

آنتن موج نشتی ایجاد شده روی موجبر مجتمع شده در زیرلایه CRLH با استفاده از شکاف‌های دایره‌ای

سیدسازان حقیقی^{*}، عباسعلی حیدری، مسعود موحدی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*رایانامه نویسنده مسئول: sasanhighi@stu.yazd.ac.ir

۱- مقدمه

در موجبر مجتمع شده در زیرلایه^۱ (SIW) مشخصات انتشار (مشخصات پراکندگی و الگوی میدان) شبیه به موجبر مستطیلی معمولی است. این موجبرها اغلب مزایای موجبرهای فلزی متعارف مانند ضریب کیفیت، قابلیت حمل توان بالا و ایزولاسیون بسیار خوب را حفظ می‌کنند. پراهمیت‌ترین مزیت فناوری SIW امکان تجمع همه‌ی اجزاء سیستم شامل ساختارهای غیرفعال، عناصر فعال و حتی آنتن‌ها بر روی یک زیرلایه می‌باشد [۱]. همانند موجبرهای مرسوم فلزی، می‌توان از SIW نیز برای ساخت انواع آنتن‌ها و بویژه آنتن موج نشتی^۲ (LWA) استفاده نمود. در مرجع [۲] با ایجاد یک شکاف بلند طولی در دیواره‌ی بالایی SIW، یک آنتن موج نشتی با سطح گلبزرگ جانبی پایین‌تر از -27dB در باند فرکانسی 33

چکیده: در این مقاله یک آنتن موج نشتی با استفاده از موجبر مجتمع شده در زیرلایه (SIW) بر پایه خط انتقال چپگرد-راستگرد ترکیبی (CRLH-TL) طراحی و شبیه‌سازی شده است. این آنتن با ایجاد شکاف‌های دایروی در صفحه‌ی بالایی SIW طراحی شده است. استفاده از این نوع شکاف‌ها، پهنای باند آنتن را به طور محسوسی افزایش داده است به گونه‌ای که آنتن پیشنهادی دارای پهنای باند 18 تا 32GHz می‌باشد. از مزایای دیگر این ساختار، داشتن بهره، سمت‌گرایی و بازدهی تشعشعی بالا می‌باشد به نحوی که در فرکانس 29GHz بهره‌ی آنتن به 23.5dB می‌رسد. زاویه‌ی پویش (اسکن) پرتوی آنتن از -80° تا $+16^{\circ}$ است. باند توقف بین باندهای راستگرد و چپگرد در حدود 0.2GHz می‌باشد. این آنتن با نرم‌افزار CST Microwave Studio تحلیل و شبیه‌سازی شده است.

کلیدواژه: آنتن موج نشتی، موجبر مجتمع شده در زیرلایه، خط انتقال چپگرد-راستگرد ترکیبی

¹Substrate Integrated Waveguide

²Leaky Wave Antenna

آنتن موج نشتی CRLH طراحی شده است [۸]. در مرجع [۹] با شکاف‌های عرضی مستطیلی و وایه‌هایی در مرکز SIW یک آنتن موج نشتی CRLH تحقق یافته است که دارای دو باند، یک باند CRLH و یک باند راستگرد^۶ (RH) جدید پایین‌تر از باند چپگرد^۷ (LH) می‌باشد. با شکاف‌های پارازیتی عرضی و وایه‌هایی در انتهای هر سلول CRLH یک آنتن موج نشتی جدید طراحی شده که دو باند CRLH دارد [۱۰]. پرتوی آنتن‌های موج نشتی CRLH، از پشت‌تاب^۸ تا جلوتاب با افزایش فرکانس حرکت می‌کند که از مزایای آن نسبت به آنتن‌های موج نشتی راستگرد (اسکن از پهلو تا جلوتاب) به شمار می‌رود [۶-۱۰].

در این مقاله یک آنتن موج نشتی با ساختار جدید پیشنهاد شده است. شکاف‌های تشعشع کننده در این آنتن، دایره‌ای انتخاب شده است که بر اساس شبیه سازی‌های انجام شده پهنای باند آنتن به طور محسوسی افزایش یافته است. شرح مختصری از مبانی تئوری خطوط انتقال چپگرد-راستگرد ترکیبی و آنتن‌های موج نشتی و نیز ساختار آنتن پیشنهادی و نتایج حاصل از شبیه سازی آن در بخش‌های بعدی ارائه خواهد شد.

