

# ساخت و بهینه سازی آنتن CRLH-TL در کنترل سامانه های پرواز و هشدار هوایی

گوهر ورامینی\*، بهنام درستکار یاقوتی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران

۲- استادیار، گروه فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه علوم انتظامی امین، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۴)

## چکیده

آنتن های فراپهن باند بدلیل توانایی پوشش چندین باند فرکانسی در سیستم های مخابرات هوایی و کنترل ناوبری نقش اساسی را بر عهده دارند. در این مقاله یک آنتن CRLH-TL به منظور ارتقا و بهبود پهنای باند ارائه شده است. آنتن طراحی شده بصورت فراپهن باند قابلیت پوشش باند های فرکانسی مختلف با ابعاد کوچک، الگوی تشعشی همه جهته و بهره مناسب را دارا می باشد. در این مقاله ساختار آنتن مطلوب با فرامواد مغناطیسی مورد بررسی و در نهایت دو روش ترکیبی به منظور بهبود عملکرد کنترلی آنتن مطرح شده است. در روش اول یک مدل بر پایه مدار با ساختار ترکیبی CRLH به منظور کوچک سازی و تطبیق پذیری موثر ارائه که با استفاده از زمین ناقص via و سطوح انتخاب گر فرکانسی FSS آنتنی با بهره و پهنای باندی مطلوب طراحی شده است. در آنتن پیشنهادی کوچک سازی از طریق خط انتقال متامتریال و تغذیه به واسطه کوپلاژ الکترومغناطیسی و عنصر CRLH تامین میشود. بخش دست راستی از پیچ فلزی مس ۳۵ میکرون به همراه فرکتال و سمت چپ از خط انتقال موثر همگن، خازن های سری و سلف موازی تشکیل شده است. بستر آنتن FR-4، امپدانس مشخصه ۵۰ اهم و محدوده فرکانسی ۲ تا ۷ گیگا هرتز است و در بهبود عملکرد و کنترل فرکانس رادیویی، رادار و پهپادهای نظامی بسیار کاربردی میباشد. نرم افزارهای مورد استفاده ADS(2022.1.2), HFSS(15.3) و MATLAB و رفع اختلال در طراحی سیستم با پلاریزاسیون متقارن و بهبود کیفیت پهنای باند از طریق زمین شکاف دار صورت گرفته است. آنتن پیشنهادی، یک ساختار فشرده است که بهبود فرکانس تشدید، افزایش بهره، پهنای باند و تطبیق امپدانس و در نهایت یک سیستم کنترلی پرواز بهبود یافته را ایجاد می کند.

واژه های کلیدی: زمین ناقص، خط انتقال همگن، سطوح انتخاب گر فرکانسی، خازن Interdigital

## Fabrication and Optimization of CRLH-TL Antenna in Control of Flight Systems and Airborne Warning

### Abstract

Ultra-broadband antennas have an important role in air and navigation control systems. In this paper, a CRLH-TL antenna is presented to cover multiple frequency bands and improve bandwidth. Antennas, designed as ultra-wide bands, can cover different frequency bands with small dimensions, all-directional radiation pattern and appropriate gain. Antennas designed as ultra-wide bands can cover different frequency bands with small sizes, all-directional radiation pattern and appropriate gain. Considering the basic application of antennas in flight communication systems and control navigation, optimizing and controlling their performance in navigation is of particular importance. For this purpose, in this paper, the desired antenna structure with magnetic metamaterials has been investigated. Finally, two combination methods have been proposed to improve antenna control performance. The first method, a circuit-based model with combined CRLH structure is proposed for effective miniaturization and versatility. Then, by using incomplete terrain (via) and FSS frequency selector levels, the antenna is designed with optimal gain and bandwidth. In the proposed antenna, miniaturization is provided through metamaterial transmission line and feed by electromagnetic coupler and CRLH element. The right-hand part consists of 35 Micron copper metal patch and left side of the effective transmission line of homogeneous. The FR-4 antenna bed is the characteristic impedance of 50 ohms and the frequency range is 2 to 7 GHz, very useful in improving the performance and control of radio frequency Radar and military software used in ADS (2022.1.2), HFSS (15.3), MATLAB, and removing the system design disruption by symmetrical polarization and improving the quality of bandwidth through the slotted ground. The proposed antenna is a compact microstrip antenna that improves the frequency of resonance, increases gain, bandwidth, and impedance matching, and ultimately an improved control system.

