# طراحی و ساخت آنتن شیپوری SIW با استفاده از لنز لونبرگ

**سید محمد حسینی[۱]  نادر کمجانی[۲]**

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت- تهران- ایران

sm_hosseini@elec.iust.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت - تهران- ایران

n_komjani@iust.ac.ir

**چکیده: در این مقاله، یک آنتن شیپوری SIW[۱] طراحی و ساخته شده که در آن به منظور افزایش بهره‌ی آنتن، از لنز لونبرگ استفاده شده است. استفاده از یک ساختار انتقالی در دهانه تشعشعی آنتن، نسبت جلو به عقب را افزایش داده و منجر به تطبیق امپدانس دهانه آنتن شیپوری با امپدانس فضای آزاد شده است. علاوه بر این با استفاده از این ساختار انتقالی آنتن پیشنهادی کاملاً صفحه‌ای شده است. بدین ترتیب آنتن با استفاده‌ی همزمان از لنز لونبرگ و ساختار انتقالی دارای دو ویژگی مهم «صفحه‌ای بودن» و «بهره‌ی بیشینه» می‌باشد. فرکانسِ کاری آنتن 14.5 GHz و باند فرکانسی آن Ku می باشد. آنتن با استفاده از نرم افزار CST شبیه سازی شده و نمونه اولیه آن ساخته شده است. بهره‌ی آنتن در فرکانس 14.5 GHz حدود 10.5 dB است. پهنای باند امپدانسی آنتن حدود 14% می باشد.**

**کلمات کلیدی:** آنتن شیپوری، لنز لونبرگ[۲] ، سطوح پیشرفته الکترومغناطیسی[۳]، آنتن جهتی ، آنتن صفحه ای[۴]، موج سطحی

**تاریخ ارسال مقاله:** ۱۳۹۴/۱۲/۲۴

**تاریخ پذیرش مشروط مقاله:** ۱۳۹۵/۱۰/۱۹

**تاریخ پذیرش مقاله:** ۱۳۹۶/۰۶/۰۷

**نام نویسنده‌ی مسئول:** دکتر نادر کمجانی

**نشانی نویسنده‌ی مسئول:** ایران – تهران – نارمک- خیابان حیدرخانی – دانشگاه علم و صنعت ایران – دانشکده‌ی برق

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.9.9 ]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.2-Summer 2018

## ۱- مقدمه

امروزه سطوح پیشرفته‌ی الکترومغناطیسی، به‌طور روزافزون در ساختارهای مختلف مایکروویو و آنتن مورد استفاده قرار می گیرد. استفاده از این سطوح می تواند با رویکردهای مختلفی انجام گیرد. گزینش باند فرکانسی مشخص برای عبور یا عدم عبور موج، ایجاد باند قطع الکترومغناطیسی، دست یابی به سطوح با امپدانس بالا و کنترل موج از جمله مهم‌ترین کاربرد های سطوح پیشرفته هستند.

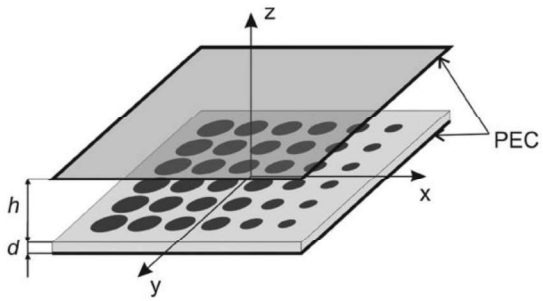
مشخصات انتشاری امواج الکترومغناطیسی عبوری از روی سطوح پیشرفته به منظور کنترل امواج سطحی و یا نشت موج در [۳،۱] مورد بررسی قرار گرفته است. سطوح متناوب یک بعدی [۴]، دو بعدی [۵،۲] و همچنین سطوح دو بعدی ناهمسانگرد[۵] [۷،۶] به منظور کنترل امواج الکترومغناطیسی بررسی شده اند. در[۸] آنتن لنز لونبرگ با استفاده از سطوح امپدانسی طراحی شده است که در آن با استفاده از تغییرات امپدانس سطحی در نقاط مختلف ساختار، مشخصات انتشاری موج به منظور دست‌یابی به مشخصه‌ی لنز لونبرگ، تغییر داده شده اند. بدین ترتیب بهره آنتن با استفاده از لنزلونبرگ افزایش داده شده است. با این حال، به دلیل کم بودن ضخامت آنتن، عملکرد آنتن به شدت افت پیدا می‌کند. مهم‌ترین مشکل این آنتن عدم تطبیق دهانه‌ی آنتن با فضای آزاد است. مشکل دیگر آن کاهش نسبت جلوبه-عقب[۶] آنتن است. روش های مختلفی برای برطرف ساختن این مشکل وجود دارد که بعضی از آن‌ها [۸] از افزایش ابعاد دهانه آنتن و بعضی دیگر [۱۳،۹] از ساختارهای غیر چاپی به منظور تطبیق دهانه‌ی آنتن استفاده می کنند که فرایند ساخت را پیچیده می سازد و موجب غیرصفحه‌ای شدن آنتن می‌گردد. آنتن‌های صفحه‌ای به دلیل امکان مجتمع شدن با دیگر ادوات صفحه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار می-باشند. در کاربردهایی که تابش آنتن در جهت پهلوتاب[۷] باشد، استفاده از آنتن های شیپوری صفحه‌ی H ، رایج می باشد[۹-۱۲]. روش دیگر تطبیق دهانه آنتن که ساختار صفحه‌ای آنتن را نیز حفظ می‌کند، استفاده از لنز دی الکتریک در دهانه‌ی آنتن به منظور بهبود تطبیق امپدانس می باشد[۱۱،۱۰]. موروته[۸] و همکارانش در [۱۴] روشی به منظور بهبود همزمان تطبیق امپدانسی دهانه‌ی آنتن و نسبت جلوبه-عقب آنتن ارائه کرده اند که در آن از ساختاری انتقالی که روی همان دی الکتریک آنتن چاپ می شود، استفاده شده است. در این مقاله ما با استفاده از ایده قراردادن لنزلونبرگ در آنتن که در [۸] بیان شده است به دنبال دستیابی به حداکثر بهره و همچنین استفاده از ایده تطبیق دهانه آنتن [۱۴] به منظور رفع مشکل غیرصفحه‌ای شدن آنتن هستیم.