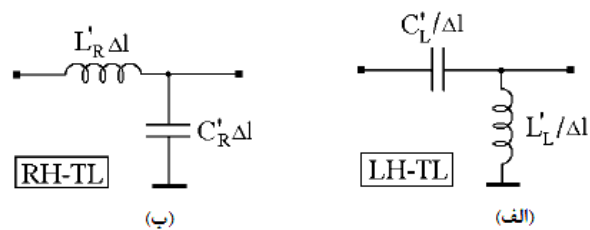
تا 37.5GHz طراحی شده است. نوعی دیگر از این آنتن‌های موج نشتی با شکاف‌های عرضی متناوب بر صفحه‌ی بالایی SIW ایجاد می‌شود. از مزایای این طراحی جابجایی پهنای باند به فرکانس‌های پایین‌تر و پلاریزاسیون خطی خالص است که در این مورد خاص پهنای باند به فرکانس 10 تا 12GHz منتقل شده است [۳]. برای رسیدن به پلاریزاسیون دایروی از شکاف‌های متناوب H شکل استفاده شده است [۴]. با حفره‌ها و شکاف‌های ستونی به جای وایه‌های^۱ فلزی SIW با دوره تناوب زیاد، آنتن موج نشتی در باند موج میلی‌متری طراحی شده است [۵]. در آنتن‌های طراحی شده در مرجع‌های [۵-۶]، با تغییر فرکانس زاویه‌ی پرتوی آنتن از پهلو تا جلوتاب^۲ تا جلوتاب^۳ را پویس می‌کند. در مرجع [۶] با ایجاد شکاف‌های پارازیتی عرضی متناوب، آنتن موج نشتی بر پایه‌ی خط انتقال چپگرد-راستگرد ترکیبی^۴ (CRLH-TL) با پلاریزاسیون خطی طراحی شده است. با نصف کردن عرض این آنتن نمونه‌ی نیم‌مد آن به دست می‌آید. اگر این شکاف‌های پارازیتی نسبت به محور مرکزی SIW، 45° چرخانده شوند یک آنتن موج نشتی CRLH با دو پلاریزاسیون قابل انعطاف خطی و دایروی به دست می‌آید [۷]. در دو مقاله قبلی CRLH-TL بدون وایا در داخل SIW، با یک باند CRLH تحقق یافته‌است [۷و۶]. برای بهبود پهنای باند محور اصلی تشعشع^۵ از ترکیب شکاف‌های عرضی، مورب و پیچ‌های فلزی به اندازه‌ی شکاف‌ها در داخل زیرلایه و زیر شکاف‌ها، یک

^۱Vias^۲Broadside^۳End-fire^۴Composite Right/Left Handed Transmission Line^۵Bore-sight Radiation Bandwidth^۶ Right Handed^۷Left Handed^۸ Back-fire

۲- مبانی تئوری

ا- خط چپگرد-راستگرد ترکیبی

در شکل (۱) مدار معادل خطوط انتقال راستگرد و چپگرد نشان داده شده است. در مدارهای معادل C'_R و L'_L ، C'_L و L'_R به ترتیب خازن و سلف در یک سلول LH-TL و RH-TL می‌باشند. Δl طول یک سلول در نظر گرفته شده که از طول موج خط انتقال خیلی کوچک‌تر است.



شکل ۱ مدار معادل الف) LH-TL ب) RH-TL [۱۱].

از روابط (۱) و (۲) به ترتیب ثابت فاز خط انتقال راستگرد و چپگرد به دست می‌آید.

$$\beta_{RH-TL} = \omega \sqrt{L'_R C'_R} > 0 \quad (1)$$

$$\beta_{LH-TL} = -\frac{1}{\omega \sqrt{L'_L C'_L}} < 0 \quad (2)$$

در این روابط ω فرکانس زاویه‌ای است. با توجه به روابط (۱) و (۲) ثابت فاز در LH-TL مقدار منفی و در RH-TL مقداری مثبت دارد. از روابط (۳) و (۴) به ترتیب سرعت فاز و سرعت گروه به دست می‌آید.

$$V_P = \frac{\omega}{\beta} \quad (3)$$

$$V_g = \frac{1}{d\beta/d\omega} \quad (4)$$

بر طبق رابطه‌ی (۳) و (۴) سرعت فاز در LH-TL منفی و در RH-TL مثبت و سرعت گروه در هر دو خط انتقال چپگرد و راستگرد مثبت است. انرژی در هر دو خط انتقال چپگرد و راستگرد انتقال می‌یابد. به سبب منفی بودن سرعت فاز در خط چپگرد، انتقال انرژی (برعکس انتقال انرژی در خط راستگرد) از سمت بار به سمت مولد (در آنتن موج نشستی از پورت خروجی به پورت ورودی) انتشار می‌یابد.

ضریب گذردهی الکتریکی (ϵ) و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (μ) معادل در خط چپگرد، منفی و در خط راستگرد مثبت می‌باشند. محیطی که دارای ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی باشد فراماده^۱ نامیده می‌شود.