**Key words:** Interdigital capacitor, Frequency selector levels, CRLH-TH, Defected Ground (via)

\* نویسنده پاسخگو: گوهر ورامینی، تلفن: ۰۹۱۷۷۰۰۱۰۴۴، پست الکترونیک: [Gohar.varamini@iau.ac.ir](mailto:Gohar.varamini@iau.ac.ir)

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



## مقدمه

مهمترین قسمت در سیستم های کنترل پرواز، هشدار هوایی و امنیتی وجود آنتن با چندین باند فرکانسی می باشد. بنابراین سیستم های طیف گسترده و فرایهن باند در این میان از اهمیت زیادی برخوردار می باشند. آنتن های فشرده و فرایهن باند بهینه کوچک شده به عنوان شاخه مهمی از مخابرات هوشمند و کنترلی به شمار می آیند [1-3]. به منظور انتقال، دریافت، نظارت، اسکن، هوش سیگنال، جهت یابی و کاربردهای ناوبری طراحی باند فرکانسی مورد استفاده و توجه قرار دارند.

سیستم ها با فرکانس برابر با سیگنال هدف باعث اختلال و نویز در آن سیستم در محدوده فرکانس رادیویی می شوند و پایه اصلی درسیستم های رادارگریز بشمار می آیند [4-5]. از جمله این آنتن ها در مقاصد نظامی و امنیتی مانند جمرها، رادارهای نظامی، سیستم های کنترل هوایی، پدافند و حملات موشکی مورد استفاده قرار دارند و در نوع تجاری مانند آنتن های رادیویی، سیگنال های ماهواره ای و آنتن های مخابراتی و ... میتوان نام برد. ابعاد آنتن به عنوان یک محدودیت در باند فرکانسی به شمار می آید [6]. بنابراین فشرده سازی آنتن با توجه به تأثیر بر روی محدوده فرکانسی و کیفیت پهنای باند از اهمیت و جایگاه ویژه ای برخوردار می باشد [7]. آنتن با چندین اندازه مشخصه قابلیت انتشار طول موج های متنوعی را دارا می باشد [8-9].

در این مقاله یک آنتن با استفاده از تشعشعات متقارن و کوپلاژ الکترومغناطیسی طراحی و پیاده سازی شده است. آنتن از طریق خط متامتریال و پوشش پهنای باند فرکانسی مورد نظر با ترکیب ساختار تکرار فرکتالی طراحی و مینیاتوری شده است [10] و دارای ویژگی های مطلوبی از نظر ابعاد، پهنای باند، بهره و الگوی تشعشی می باشد. تطبیق امپدانس و کاهش تلفات ورودی در آنتن پیشنهادی کاملاً مشهود است. ایده دیگر در طراحی، بهبود کیفیت پهنای باند با ایجاد تغییرات در صفحه زمین آنتن می باشد که بصورت زمین ناقص (اسلات) یا Via پیاده سازی شده است [11-12]. آنتن پیچ به عنوان آنتن پایه مورد بررسی قرار میگیرد [13].

پیچ فرکتال به عنوان یک عنصر دست راستی است که با اضافه کردن المان دست چپ، کوچک سازی آنتن با استفاده از روش بارگذاری فرامواد حاصل می گردد. آنتن مورد نظر برای

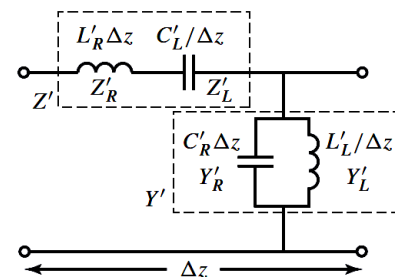
کاربردهایی در محیط های بدون رسانای فیزیکی است [14]. با اتصال سلول های واحد با آرایش های مختلف به یکدیگر و تغییر طول موثر، امپدانس های متفاوتی حاصل و سرانجام با اضافه کردن قابلیت تنظیم مجدد به آنتن پیشنهادی، بهره و الگوی تابشی کنترل میشود [15-17]. آنتن پیچ دارای پهنای باند و بهره کم است، بنابراین با ایده زمین ناقص بهینه شده و سطح انتخابی فرکانس (FSS) به دست آوردن باندهای مورد استفاده و بهره بالاتر بهبود یابد. از طرفی مشخصه باند باریک به عنوان عیب اصلی و مهم در آنتن پیچ می باشد و برای کاهش این ضعف، در این مقاله آنتن فشرده به همراه اسلات و زمین ناقص پیشنهاد شده است. نقص دیگر برای این نوع آنتن، الگوی تابشی است.