بخش های مختلف مقاله ی پیش‌رو مطابق زیر است:

در بخش دوم به توضیح روش تحقق لنز و چگونگی دست‌یابی به مشخصات انتشاری مطلوب در ناحیه ای از ساختار می پردازیم و ارتباط بین تحلیل پراکندگی عناصر چاپی که به یافتن امپدانس سطحی می انجامد و مشخصات انتشاری ساختار را بیان می کنیم. سپس نمودارهای پاشندگی به‌دست آمده را با نتایج تحلیل تمام‌موج مقایسه می کنیم. در بخش سوم به ساختار کلی آنتن، تغذیه، استفاده از SIW، تطبیق دهانه‌ی آنتن با فضای آزاد، مشکلات پیش‌روی آن و راه‌حل آن‌ها خواهیم پرداخت. در بخش چهارم نتایج مربوط به شبیه-سازی آنتن را ارائه خواهیم کرد . بخش چهارم نیز به نتیجه گیری اختصاص دارد.

## ۲- تحقق لنز لونبرگ

برای «تحقق لنز» یا به‌طورکلی ایجاد یک ثابت فاز مشخص در یک ساختار روش‌های گوناگونی وجود دارد. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش تشدید عرضی و روش حل عددی مدهای ویژه اشاره کرد. روش تشدید عرضی، روشی عمومی است که برای محاسبه کمیت‌های مختلفی نظیر عدد موج ساختارهای پیچیده‌ی موجبری و همچنین برای به دست آوردن فرکانس تشدیدِ حفره‌های تشدید، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این کار با استفاده از معادله‌ی تشدید عرضی، TRE انجام می‌گیرد. برای توضیح روش تشدید عرضی شکل (۱) را درنظر بگیرید. هرکدام از عناصر چاپی در یک سلول واحد قراردارند. می توان هر سلول واحد را در راستای عرضی، معادل یک خط انتقال مشابه شکل (۲) در نظرگرفت که دو سر آن اتصال‌کوتاه شده است و ادمیتانس عناصرچاپی در میان آن قرارگرفته است.




**شکل (۱): عناصر چاپ شده روی دی الکتریک در موجبر دو صفحه موازی؛ تغییر ابعاد عناصر چاپی مشخصات انتشاری در محل آن عنصر را تغییر می دهد.[۸]**

تشدید عرضی بیان می دارد که مجموع ادمیتانس دیده شده از دو طرف، در هر مقطع یک خط انتقال برابر صفر می باشد. بنابرین با توجه به شکل (۲) می توان رابطه ی زیر را برقرار دانست:

$$Y_{in1} + Y_{in2} + Y_{sheet} = 0 \qquad (۱)$$

که در آن $Y_{sheet}$ ، ادمیتانس سطحی یک عنصر چاپی و $Y_{in1}$ و $Y_{in2}$ به ترتیب ادمیتانس دیده شده از از بالا و پایین عنصر چاپی هستند که در شکل (۲) نشان داده شده اند.با فرض این‌که در این ساختار مد TM تحریک و منتشر شود می‌توان روابط (۲) تا (۵) را برقرار دانست[۱۶،۱۷]:

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.9.9 ]

$$Y_{in} = -jY_{0z}^{TM}\cot(\beta_z^{TM} h) \quad (۲)$$

$$Y_{0z1}^{TM} = \eta_1^{-1}\frac{\beta_{01}}{\beta_{z1}^{TM}} = \eta_0^{-1}\frac{\beta_0}{\beta_{z1}^{TM}}\ \varepsilon_{r1} \quad (۳)$$

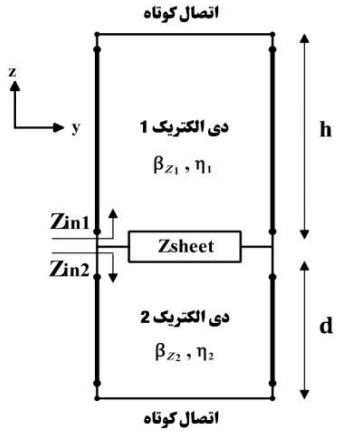
$$Y_{0z2}^{TM} = \eta_2^{-1}\frac{\beta_{02}}{\beta_{z2}^{TM}} = \eta_0^{-1}\frac{\beta_0}{\beta_{z2}^{TM}}\ \varepsilon_{r2} \quad (۴)$$

$$\beta_z = \sqrt{\beta_d^2 - \beta_t^2} = \beta d\sqrt{1-(\frac{\beta_t}{\beta_d})^2} = \beta d\sqrt{1-n^2} \quad (۵)$$

با توجه به روابط (۲) تا (۵) و رابطه ی (۱) می توان نوشت:

$$\frac{1}{j\eta_0\sqrt{1-(\frac{\beta_t}{\beta_{01}})^2}\ \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{r1}}}\tan(\beta_{01}\sqrt{1-(\frac{\beta_t}{\beta_{01}})^2}h)} + \frac{1}{j\eta_0\sqrt{1-(\frac{\beta_t}{\beta_{02}})^2}\ \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{r2}}}\tan(\beta_{02}\sqrt{1-(\frac{\beta_t}{\beta_{02}})^2}d)} + Y_{sheet}(\beta_t) = 0 \quad (۶)$$

رابطه ی (۶) معادله ی پاشندگی مربوط بـه ایـن سـاختار مـی باشـد. همان‌طور که در این رابطه مشخص است به ازای هندسه‌ی مشخصی از ساختار در یک فرکانس مشخص، می‌توان ثابت فاز در راستای مماسـی را تابعی از ادمیتانس پچ دانسـت. بـدین ترتیـب مـی‌تـوان بـا انتخـاب $Y_{sheet}$ مناسب، به ثابت فاز مناسب دست یافت. نکتـه ی مهمـی کـه باید به آن اشاره کرد این است که $Y_{sheet}(\beta_t)$، تابعی از $\beta_t$ است و در فرکانس‌های بالا این تابعیت بیشتر می شود.