از ترکیب خط انتقال چپگرد و راستگرد، خط انتقال چپگرد-راستگرد ترکیبی تشکیل می‌گردد که مدار معادل آن در شکل (۲) نمایش داده شده است. ثابت فاز CRLH-TL از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$\beta_{CRLH-TL} = \begin{cases} +\sqrt{(\omega L'_R - \frac{1}{\omega C'_L})(\omega C'_R - \frac{1}{\omega L'_L})} > 0; \omega > \omega_{\Gamma 2} \\ -\sqrt{(\omega L'_R - \frac{1}{\omega C'_L})(\omega C'_R - \frac{1}{\omega L'_L})} < 0; \omega < \omega_{\Gamma 1} \end{cases} \quad (5)$$

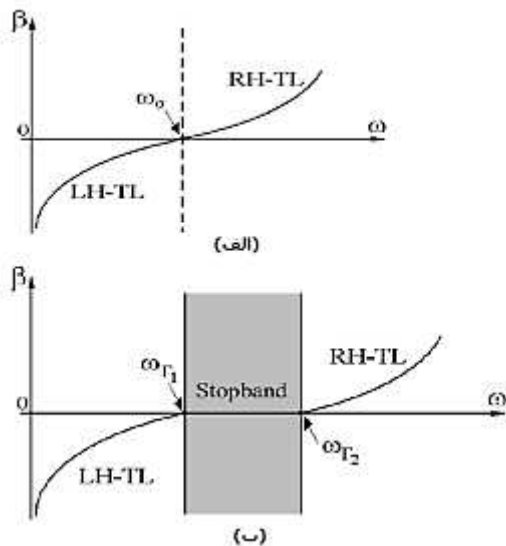
که $\omega_{\Gamma 1}$ و $\omega_{\Gamma 2}$ از رابطه (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند.

$$\omega_{\Gamma 1} = \min\left(\frac{1}{\sqrt{L'_R C'_L}}; \frac{1}{\sqrt{L'_L C'_R}}\right) \quad (6)$$

$$\omega_{\Gamma 2} = \max\left(\frac{1}{\sqrt{L'_R C'_L}}; \frac{1}{\sqrt{L'_L C'_R}}\right) \quad (7)$$

^۱Metamaterial

CRLH را تشکیل می‌دهند. شکل (۳ الف) و (۳ ب) به ترتیب تغییرات β را برای مدار متوازن و نامتوازن CRLH بر حسب فرکانس نمایش می‌دهند و ω_0 فرکانسی است که در آن $\beta = 0$ می‌شود [۱۱ و ۱۲].

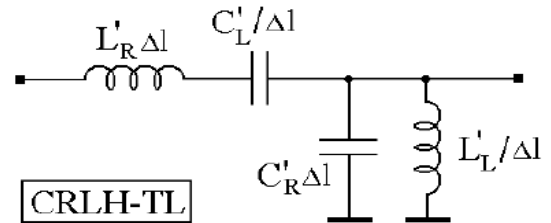


شکل ۳ تغییرات ثابت فاز بر حسب فرکانس در الف) CRLH متوازن، ب) CRLH نامتوازن [۱۱].

ب- آنتن موج نشستی

آنتن‌های موج نشستی ساختارهای دو پورته هستند که موج در راستای حرکت در داخل ساختار از پورت ورودی به پورت خروجی، به بیرون نشت می‌کند و الگوی پرتوی آنتن را شکل می‌دهد. از مزایای این آنتن‌ها، تغذیه‌ی ساده، پهنای باند باریک و پوشش فضا با تغییرات فرکانس است. موجبر مجتمع شده در زیرلایه با شکاف‌های عرضی روی دیواره‌ی بالای آن نوعی آنتن موج نشستی است که با قطع مسیر جریان بوسیله شکاف‌ها، موج به بیرون نشت می‌کند. زاویه پوشش در آنتن‌های موج نشستی از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

وقتی $\omega \in (\omega_{\Gamma 1}, \omega_{\Gamma 2})$ ثابت فاز موهومی می‌شود و سیگنال در CRLH-TL تضعیف می‌شود. این بازه‌ی فرکانسی، باند توقف نامیده شده است. اگر $\omega_{\Gamma 1} = \omega_{\Gamma 2}$ باشد باند توقف بین باندهای چپگرد و راستگرد از بین می‌رود و مدار متوازن^۱ و پهنای باند CRLH پیوسته می‌شود در غیر این صورت مدار نامتوازن^۲ است.



شکل ۴ مدار معادل CRLH-TL [۱۱].