برای بهبود پهنای باند آنتن و الگوی تابشی ایده FSS<sup>۱</sup> مطرح میشود. در این طراحی پیچ اصلی آنتن دارای چهار عنصر پارازیتی است [18-20] که بخش دست چپی و لایه زمین را تشکیل تا زمینی مجازی برای سلف مهار کننده ایجاد شود. آنتن بر روی بستر FR-4<sup>۲</sup>، امپدانس مشخصه ۵۰ اهم و محدوده فرکانسی ۲ تا ۷ گیگا هرتز می باشد و در شناسایی فرکانس رادیویی، کنترل پرواز، هشدار هوایی، مایکروویو، آنتن های PF<sup>۳</sup>، DF<sup>۳</sup> بسیار کاربردی میباشند. نرم افزارهای مورد استفاده HFSS<sup>۴</sup>، ADS<sup>۵</sup>، MATLAB و بهبود کیفیت پهنای باند آنتن از طریق ایده زمین شکاف دار صورت گرفته است [21-22]. آنتن پیشنهادی با تغییرات در زمین سیستم، خط تغذیه، CRLH<sup>۶</sup> و در نهایت خازن Interdigital یک ایده نوآورانه به منظور سمت گرایی جریان و امکان پیش بینی الگوی تشعشی و همچنین بهبود عملکرد سیستم، ابعاد، پهنای باند، بهره آنتن و کاهش تلفات را ارائه می دهد. در نهایت آنتن پیشنهادی یک آنتن موثر در بهینه سازی و کنترل سیستم های پرواز و هشدار هوایی بشمار می آید.

<sup>۱</sup> Frequency selective surfaces  
<sup>۲</sup> Flame Retardant Level 4  
<sup>۳</sup> Direction finding  
<sup>۴</sup> Position finding  
<sup>۵</sup> Advance design system  
<sup>۶</sup> High frequency structural simulator  
<sup>۷</sup> Composite right & left - handed

### خطوط انتقال همگن CRLH-TL<sup>۸</sup>

فرامواد ساختارهایی به طور همگن موثر هستند، این عناصر قابلیت آن را دارا می باشند [23] که با خطوط انتقال یک بعدی و مدل خط انتقال<sup>۹</sup> MTM به صورت CRLH که اساس و پایه بیشتر کاربردهای سیستم های کنترلی به شمار می آیند مدلسازی شوند. در ادامه خط انتقال CRLH، ضریب شکست و نفوذ پذیری الکتریکی و مغناطیسی محاسبه و شرایط منفی شدن آنها مورد بررسی قرار میگیرد. در انتها خطوط انتقال CRLH متعادل و نامتعادل معرفی، مزایا و معایب هر کدام مطرح می شود. تکنولوژی فرامواد این فرصت را فراهم می کند که آنتن با ابعاد کوچک و قیمت مناسب با عملکرد تابشی بهتر طراحی و پیاده سازی شود [24]. ساختارهای فرامواد قابلیت متمرکز کنندگی جریان و میدان الکترومغناطیسی را در نزدیکی آنتن به جای آنکه در راستای صفحه زمین پراکنده شوند را شامل میشوند. یک سلول واحد CRLH شامل یک خط تغذیه است که به طور الکترومغناطیسی به یک پیچ فلزی تزویج شده است [25]. فرکانس های تشدید که مطابق با ضرب مدهای LH، RH و متناسب با راندمان می توانند توسط تغییر اندازه پیچ، طول خط *via*، طول خط تغذیه، فاصله بین عنصر آنتن، زمین و تغییر ابعاد دیگر کنترل شوند. مدار معادل یک خط انتقال CRLH در شکل (۱) نشان داده شده است. امپدانس و ادیمیتانس این مدار طبق روابط (1)، (2) محاسبه میشوند.