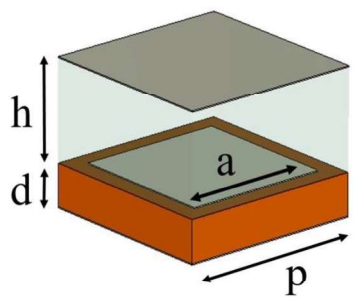

**شکل (۲): مدل خط انتقالی ساختار لنز از مقطع عرضی یک سلول واحد**

برای به دست آوردن ثابت فاز مناسب لنـز لـونبرگ در هـر نقطـه می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد:

$$\beta_t = \beta_{eff}\sqrt{2-(\frac{r}{R})^2} \quad (۷)$$

که در آن $\beta_{eff}$، ثابت فاز مؤثر، $r$ فاصله ی شعاعی از مرکز لنـز و $R$ شعاع لنز می‌باشـد. ثابـت فـاز مـؤثر، ناشـی از قرارگـرفتن دو دی الکتریک مختلف در ساختار می باشد.

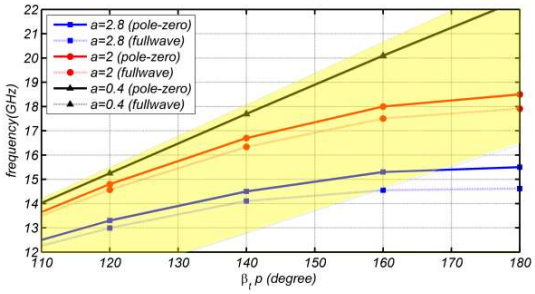
در این قسمت، طراحی لنز را با اسـتفاده از روش تطبیـق صـفر و قطب [۱۵] و روش حل عددی مدهای ویژه مورد بررسی قرار خـواهیم داد. سلول واحد مورد استفاده برای طراحی لنز لـونبرگ در شـکل (۳) نشان داده‌شده است. زیرلایه‌ی پایین RO 3010 بـا ضـخامت d=25 mil، $\varepsilon_{r2}=10.2$ ، زیر لایه‌ی بالا RO 4003 با ضخامت h=60 mil، $\varepsilon_{r1}=3.55$ و تناوب سلول واحد p =3.15 mm می‌باشد.




**شکل (۳): نمایش سلول واحد مورد استفاده برای طراحی لنز لونبرگ؛ در این جا از پچ مربعی به عنوان عنصرچاپی برای طراحی لنز استفاده شده است.**

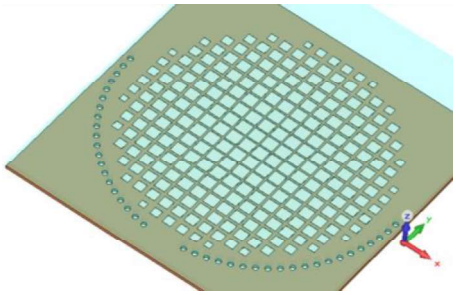
شکل (۴) نمودارهای پاشندگی برای مد اول انتشاری در ساختارِ شکل (۳) را نشان می دهد که با استفاده از روش تطبیق قطب و صـفر بدست آمده و با حل تمام موج مورد تایید قرار گرفته شده است. ناحیه زردرنگ در نمودار شکل (۴) ناحیه‌ای را نشان می دهد که ثابت انتشار لنز لونبرگ را دربر می‌گیرد. همان‌طور که مشخص است فرکانس 14.6 GHz پایین‌ترین فرکانسی است که ثابت فازهای مناسب برای طراحی لنز لونبرگ، توسط ثابت فازهای قابل دست‌یابی توسط پچ‌های مربعـی، پوشش داده می‌شود. بنابرین همین فرکانس بـرای طراحـی لنـز مـورد استفاده قرارگرفته است. لازم به ذکـر اسـت کـه فرکـانس‌هـای بـالاتر به‌هیچ‌وجـه بـرای طراحـی لنـز مناسـب نیسـتند چراکـه نمودارهـای پاشندگی برای پچ های مربعی با ابعاد بـزرگ (حـدود 3mm) حـداکثر فرکـانس‌هـایی تـا حـدود 15 GHz را پوشـش مـی‌دهنـد و بـرای فرکانس‌های بالاتر از آن انتشاری نداریم و همین موضـوع سـبب افـت شدید عملکرد آنتن می‌شود. از طرفی در فرکانس‌های پـایین‌تـر، ثابـت فاز های قابل دستیابی توسط پچ ها، محدوده ثابت فاز های مناسبِ لنز لونبرگ را به طور کامل پوشش نمی دهند.

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.9.9 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.2-Summer 2018




**شکل (۴): نمودارهای پاشندگی برای مد اول انتشاری در ساختارِ شکل (۳) به ازای ابعاد مختلف پچ مربعی با استفاده از روش تطبیق صفر و قطب و روش تمام موج به همراه ناحیه‌ی مناسب برای طراحی لنز لونبرگ**

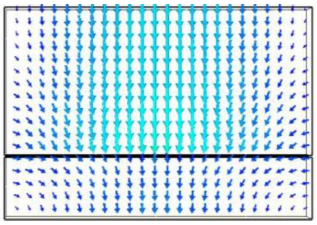
با استفاده از نمودار پاشندگی شکل (۴)، می توان رابطه ی بین ابعاد پچ مربعی و ثابت فاز مورد نیاز برای تحقق لنز لونبرگ را به‌دست آورد. با استفاده از نمودار های شکل (۴) و رابطه‌ی (۷)، لنز لونبرگ نشان داده شده در شکل (۵) طراحی شده است.