از رابطه (۵) رابطه (۸) تحقق می‌یابد.

$$\beta_{CRLH-TL} = \beta_{RH-TL} + \beta_{LH-TL} \quad (۸)$$

برای رسیدن به CRLH-TL متوازن باید رابطه (۹) برقرار باشد.

$$L'_R C'_L = L'_L C'_R \quad (۹)$$

ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی معادل یک CRLH-TL بر اساس فرکانس در دسته‌بندی رابطه‌ی (۱۰) نمایش داده شده است.

$$\begin{cases} \varepsilon < 0, \mu < 0; \omega < \omega_{\Gamma 1} \\ \varepsilon > 0, \mu > 0; \omega > \omega_{\Gamma 2} \\ \varepsilon < 0, \mu > 0; \omega_{\Gamma 1} < \omega < \omega_{\Gamma 2}, \sqrt{L'_L C'_R} < \sqrt{L'_R C'_L} \\ \varepsilon > 0, \mu < 0; \omega_{\Gamma 1} < \omega < \omega_{\Gamma 2}, \sqrt{L'_L C'_R} > \sqrt{L'_R C'_L} \end{cases} \quad (۱۰)$$

فرکانس‌های بزرگتر از $\omega_{\Gamma 2}$ باند راستگرد و فرکانس‌های کوچکتر از $\omega_{\Gamma 1}$ باند چپگرد خط انتقال

^۱Balanced
^۲Unbalanced

این زیرلایه ۲/۳۳ و تاثرانت تلفات آن ۰/۰۰۱۲ می‌باشد. در این آنتن از شکاف‌های حلقه‌ای به‌جای شکاف‌های مستطیلی یا پارازیتی استفاده شده است. از مزایای شکاف حلقه‌ای، رسیدن به پهنای باند، بهره و سمت‌گرایی^۲ بیشتر در مقایسه با ساختارهای قبلی می‌باشد.

در شکل (۴) نمای کلی آنتن پیشنهادی و در شکل (۵) پارامترهای فیزیکی این ساختار نمایش داده شده است. بدیهی است مقدار این پارامترها در نحوه عملکرد آنتن و مشخصات آن تأثیرگذار بوده و باید مقدار آن‌ها به طور مناسب انتخاب شوند.

برای تغذیه‌ی آنتن از خط ریزنواری^۳ مخروطی شکل استفاده شده است که خط ۵۰ اهم را به SIW تطبیق و تمام پهنای باند آنتن را پوشش می‌دهد. شکاف‌های حلقه‌ای چون دارای انحنای نرم و بدون گوشه‌های تیز می‌باشند نسبت به شکاف‌های مستطیلی و پارازیتی تلفات بازگشتی کمتری در ورودی (S11) دارند. بعلاوه به علت طول قطع بیشتر این شکاف‌ها در صفحه‌ی بالای SIW، به خاطر انحنای، نسبت به شکاف مستطیلی، موج بیشتری به بیرون نشت می‌کند و در نتیجه S21 نیز بیشتر کاهش می‌یابد. پس در نهایت شکاف‌های حلقه‌ای پهنای باند و بازدهی آنتن را بهبود می‌بخشند. این شکاف‌ها که در سرتاسر عرض SIW هستند، خازن سری مدار معادل یک سلول CRLH-TL را محقق می‌کنند. ازدو ردیف وایهای

$$\theta = \arcsin(\beta(\omega)/k_0) \quad (11)$$

که زاویه‌ی پرتوی اصلی آنتن و k_0 عدد موج فضای آزاد است [۱۳]. طبق رابطه (۱۱) پرتوی آنتن در باند چپگرد از پشت‌تاب تا پهلوتاب ($-90 \leq \theta < 0$) و در باند راستگرد از پهلوتاب تا جلوتاب ($0 < \theta \leq 90$) را اسکن می‌کند. در $\beta = 0$ پرتوی آنتن در جهت پهلوتاب ($\theta = 0$) است. در هر دو حالت باند چپگرد و راستگرد باید $|\beta| \leq k_0$ باشد تا موج به بیرون نشت کند و ساختار به آنتن تبدیل شود. البته این رابطه در تئوری صادق است. در حالت عملی وقتی پرتوی آنتن نزدیک پشت‌تاب یا جلوتاب می‌شود به علت افزایش اندازه‌ی β تحریک مد موج سطحی^۱ بیشتر از تحریک مد موج نشتی می‌شود که با این حال موج کمتری به بیرون نشت می‌کند. یکی از چالش‌های طراحی آنتن‌های موج نشتی نزدیک شدن بیشتر پرتوی آنتن به جلوتاب یا پشت‌تاب است [۶]. یکی از پارامترهای مهم در آنتن‌های موج نشتی بازدهی تشعشعی آنتن است که در تئوری از رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$e_r = \frac{\alpha_l}{\alpha_l + \alpha_c + \alpha_d} \quad (12)$$

