software and the corresponding impedance bandwidth and gain are, respectively, 7% and 8.8 dBi.*

**Keywords:** Surface wave antenna, Periodic structures, F-inverse antenna, bidirectional asymmetric radiation pattern

---

<sup>\*</sup> Corresponding Author Email: zhfirouzeh@cc.iut.ac.ir