**شکل (۵): لنز لونبرگ طراحی شده با استفاده از نمودارهای شکل (۴) و رابطه‌ی (۷) ؛ ساختار لنز بین دولایه دی الکتریک چاپ شده است. در شکل بالا، تنها زیرلایه ی پایین(RO3010) و لنز روی آن نشان‌داده شده است.**

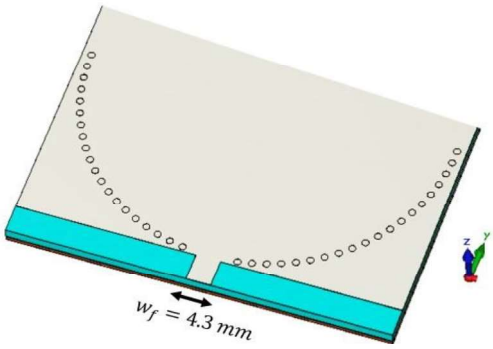
## ۳- ساختار کلی آنتن

در این بخش به ساختار کلی آنتن می پردازیم. آنتنِ طراحی شده، یک آنتن شیپوری صفحه‌ی H است که به منظور جلوگیری از نشت موج از اطراف آنتن و ایجاد گلبرگ های فرعی، از تکنولوژی موجبر زیرلایه‌ای مجتمع در آن استفاده شده است. در ابتدا تغذیه‌ی مناسبی برای آنتن طراحی می‌کنیم. میدان‌های الکتریکی مربوط به مد اول انتشاری در این ساختار در شکل (۶) نشان داده‌شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است میدان‌های الکتریکی در هر دولایه هم‌فاز هستند و بنابرین تغذیه‌ی مناسب برای تحریک این مد می‌تواند از نوع کابل هم‌محور و یا خط ریزنوار باشد.

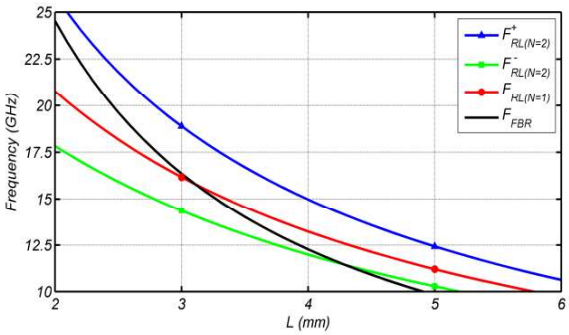


**شکل (۶): نمایش میدان‌های الکتریکی مربوط به مد اول انتشاری در ساختار شکل (۳) در صفحه‌ی y=0 ؛ میدان‌های الکتریکی در هر دولایه هم‌فاز هستند و بنابرین تغذیه‌ی مناسب برای تحریک این مد می‌تواند از نوع کابل هم‌محور و یا خط ریزنوار باشد.**

ما برای تغذیه‌ی آنتن از خط ریز نوار استفاده کردیم که علت انتخاب این نوع تغذیه در این ساختار، تطبیق امپدانسی بهترِ آن می‌باشد. شکل (۷) ابعاد تغذیه و همچنین ساختار SIW را نشان می‌دهد. شعاع viaها 0.6 mm و فاصله ی مرکز تا مرکز آن ها 2.4 mm می باشد و روی یک مسیر نیم دایره ای قراردارند. برای تکمیل طراحیِ آنتن، باید دهانه‌ی تشعشع را با امپدانس فضای آزاد تطبیق کنیم. برای تطبیق دهانه‌ی تشعشعی آنتن از روش بیان شده در [۱۸،۱۴] استفاده می کنیم. بنابر این روش باید از یک ساختار انتقالی برای تطبیق دهانه ی آنتن با فضای آزاد استفاده کرد.




**شکل (۷): نمایش تغذیه‌ی آنتن با استفاده از خط ریزنوار و همچنین محل قرارگیری SIW ؛ استفاده از این نوع تغذیه منجر به تحریک مد اول انتشاری می‌شود.**

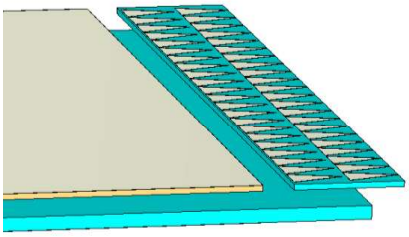



**شکل (۸): نمودار فرکانس‌های تشدید و فرکانس بهترین نسبت جلو به عقب برحسب طول بلوک‌های تشکیل دهنده‌ی ساختار انتقالی ؛ ابعاد و مشخصات ساختار :** $\varepsilon_{reff} = 4.23, s = 0.2mm, h = 2.16mm$

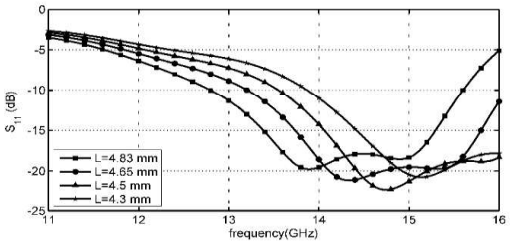
[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.9.9 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.2- Summer 2018

نمودار شکل(۸) که با استفاده از روابط بیان شده در [۱۸] بدست آمده است، فرکانس تشدید ساختار انتقالی را برای یک بلوک ( $F_{RL(N=1)}$ )، دو بلوک ( $F^{+}_{RL(N=2)}$ و $F^{-}_{RL(N=2)}$ ) و فرکانس بهترین نسبت جلوبه‌عقب آنتن ( $F_{FBR}$ ) را برحسب طول ساختار انتقالی نشان می‌دهد. بر اساس نمودار شکل (۸)، برای اینکه ساختار انتقالی در فرکانس 14.6 GHz تشدید کند طول بلوک‌های تشکیل دهنده‌ی ساختار انتقالی باید حدود 4.1 mm باشد. باید توجه شود طول بدست آمده مقداری تقریبی بوده و در ادامه با بهینه سازی، طول دقیق بلوک بدست خواهد آمد.