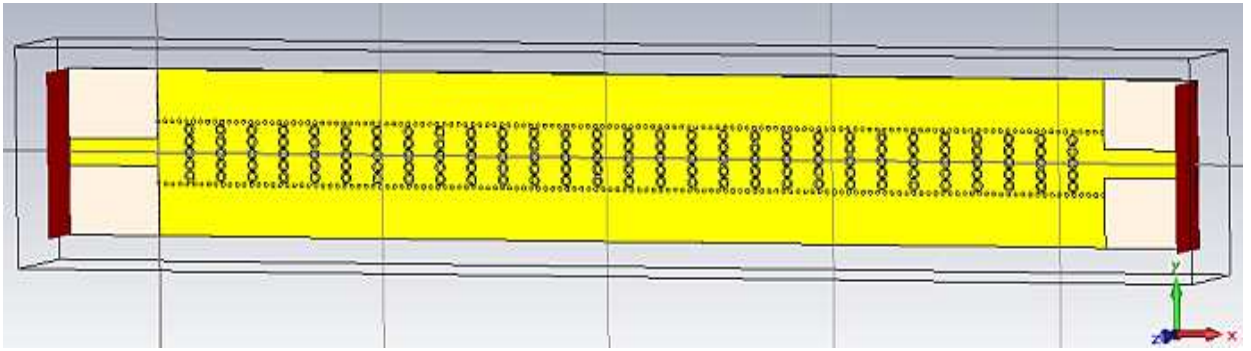
که α_l تلفات نشتی، α_c تلفات هادی و α_d تلفات دی‌الکتریک می‌باشد [۳].

۳- آنتن موج نشتی پیشنهادی

آنتن پیشنهادی از دو زیرلایه RT/duroid5870 با ضخامت 0.787mm تشکیل شده است که ارتفاع کلی آنتن به 1.574mm می‌رسد. ضریب گذردهی نسبی

²Directivity
³Microstrip

¹Surfacewave



شکل ۴ نمای کلی آنتن پیشنهادی.

ردیف دوم وایهای نیمه برای به حداقل رساندن باند توقف CRLH به کار برده شده است. برای رسیدن به جواب بهینه، دوره تناوب وایهای نیمه برابر نصف دوره تناوب شکافها در نظر گرفته می شود. این آنتن موج نشتی از ۳۰ سلول CRLH تشکیل شده است که طول SIW به 210mm می رسد. عرض SIW برابر با 11.25mm است. ابعاد کلی آنتن $230 \times 30 \times 1.574 \text{ mm}^3$ می باشد.

نیمه برای تحقق سلف موازی در مدار معادل سلول CRLH-TL استفاده می شود که S21 را نیز به طور قابل ملاحظه ای کاهش می دهند. ردیف اول از وایهای نیمه در محور مرکزی SIW و ردیف دوم به فاصله 1.3mm از ردیف اول قرار گرفته اند. ردیف اول وایهای نیمه از صفحه ی بالایی SIW تا وسط زیرلایه و ردیف دوم از صفحه ی زمین تا وسط زیرلایه قرار می گیرند.

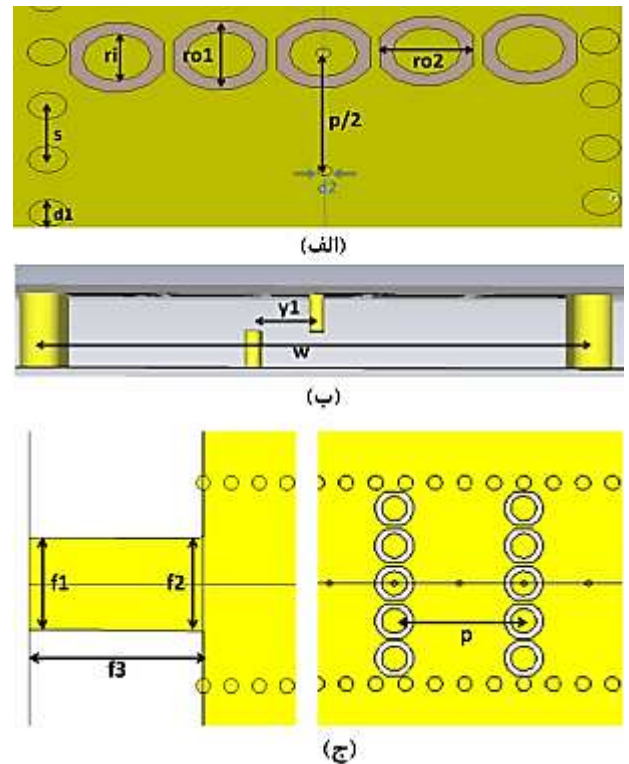
۴- نتایج طراحی و شبیه سازی

شبیه سازی و بهینه سازی آنتن پیشنهادی در حوزه زمان و به کمک نرم افزار CST Microwave Studio انجام شده است.