شکل ۱- مدار معادل خط انتقال CRLH [25].

$$Z' = j \left( \omega L'_R - \frac{1}{\omega C'_L} \right) \Omega/m \quad (1)$$

$$Y' = j \left( \omega C'_R - \frac{1}{\omega L'_L} \right) S/m \quad (2)$$

اگر امپدانس و ادیمیتانس دست چپیی برابر صفر باشد ( $Z'_L = -\frac{j}{\omega C'_L} = 0$  یا  $L'_L = \infty$ ) و ( $Y'_L = -\frac{j}{\omega L'_L} = 0$  یا  $C'_L = \infty$ ) تنها

امپدانس و ادیمیتانس ناشی از عناصر دست راستی در مدار موجود خواهند بود که شکل (1) نمایش داده شده و رابطه آن بصورت  $Z'_R = j\omega L'_R Y'_R = \omega C'_R$  خواهد بود و مدل شبیه خط انتقال راست دست RH می شود. بر عکس اگر امپدانس ناشی از عناصر دست راست صفر باشد ( $L'_R = 0$  و  $C'_R = 0$ )، مدار معادل تنها شامل عناصر دست چپیی می گردد. خط انتقالی که تنها شامل  $L'_R$  و  $C'_R$  باشد را خط انتقال دست راستی خالص می نامند و اگر کل عناصر غیر صفر باشند آن را خط انتقال CRLH در نظر میگیرند. در عمل خط انتقالی که به طور خالص دست چپیی LH باشد، وجود ندارد زیرا سلف سری و خازن موازی با افزایش فرکانس به علت شار جریان در فلز و گرادیان ولتاژ بین فلز و صفحه زمین افزایش می یابد. یک ساختار فرامواد شامل سلف موازی (L<sub>R</sub>) و خازن (C<sub>L</sub>) سری، سلف (L<sub>L</sub>) و خازن (C<sub>R</sub>) موازی است. L<sub>L</sub> و C<sub>L</sub> مشخصه انتشار مود دست چپیی و L<sub>R</sub> و C<sub>R</sub> مشخصه انتشار مود دست راستی را تعیین می کنند. با استفاده از این روش می توان به طراحی آنتن بر اساس خصوصیات منحصر به فرد CRLH-TL که به عدم موازی بودن ( $v_p v_g < 0$ )، سرعت فاز ( $v_p = \frac{\omega}{\beta}$ ) و سرعت گروه ( $v_g = \frac{\partial \omega}{\partial \beta}$ ) و ثابت انتشار صفر (طول موج بینهایت) در فرکانس خاص و در مد اصلی اشاره کرد.  $v_p$  و  $v_g$  در خط انتقال راست دست (RH-TL) موازی می باشند. در این مود با کاهش فرکانس، ثابت انتشار افزایش می یابد و بنابراین طول موج کاهش می یابد و آنتن با طول تشدید کوچکتر از  $\frac{\lambda}{2}$  بدست می آید. بنابراین خط انتقال بارگذاری شده توسط سلف و خازن، توزیع میدان مربوط به طول  $\frac{\lambda}{2}$  را به ازای طول کوچکتری ایجاد می کند. بنابراین آنتن پیچ کوچکتری نسبت به آنتن معمولی ایجاد می کند. طول موج مستقل از طول خط انتقال می باشد و می توان به آنتن از نظر الکتریکی کوچک دست یافت. طول الکتریکی خط انتقال متعادل به شدت وابسته به ابعاد فیزیکی است، بنابراین کاهش اندازه یک آنتن به معنای افزایش فرکانس عملکرد می باشد. توزیع میدان خط انتقال CRLH تنها به پارامترهای مدار از قبیل سلفها و خازن ها وابسته است. اندازه فیزیکی و فرکانس کار آنتن وابسته به ابعاد سلول واحد و پارامترهای مدار معادل خط انتقال می باشد. بنابراین با افزایش مقدار سلف موازی و خازن سری کاهش ابعاد پیش تر می شود.

$d$  طول سلول واحد است و پارامترهای  $\omega_{sh}$ ،  $\omega_L$ ،  $\omega_R$  و  $\omega_{se}$  به صورت تعریف می‌شوند.