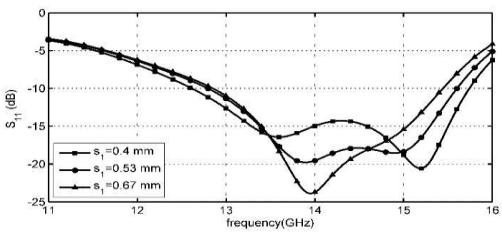
تقارن آنتن در لبه‌ی تشعشعی از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد چراکه شکاف‌های تشعشع در بالا و پایین آنتن با دی‌الکتریک‌های مختلفی پرشده‌اند و این، باعث تفاوت اندازه‌ی میدان‌های الکتریکی در این شکاف‌ها می‌شود. درنتیجه الگوی تشعشع آنتن در جهت نامطلوب قرار می گیرد. برای حل این مشکل از یک تکه زیرلایه‌ی RO 4003 با ضخامت h = 25 mil در بخش ساختار انتقالی، به‌جای امتداد زیر لایه‌ی RO 3010 استفاده می‌کنیم. مطابق آنچه در [۱۴] آمده است برای افزایش پهنای باند و همچنین دست‌یابی همزمان به بهترین تطبیق امپدانس و بهترین نسبت جلوبه‌عقب بلوک‌های تشکیل‌دهنده‌ی ساختار انتقالی را مثلثی‌شکل در نظر می‌گیریم. این ساختار انتقالی در شکل (۹) نشان داده شده است. برای تکمیل طراحی ساختار انتقالی، با توجه به روش بیان شده در [۱۴]، ابعاد مختلف ساختار انتقالی را مورد مطالعه‌ی پارامتری قرار می‌دهیم. شکل (۱۰) تغییرات ضریب بازگشتی از آنتن را به ازای تغییرات ابعاد ساختار انتقالی نشان می دهد. ابعاد بررسی‌شده در این مطالعه‌ی پارامتری در شکل (۱۲) نشان داده شده اند.



**شکل(۹): نمایش ساختار انتقالی آنتن برای تطبیق دهانه با امپدانس فضای آزاد؛ به‌منظور ایجاد تقارن در بخش تشعشع آنتن، یک تکه زیرلایه‌ی RO 4003 با ضخامت h=25 mil در بخش ساختار انتقالی، به‌جای امتداد زیر لایه‌ی RO 3010 استفاده‌شده است.**



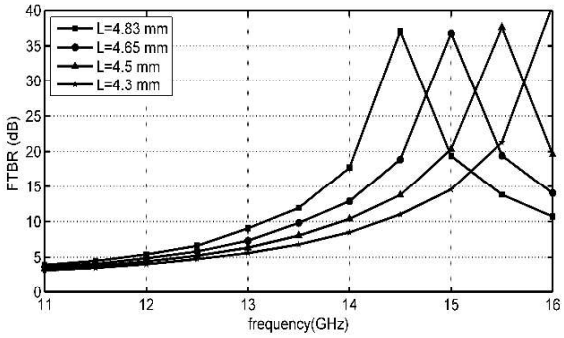

(الف)



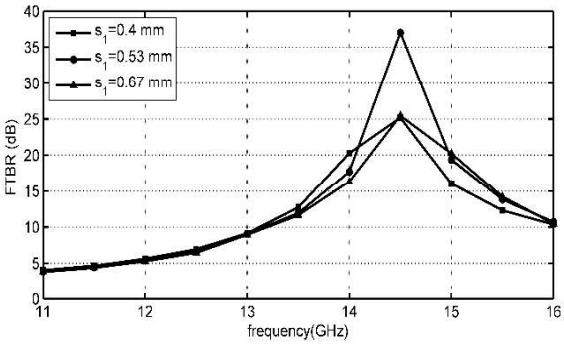

(ب)

**شکل (۱۰): بررسی پارامتری ابعاد مختلف ساختار انتقالی ؛ الف) تغییرات $S_{11}$ به ازای s1=0.53 mm و مقادیر مختلف L ، ب) تغییرات $S_{11}$ به ازای L=4.83 mm و مقادیر مختلف s1**

شکل (۱۰ الف) نشان می‌دهد که L بیشترین تأثیر را در تعیین فرکانس کاری آنتن دارد و در شکل (۱۰ ب) می‌بینیم که افزایش s1 به افزایش تطبیق آنتن کمک می‌کند. در شکل (۱۱) تغییرات نسبت جلوبه‌عقب آنتن بر حسب تغییرات ابعاد ساختار انتقالی نشان‌داده شده است. شکل (۱۱ الف) نشان می‌دهد که افزایش L باعث کاهش فرکانسی می‌شود که در آن شاهد بیشترین مقدار FBR هستیم و در شکل (۱۱ ب) می‌بینیم که به ازای s1=0.53 mm، FBR آنتن در یک فرکانس مشخص بیشینه می شود و با دور شدن s1 از این مقدار، FBR کاهش می‌یابد.



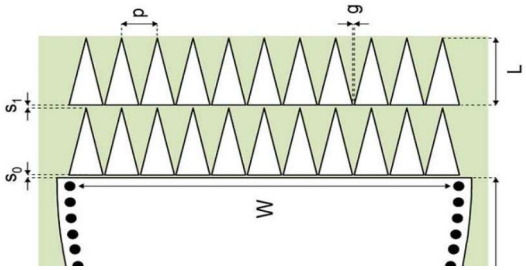

(الف)




(ب)

**شکل (۱۱): بررسی پارامتری ابعاد مختلف ساختار انتقالی ؛ الف) تغییرات FTBR به ازای s1=0.53 mm و مقادیر مختلف L ، ب) تغییرات FTBR به ازای L=4.83 mm و مقادیر مختلف s1**

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.9.9 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.2-Summer 2018



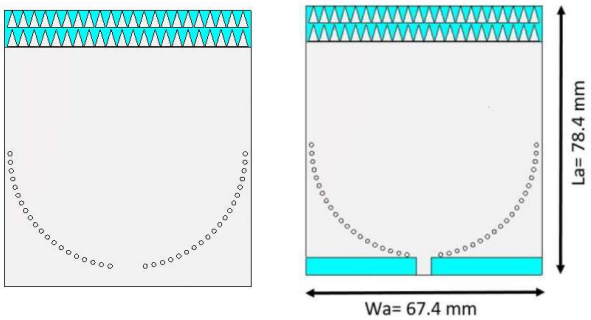

**شکل (۱۲): نمایش ساختار انتقالی مورد استفاده برای تطبیق دهانه ی آنتن ؛ ابعاد پارامترهای مورد بررسی در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده اند. [۱۴]**

با توجه به نمودارهای شکل (۱۰) و شکل (۱۱) و به‌منظور دست‌یابی به مناسب‌ترین تطبیق امپدانسی و نسبت جلو به عقب به‌طور هم‌زمان، ابعاد ساختار انتقالی مطابق جدول (۱) به‌دست‌آمده اند.