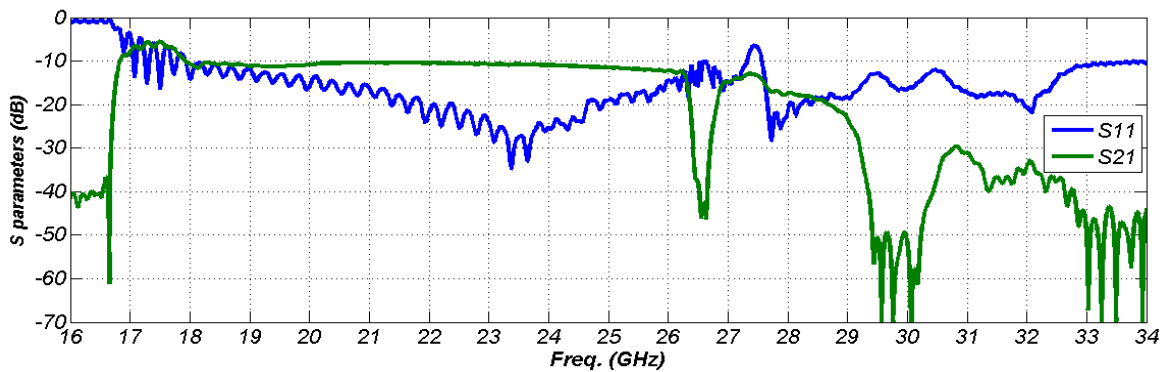
مقدار پارمترهای نهایی آنتن که منجر به عملکرد مناسب آنتن می شود عبارتند از (این پارامترها در شکل (۵) نشان داده شده اند):

$f_1=5$, $f_2=6$, $f_3=10$, $p=7$, $y_1=1.3$, $W=11.25$, $d_1=0.8$, $d_2=0.3$, $s=1.6$, $r_i=1.4$, $r_{o1}=2.1$, $r_{o2}=1.9$ که تمامی ابعاد بر حسب میلی متر هستند.

در شکل (۶) پارامترهای پراکندگی آنتن نشان داده شده است. از فرکانس 18 تا 27.3GHz باند چپگرد می باشد. در این بازه ی فرکانسی $\beta < 0$ و زاویه پویش آنتن از 80° تا 1° است. از 27.5 تا 32GHz باند

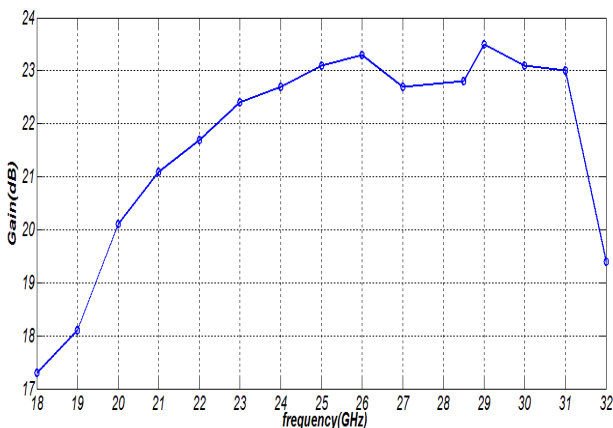


شکل ۵ الف) نمای بزرگنمایی شده آنتن از بالا (ب) نمای سمت چپ آنتن (نمای ورودی آنتن از دید افقی) (ج) نمای ورودی آنتن از دید عمودی.



شکل ۶ پارامترهای پراکندگی آنتن طراحی شده.

بهره آنتن‌های پیشنهادی در مقالات دیگر که بیشترین مقدار آن در مرجع [۸] نزدیک به 15dB گزارش شده است. نمودار خط‌چین قرمز رنگ در شکل (۸) بازدهی تشعشعی و خط سیاه نمودار بازدهی کل آنتن پیشنهادی را نشان می‌دهد که نمایانگر بازدهی بالای این آنتن است.



شکل ۷ نمودار بهره‌ی آنتن در پهنای باند فرکانسی.

همچنان که قبلاً ذکر شد، افزایش پهنای باند و بهره آنتن نسبت به آنتن‌های گزارش شده در مقالات قبلی، به دلیل استفاده از شکاف‌های دایره‌ای و نیز استفاده مناسب از وایاها می‌باشد.