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{L'_R C'_R}} \quad (\text{rad.m/s}) \quad (8)$$

$$\omega_L = \frac{1}{\sqrt{L'_L C'_L}} \quad (\text{rad.m/s}) \quad (9)$$

$$\omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{L'_L C'_R}} \quad (\text{rad/s}) \quad (10)$$

$$\omega_{se} = \frac{1}{\sqrt{L'_R C'_L}} \quad (\text{rad/s}) \quad (11)$$

زمانی که  $\omega < \omega_{se}$  و  $\omega < \omega_{sh}$ ،  $\epsilon_0 \mu$  هر دو منفی (DNG) و وقتی  $\omega < \omega_{sh}$  باشد، اسپیلن منفی می‌شود (ENG). فرکانس تشدید مرتبه صفر با فرکانس تشدید موازی برابر است ( $\omega_{ZOR} = \omega_{sh}$ ) ساختارهای CRLH-TL قادر به نمایش سرعت فاز و سرعت گروه بصورت موازی و غیر موازی بر حسب فرکانس عملکرد می‌باشند. در این ساختار فرکانسی که ناحیه دست‌چپ و راست را جدا می‌کند فرکانس انتقال<sup>۱۱</sup> نامیده می‌شود و با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_R L_R C_L L_L}} \quad (12)$$

### آنتن طراحی شده توسط Gap and via

یکی از روش‌های ایجاد سلف موازی استفاده از via میباشد. در این حالت در زیر لایه یک حفره استوانه‌ای ایجاد و سپس یک استوانه هادی را در داخل آن قرار داد می‌شود. در روش کوچک سازی با فرامواد نیاز به ایجاد خازن سری است که به خازن دست‌چپی معروف هستند. یک روش ایجاد خازن سری استفاده از شکاف بر روی میکرو استریپ می‌باشد. شکل (۲) نمای کلی عنصر شکاف را نشان می‌دهد. شکاف ایجاد شده در میکرو استریپ را می‌توان با مدار معادل مطابق شکل زیر نمایش داد.

$$L(\text{pH}) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ h \ln \left( \frac{h + \sqrt{r^2 + h^2}}{r} \right) + \frac{3}{2} (r - \sqrt{r^2 + h^2}) \right] \quad r, h \text{ in } \mu\text{m} \quad (13)$$

در اکثر طراحی‌های آنتن‌های طیف گسترده از تشدید گرهای مود مرتبه صفر<sup>۱۰</sup>، که دارای طول موج بینهایت (در فرکانس غیر صفر) هستند، استفاده شده است. به علاوه خط انتقال بارگذاری شده توسط سلف و خازن، توزیع میدان مربوط به طول  $\frac{\lambda}{2}$  را به ازای طول کوچک‌تری ایجاد می‌کند. بنابراین آنتن پیچ کوچک‌تری نسبت به آنتن معمولی ایجاد می‌کند. استفاده از این روش برای طراحی آنتن در فرکانس‌های پایین با محدودیت‌هایی مواجه است، زیرا به مقدار سلف موازی و خازن سری بزرگی احتیاج است که دستیابی به مقادیر بزرگ این پارامترها در تکنولوژی میکرو استریپ دشوار می‌باشد. استفاده از این روش برای کوچک سازی سبب کاهش بهره آنتن پیچ نسبت به آنتن پیچ معمولی می‌شود.

ثابت انتشار خط انتقال توسط معادله (۳) محاسبه می‌شود که در آن  $Z'$  و  $Y'$  به ترتیب امپدانس و ادمیتانس در واحد طول خط انتقال می‌باشند که در معادلات (۱) و (۲) مطرح شده‌اند [۳۲]. با توجه به اینکه  $\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$  داریم:

(۳)

$$\gamma = \alpha + j\beta \text{ for lossless} \rightarrow \gamma = j\beta = \sqrt{Z'Y'}$$

$$\mu = \mu(\omega) = L'_R - \frac{1}{\omega^2 C'_L} = \frac{Z'}{j\omega} \quad (4)$$

$$\epsilon = \epsilon(\omega) = C'_R - \frac{1}{\omega^2 L'_L} = \frac{Y'}{j\omega} \quad (5)$$

معادلات حاکم بر خط انتقال MTM CRLH می‌باشند. ثابت انتشار خط انتقال فرامواد برای سلول واحد با استفاده از معادلات زیر حاصل می‌گردد [۳۲].