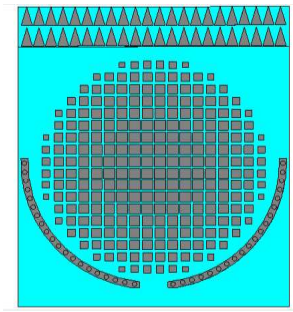
**جدول (۱): ابعاد ساختار انتقالی و به‌منظور دست‌یابی به مناسب‌ترین تطبیق امپدانسی و نسبت جلو به عقب به‌طور هم‌زمان**

| L(mm) | $s_1$(mm) |
|---|---|
| 4.83 | 0.53 |

شکل (۱۳) ساختار نهایی آنتن را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی‌ها و اندازه‌گیری در ادامه آورده شده است.




(ب) (الف)

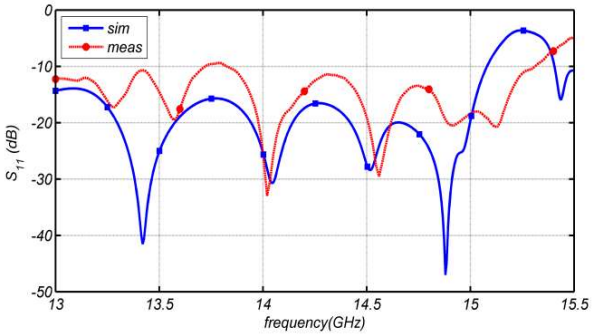


(ج)

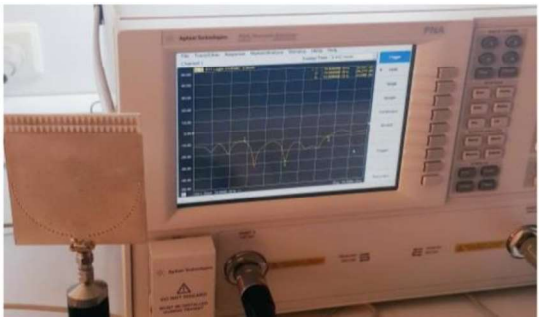
**شکل (۱۳): نمایش ساختار نهایی آنتن شیپوری SIW با استفاده دولایه دی‌الکتریک مختلف ؛ الف) نمای بالا ب) نمای پایین ج) نمای لایه میانی که لنز روی آن چاپ شده است.**

## ۴- نتایج اندازه‌گیری‌ها

نتایج مربوط به شبیه‌سازی و اندازه‌گیری های آنتنِ پیشنهادی در ادامه آورده شده است. شکل (۱۴) نمودار $s_{11}$ آنتن را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، آنتن از فرکانس‌های حدود 13 GHz تا 15.1 GHz تطبیق شده است و پهنای باند امپدانسی حدود 2 GHz است. شکل (۱۵) نمونه آنتن ساخته شده به همراه نتایج اندازه‌گیری ضریب بازگشتی را نشان می‌دهد.

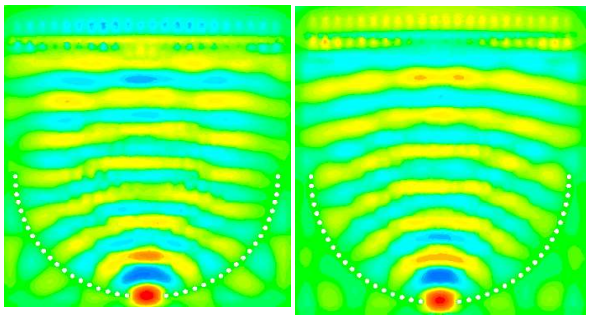



**شکل (۱۴): نمودار ضریب بازگشتی آنتن؛ پهنای باند امپدانسی آنتن حدود 2 GHz می‌باشد.**



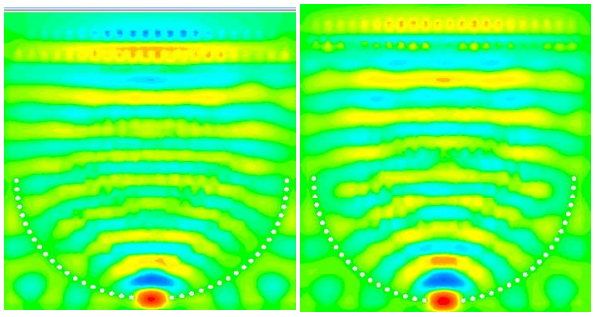
**شکل (۱۵): نمونه آنتن ساخته شده به همراه نتایج اندازه‌گیری ضریب بازگشتی**

شکل (۱۶) توزیع میدان‌های الکتریکی در صفحه‌ی z =1.5 mm را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد به طوری که صفحه زمین پایینی z = 0 درنظر گرفته شده است. همان‌طور که مشخص است جبهه‌ی موج پس از عبور از لنز کاملاً هم‌فاز شده است که منجر به افزایش بهره‌ی آنتن می‌شود.