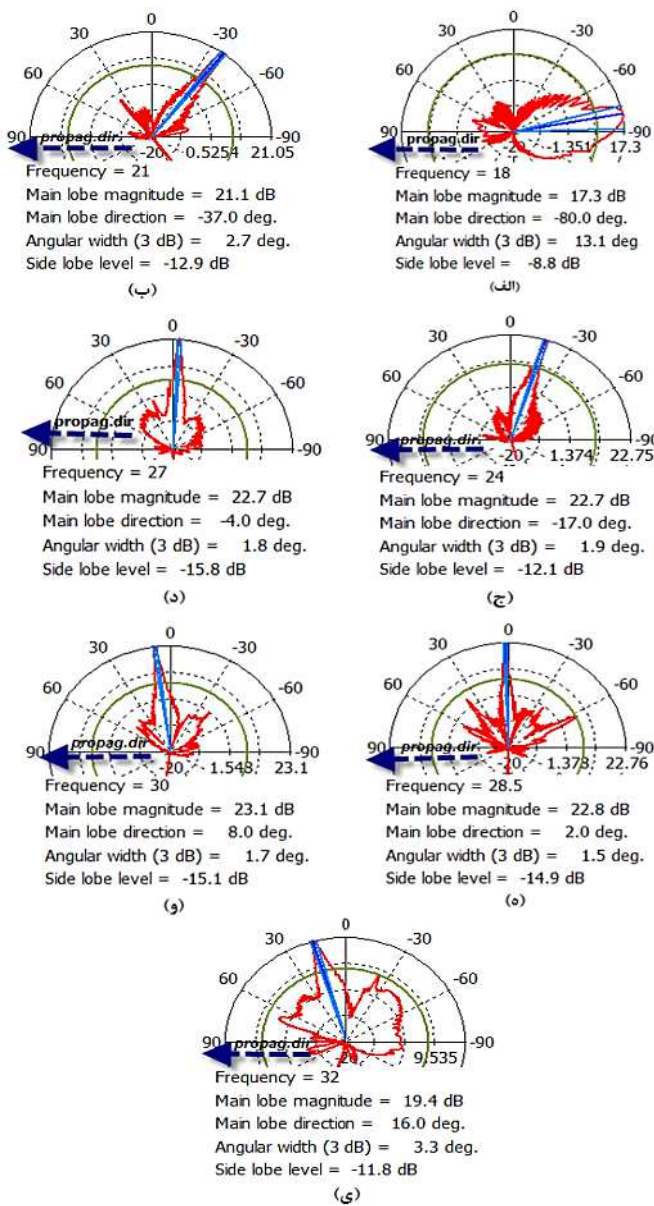
در شکل (۹) الگوی تشعشعی آنتن در برخی فرکانس‌ها نمایش داده شده است. در این شکل پیکان

راستگرد آنتن ($\beta > 0$) و زاویه پویش آنتن از 1° تا 16° می‌باشد. در مقایسه با نتایج مقالات قبلی، پرتوی این آنتن به پشت‌تاب نزدیک‌تر شده است. بیشترین پهنای باند به دست آمده در طراحی‌های قبلی برای آنتن‌های موج نشستی CRLH نزدیک به 6.5GHz و مربوط به مرجع [۹] می‌باشد. در این جا پهنای باند در حدود 14GHz شده که نسبت به طراحی‌های قبلی بسیار وسیع‌تر است.

مطابق شکل (۵) شعاع خارجی حلقه‌ها 1.05mm و شعاع داخلی آن‌ها 0.7mm است. فاصله‌ی 0.2mm بین شکاف‌ها در راستای عرضی SIW سبب کاهش بیشتر تلفات بازگشتی در ورودی می‌گردد چون شار جریان در عرض SIW به طور کامل قطع نمی‌شود. با کاهش طول دوره تناوب، پهنای باند افزایش و به فرکانس‌های بالاتر شیفت داده می‌شود.

شکل (۷) بهره آنتن را در فرکانس‌های مختلف برای آنتن پیشنهادی نشان می‌دهد. همان طور که از شکل (۷) مشخص است بهره‌ی آنتن در فرکانس 29GHz به 23.5dB رسیده است که در آنتن‌های موج نشستی این بهره قابل توجه می‌باشد، بویژه در مقایسه با

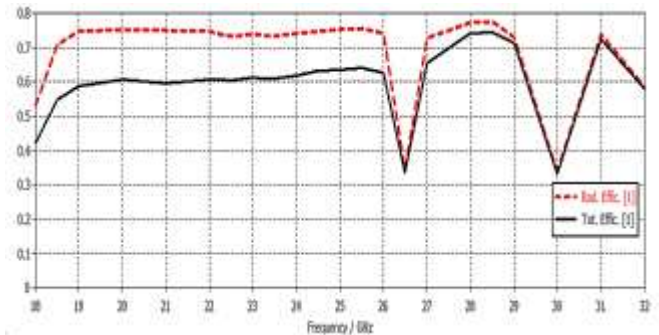
پهنای پرتو بسیار باریک و مناسب برای اسکن فرکانسی است. زاویه پویش در باند چپگرد از نزدیک



شکل ۹ الگوی تشعشی آنتن طراحی شده در فرکانس‌های الف) 18GHz (ب) 21GHz (ج) 24GHz (د) 27GHz (ه) 28.5GHz (و) 30GHz (ی) 32GHz

پشت تاب تا نزدیکی پهلوتاب (80° تا 1°) می‌باشد که نسبت به آنتن‌های مقالات قبلی، زاویه اسکن در باند چپگرد بیشتر شده است. پهنای باند زیاد در حدود 14GHz از مزایای آنتن طراحی شده در این مقاله است. در این جا علاوه بر سمت‌گرایی بالای آنتن،

آبی رنگ جهت انتشار موج از داخل SIW از ورودی به خروجی را نشان می‌دهد. در فرکانس 18GHz پرتوی



شکل ۸ نمودار بازدهی تشعشی و بازدهی کل آنتن.