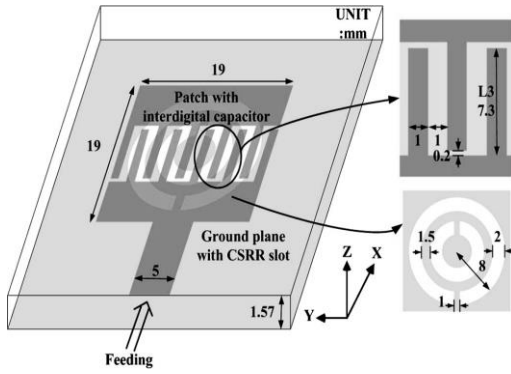
$$\beta_{ENG} d = \cos x^{-1} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\omega^2 - \omega_{sh}^2}{\omega_R^2} \right) \right\} \quad (6)$$

(۷)

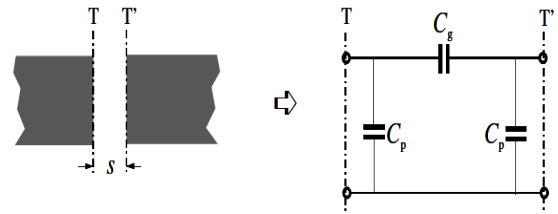
$$\beta_{DNG} d = \cos x^{-1} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{\omega_L^2}{\omega^2} + \frac{\omega^2}{\omega_R^2} - \left( \frac{\omega_{sh}^2}{\omega_R^2} + \frac{\omega_{se}^2}{\omega_R^2} \right) \right] \right\}$$

<sup>۱۱</sup>transition frequency

<sup>۱۰</sup>Zerth order mode resonator



شکل ۴- نمای هندسی آنتن ارائه شده .



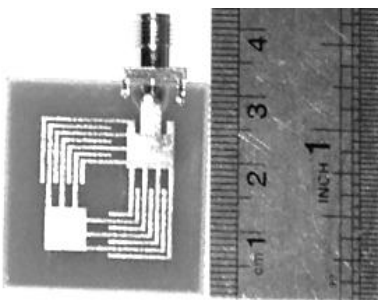
شکل ۲- نمای کلی عنصر شکاف و مدار معادل شکاف [۴۴].

از جمله ساختارهایی که به منظور کوچک سازی مورد استفاده قرار می گیرد، عبارتند از روش ترکیبی شامل via و gap می باشد که در طراحی آنتن پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته اند که در ادامه مورد بررسی کامل تری قرار میگیرند.

### آنتن طراحی شده پیشنهادی

در این ایده تیغه های Interdigital به صورت L شکل طراحی گردیده و دو خازن بصورت موازی قرار گرفته است. موازی شدن خازن ها، باعث افزایش ظرفیت معادل آنها می گردد و این عناصر نقش خازن چپ دستی و via نقش سلف چپ دستی را ایفا می کنند. این آنتن که حدود ۶۰ درصد کوچک شده است.

آنتن مورد نظر در بازه فرکانسی 2-3GHz دارای یک فرکانس تشدید در 2.45GHz است. پهنای باند آنتن در این فرکانس حدود 70MHz می باشد. در شکل (۵) ساختار پیشنهادی را نشان می دهد که برای فرکانس 2.45GHz طراحی شده است .

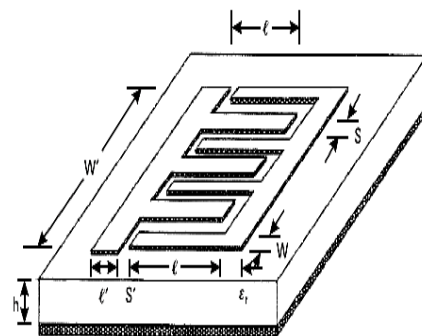


شکل ۵- ساختار آنتن پیشنهادی

شکل (۶) طرح شماتیک از آنتن پایه را نشان می دهد. که بصورت ترکیبی از یک حلقه فراکتال و بارهای SRR به منظور کوچک سازی آنتن میکرواستریپ ارائه شده است. قسمت (الف) حلقه فرکتال را به عنوان لایه ی بالایی و بخش (ب) بار فرکتال فرامواد را به عنوان لایه ی پایینی آنتن پیشنهادی نشان می دهد. آنتن پیشنهاد شده از دو لایه فلز تشکیل شده است که توسط یک لایه دی الکتریک از یکدیگر جدا شده اند. آنتن