(ب) (الف)

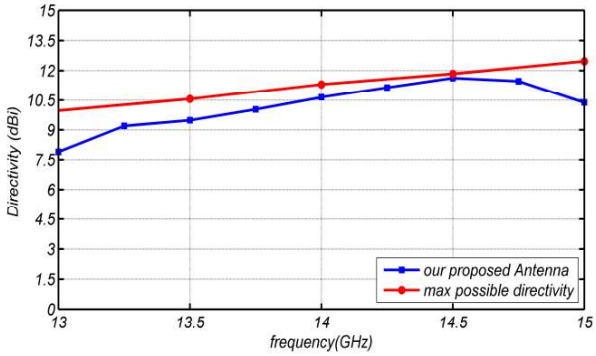
[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.9.9 ]



(د) (ج)

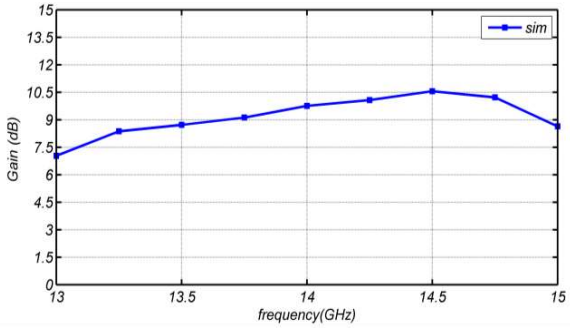
**شکل (۱۶) : توزیع میدان الکتریکی روی لنز در صفحه‌ی z=1.5 mm در فرکانس‌های الف) 13.5 GHz، ب) 14 GHz، ج) 14.5 GHz، د) 14.75 GHz**

حداکثر جهت‌دهی ممکن برای این آنتن با استفاده از شبیه‌سازی ساختار با استفاده از تحریک دهانه موجبری[۹] به‌دست می‌آید. درواقع به جای این که قبل از ساختار انتقالی از لنز برای هم‌فاز کردن موج استفاده کنیم از تحریک دهانه موجبری که معادل لنز ایده‌آل می‌باشد استفاده می‌کنیم. لازم به ذکر است که استفاده از این نوع تحریک، تنها در شبیه سازی ممکن است و در عمل باید به طرق مختلفی از جمله استفاده از لنز جبهه ی موج در دهانه ی تشعشع را هم‌فاز کرد. شکل(۱۷) نشان می‌دهد که جهت‌دهی آنتن در فرکانسی که لنز برای آن طراحی‌شده است به حداکثر جهت‌دهی ممکن، بسیار نزدیک می‌شود.

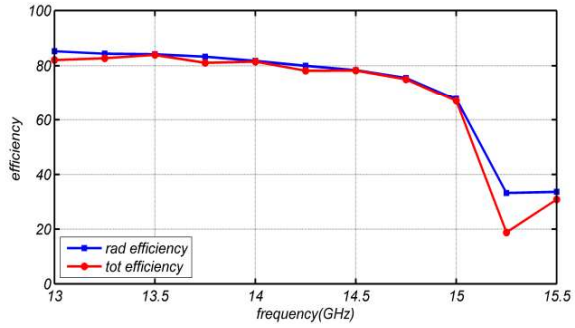



**شکل (۱۷): نمودار مقایسه‌ی جهت‌دهی آنتن طراحی‌شده و حداکثر جهت‌دهی قابل دستیابی در جهت θ=90 و ϕ=90 ؛ جهت‌دهی آنتن در فرکانسی که لنز در آن طراحی‌شده است به حداکثر مقدار خود می‌رسد.**

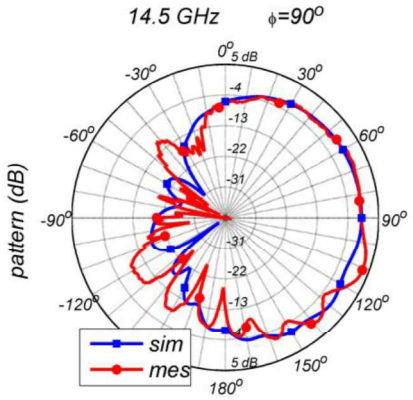
شکل (۱۸) نمودار بهره‌ی آنتن را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد. بهره‌ی آنتن در فرکانس 14.5 GHz حدود 10.5 dB است. نمودارهای بازدهی تشعشعی و بازده کل نیز در شکل (۱۹) نشان داده‌شده‌اند. نمودارهای بازده نشان می‌دهند که عملکرد آنتن از فرکانس 15 GHz به بعد به‌شدت کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در نمودارهای پاشندگی شکل (۴) جست‌وجو کرد. همان‌طور که در این نمودارها مشخص است، ساختار لنز برای فرکانس‌های بیش از 15 GHz و برای مد تحریک‌شده همانند یک باند قطع الکترومغناطیسی عمل می‌کند و اساساً موج نمی‌تواند از روی لنز عبور کند.




**شکل (۱۸): نمودار بهره‌ی محقق شده آنتن را در فرکانس‌های مختلف**




**شکل (۱۹) : نمودارهای بازده تشعشع و بازده کل آنتن؛ عملکرد آنتن از فرکانس 15 GHz به بعد به‌شدت کاهش می‌یابد**



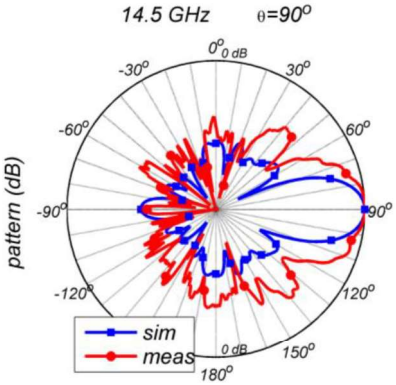

**شکل (۲۰) : الگوی تشعشعی آنتن در صفحه‌ی ϕ=90 در 14.5 GHz**

نمودارهای الگوی تشعشعی آنتن در فرکانس‌های مختلف در صفحه‌ی ϕ=90 در شکل (۲۰) نشان داده‌شده است.هم‌چنین نمودارهای الگوی تشعشعی آنتن در فرکانس‌های مختلف در صفحه‌ی θ=90 درشکل (۲۱) نشان داده‌شده است.