آنتن در نزدیکی پشت تاب و در زاویه 80° است. با افزایش فرکانس به طور پیوسته پرتوی آنتن به سمت پهلوتاب حرکت می‌کند تا در فرکانس 27.3GHz به زاویه 1° می‌رسد. از فرکانس 27.3 تا 27.5GHz (باند توقف CRLH) آنتن تشعشی ندارد. پرتوی آنتن در بازه‌ی فرکانسی 27.5 تا 32GHz در باند راستگرد بوده و با افزایش فرکانس از زاویه‌ی 1° تا 16° را پویش می‌کند. در فرکانس‌های بالاتر از 32GHz شکل الگوی تشعشی آنتن خراب می‌شود. در شکل (۹) پهنای پرتوی نیم توان آنتن نیز نشان داده شده که پهنای پرتو در فرکانس 28.5GHz به $1/5^{\circ}$ نیز می‌رسد. پهنای پرتوی آنتن بسیار باریک بوده که این مشخصه برای پویش فرکانسی بسیار مناسب است. در این شکل همچنین اطلاعاتی از سطح گلبزرگ کناری و جهت پرتوی اصلی آنتن نیز نمایش داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، آنتن موج نشی SIW برپایه خط انتقال CRLH با پهنای باند وسیع و بهره‌ی بالا ارائه شد. باند توقف بین باندهای چپگرد و راستگرد کم می‌باشد.

- [7] L. S. Polarization-flexible, "Substrate Integrated Composite Right-/Left-Handed," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 2, pp. 760–771, 2012.
- [8] N. Nasimuddin, Z. Chen, and X. Qing, "Substrate Integrated Metamaterial-based Leaky-Wave Antenna with Improved Boresight Radiation Bandwidth," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 7, pp. 3451–3457, 2013.
- [9] C. Jin and A. Alphones, "Leaky-wave radiation behavior from a double periodic composite right/left-handed substrate integrated waveguide," *Antennas Propagation, IEEE Trans.*, vol. 60, no. 4, pp. 1727–1735, 2012.
- [10] J. Machac, M. Polivka, and K. Zemlyakov, "A Dual Band Leaky Wave Antenna on a CRLH Substrate Integrated Waveguide," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 7, pp. 3876–3879, Jul. 2013.
- [11] S. Simion and R. Marcelli, "Composite Right/Left Handed (CRLH) based devices for microwave applications," in *Advanced Microwave and Millimeter Wave Technologies Semiconductor Devices Circuits and Systems*, 2010, pp. 89–112.
- [12] T. I. Anthony Lai, Christophe Caloz, "Composite Right/Left-handed Transmission Line Metamaterials," *IEEE microwave magazine*, pp. 34–50, 2004.
- [13] A. Oliner and D. R. Jackson, "Leaky-Wave Antennas," Ch. 11 in *Antenna Engineering Handbook*, 4th Ed., J. L. Volakis (Ed.), McGraw-Hill, New York, 2007.

سطح گلبرگ جانبی هم در حد پایین نگه داشته شده است.

مرجع‌ها

- [1] M. Bozzi, a. Georgiadis, and K. Wu, "Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas," *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 5, no. 8, p. 909, 2011.
- [2] Y. J. Cheng, W. Hong, S. Member, K. Wu, and Y. Fan, "Millimeter-Wave Substrate Integrated Waveguide Long Slot Leaky-Wave Antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 1, pp. 40–47, 2011.
- [3] J. Liu, D. Jackson, and Y. Long, "Substrate integrated waveguide (SIW) leaky-wave antenna with transverse slots," *Antennas Propagation, IEEE Trans.*, vol. 60, no. 1, pp. 20–29, 2012.
- [4] J. Liu, X. Tang, Y. Li, and Y. Long, "Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna With H-Shaped Slots," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 8, pp. 3962–3967, Aug. 2012.
- [5] F. Xu, K. Wu, and X. Zhang, "Periodic leaky-wave antenna for millimeter wave applications based on substrate integrated waveguide," *Antennas Propagation, IEEE Trans.*, vol. 58, no. 2, pp. 340–347, 2010.
- [6] Y. Dong and T. Itoh, "Composite right/left-handed substrate integrated waveguide and half-mode substrate integrated waveguide," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 3, pp. 767–775, 2009.