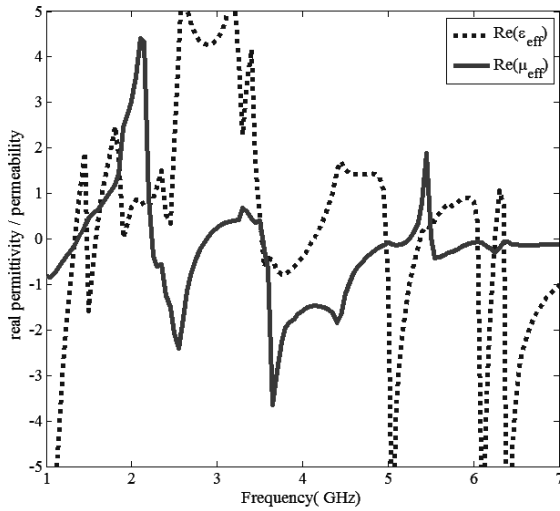
### آنتن طراحی شده CRLH با استفاده از خازن Interdigital و SRR

ساختار ترکیبی که با آن خازن سری ایجاد کرد، interdigital می باشد. شکل (۳) نمای کلی عنصر interdigital را نمایش می دهد. این خازن شامل چند تیغه<sup>۱۲</sup> که به صورت متناوب قرار گرفته اند. ساختار یک خازن مطلوب از بین هادی های باریک در شکاف ها ایجاد می شود. ضریب کیفیت این خازن بسیار بزرگ و ظرفیت خازن را می توان با بالا بردن تعداد تیغه ها ، افزایش طول تیغه ها و استفاده از زیر لایه نازک با ثابت دی الکتریک بالا افزایش داد که در طراحی آنتن یک ایده مناسب و کارآمد بشمار می آید. خازن interdigital در رنج 0.05-0.5pF قرار گرفته است [۴۴]. نمونه این ساختار برای فرکانس 3.8 GHz در شکل (۴) نشان داده شده است.

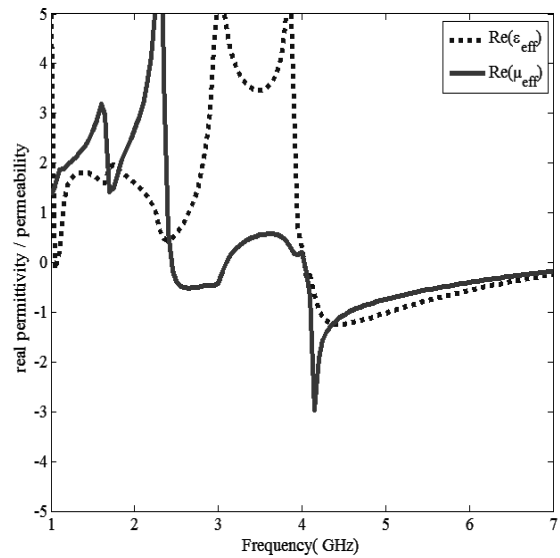


شکل ۳- نمای کلی ساختار interdigital

<sup>۱۲</sup>Finger



(الف)



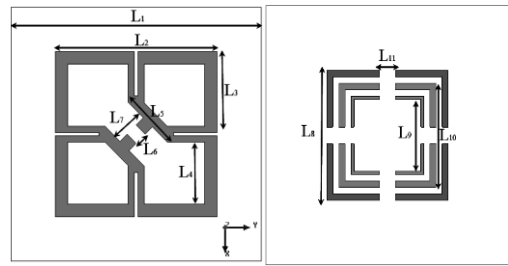
(ب)

شکل ۷- گذردهی و نفوذپذیری فرامواد برای مدل پایه (الف) با اثر آنتن (ب) بدون اثر از آنتن

### بهره آنتن، الگوی تابشی، کارایی و توزیع جریان

شکل (۸) توزیع جریان آنتن را در حضور و عدم وجود بار فرامواد نشان می دهد و همان طور که نشان داده شده، حداکثر مقدار توزیع جریان آنتن با استفاده از اضافه شدن بار فرامواد از  $86 \text{ A/m}$  به  $379 \text{ A/m}$  افزایش می یابد. در این ساختار، در غیاب بار فرامواد، توزیع جریان های آنتن در اطراف حلقه ایجاد و در هنگام اضافه کردن بار فرامواد، جریان در دو گوشه آنتن متمرکز می شود بنابراین جریان این امکان را پیدا می کند تا از طریق بار فرامواد کنترل شود در اینجا می توان کنترل و