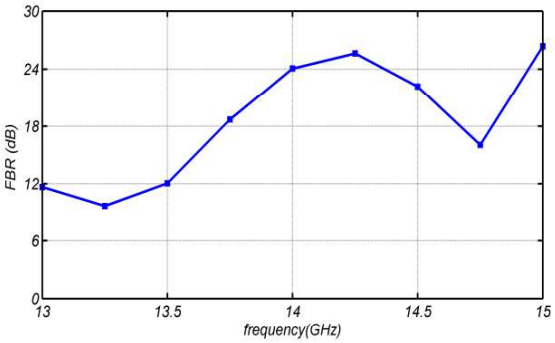



[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.9.9 ]




**شکل (۲۱) : الگوی تشعشع آنتن در صفحه‌ی θ=90 در فرکانس 14.5 GHz**




**شکل (۲۲) : نمودار FBR آنتن در فرکانس‌های مختلف؛ FBR آنتن در فرکانس‌های مختلف بیش از 10 dB است و در نزدیکی‌های فرکانس طراحی آنتن به بیشترین مقدار خود می‌رسد.**

سطح گلبرگ‌های کناری الگوی تشعشع در صفحه‌ی θ=90 و در فرکانس 14.5 GHz حدود 19.8 dB می‌باشد. با توجه به الگوهای تشعشعی آنتن می‌توان انتظار داشت که نسبت جلو به عقب آنتن بسیار مطلوب باشد. نمودار نسبت جلو به عقب آنتن در فرکانس‌های مختلف در شکل (۲۲) نشان داده‌شده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یکی آنتن شیپوری SIW با استفاده از لنز لونبرگ، در باند Ku و در فرکانس 14.5 GHz طراحی و شبیه‌سازی شده است. این آنتن از دولایه دی‌الکتریک مختلف تشکیل شده و صفحه‌ای می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که لنز لونبرگ در فرکانس طراحی، بهره‌ی آنتن را به حداکثر بهره‌ی قابل دست‌یابی از دهانه‌ی آنتن، بسیار نزدیک می‌کند.

## مراجع


[۱] صادقی کیا فاطمه، حجت کاشانی فرخ، راشد محصل جلیل. تحلیل آنتن پلاسمای ستونی با تحریک موج سطحی. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۲; ۱۰ (۱) :۷-۱۶

[۲] کمجانی نادر، رجبی مهدی. شبیه سازی آنتن Tapered Slot با استفاده از روش ماتریس خط انتقال سه بعدی. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۸۵; ۳ (۲) :۱۴-۲۳

[3] R. E. Collin and F. J. Zucker, Antenna Theory, Part 2. McGraw-Hill, 1969.

[4] A. Oliner and A. Hessel, "Guided waves on sinusoidally-modulated reactance surfaces," IRE Trans. Antennas Propag., vol. 7, no. 5, pp. 201–208, Dec. 1959.

[5] R. B. Hwang and S. T. Peng, "Guidance characteristics of two-dimensionally periodic impedance surface," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 47, no. 12, pp. 2503–2511, 1999.

[6] H. J. Bilow, "Guided waves on a planar tensor impedance surface," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 51, no. 10, pp. 2788–2792, Oct. 2003.

[7] B. H. Fong, J. S. Colburn, J. J. Ottusch, J. L. Visher, and D. F. Sievenpiper, "Scalar and Tensor Holographic Artificial Impedance Surfaces," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, no. 10, pp. 3212–3221, Oct. 2010.

[8] M. Bosiljevac, M. Casaletti, F. Caminita, Z. Sipus, and S. Maci, "Non-Uniform Metasurface Luneburg Lens Antenna Design," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 60, no. 9, pp. 4065–4073, Sep. 2012.

[9] Z. Li, X.-P. Chen, and K. Wu, "A Surface Mountable Pyramidal Horn Antenna and Transition to Substrate Integrated Waveguide," in 2007 International Symposium on Signals, Systems and Electronics, 2007, pp. 607–610.

[10] W. Che, B. Fu, P. Yao, Y. L. Chow, and E. K. N. Yung, "A compact substrate integrated waveguide H-plane horn antenna with dielectric arc lens," Int. J. RF Microw. Comput. Eng., vol. 17, no. 5, pp. 473–479, Sep. 2007.

[11] H. Wang, D.-G. Fang, B. Zhang, and W.-Q. Che, "Dielectric Loaded Substrate Integrated Waveguide (SIW) H-Plane Horn Antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, no. 3, pp. 640–647, Mar. 2010.

[12] R. Suga, H. Nakano, Y. Hirachi, J. Hirokawa, and M. Ando, "Cost-Effective 60-GHz Antenna Package With End-Fire Radiation for Wireless File-Transfer System," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 58, no. 12, pp. 3989–3995, Dec. 2010.

[13] M. Yousefbeiki, A. A. Domenech, J. R. Mosig, and C. A. Fernandes, "Ku-band dielectric-loaded SIW horn for vertically-polarized multi-sector antennas," in 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2012, pp. 2367–2371.

[14] M. Esquius-Morote, B. Fuchs, J.-F. Zurcher, and J. R. Mosig, "Novel Thin and Compact H-Plane SIW Horn Antenna," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 61, no. 6, pp. 2911–2920, Jun. 2013.

[15] S. Maci, M. Caiazzo, A. Cucini, and M. Casaletti, "A pole-zero matching method for EBG surfaces composed of a dipole FSS printed on a grounded dielectric slab," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 53, no. 1, pp. 70–81, Jan. 2005.

[16] A. M. Patel and A. Grbic, "A Printed Leaky-Wave Antenna Based on a Sinusoidally-Modulated Reactance Surface," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 59, no. 6, pp. 2087–2096, Jun. 2011.

[17] A. M. Patel and A. Grbic, "Effective Surface Impedance of a Printed-Circuit Tensor Impedance Surface (PCTIS)," IEEE Trans. Microw. Theory Tech.,


[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.9.9 ]

vol. 61, no. 4, pp. 1403–1413, Apr. 2013.
[18] M. Esquius-Morote, B. Fuchs, J.-F. Zurcher, and J. R. Mosig, "A Printed Transition for Matching Improvement of SIW Horn Antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 61, no. 4, pp. 1923–1930, Apr. 2013.

## زیرنویس‌ها

[1] substrate integrated waveguide
[2] Luneburg Lens
[3] Meta surface
[4] Planar Antenna
[5] Anisotropic
[6] Front to back ratio
[7] End Fire
[8] Morote
[9] Waveguide port

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-16 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.9.9 ]