بر روی زیر لایه FR-4 با ضریب نفوذ پذیری نسبی  $4.4$ ، ضخامت  $1.6$  میلیمتر و تانژانت تلفات  $0.02$  ساخته شده است. خطوط انتقال مایکرواسترپ  $50 \Omega$  به عنوان منبع تغذیه استفاده می شود و در وسط ساختار قرار دارد. برای تغذیه آنتن با حداکثر تطبیق، از یک balun استفاده می شود. اندازه کلی ساختار طراحی  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  است. ابعادی برای لایه بالا  $L_1 = 40$  میلی متر،  $L_2 = 28$  میلی متر،  $L_3 = 13.75$  میلی متر،  $L_4 = 9.75$  میلی متر،  $L_5 = 8.85$  میلی متر،  $L_6 = 2$  میلی متر،  $L_7 = 5.3$  میلی متر و در لایه پایین  $L_8 = 20$  میلی متر،  $L_9 = 16$  میلی متر،  $L_{10} = 12$  میلی متر و  $L_{11} = 2.5$  میلی متر است. لایه بالا حلقه فراکتال را ایجاد می شود.



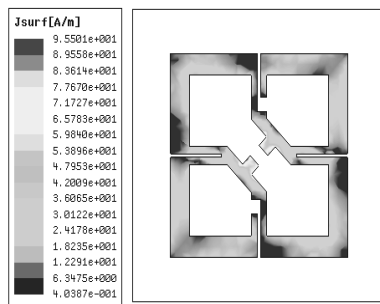
(ب)

(الف)

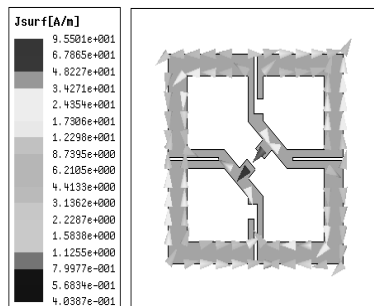
شکل ۶- (الف) نمایش لایه بالا (ب) بار فرامواد لایه پایین

ساختار با تجزیه و تحلیل دو ورودی، با استفاده از نرم افزار HFSS انجام گردیده است. سپس با استفاده از نرم افزار MATLAB، مقدار دامنه و فاز  $S_{11}$  استخراج تا بخش واقعی ضریب نفوذپذیری و گذر دهی برای مورد اول با بار فرامواد به دست آید. همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است، گذر دهی و نفوذ پذیری در  $4.5$  و  $6$  گیگاهرتز منفی است که باعث ایجاد تشدید این فرکانس ها می شود. نفوذ پذیری منفی در  $2.5$  و  $4.5$  گیگاهرتز، برای مورد اول با بار فرامواد دو تشدید ایجاد می کند. در نتیجه می توان دید که مشخصه منفی سطح فرامواد به طور مستقیم بر روی تشدید های آنتن با تغییر امپدانس موج در زیر لایه اثر می گذارد.

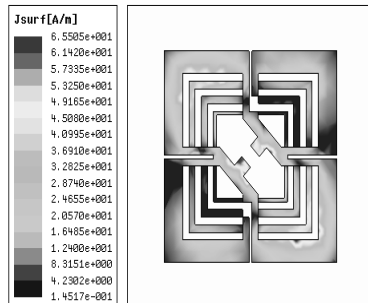
بهینه سازی در آنتن های فرایهین باند را تایید کرد. در شکل ۹ این اثر برای مورد ۲ بررسی شده است و با مقایسه آنتن با حضور و بدون بار فرامواد، بردار جریان می تواند ایجاد و شکل بگیرد که برای الگوی تابشی دایروی بسیار حائز اهمیت کاربردی است.



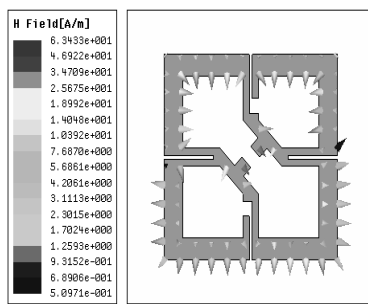
(الف)



(ب)



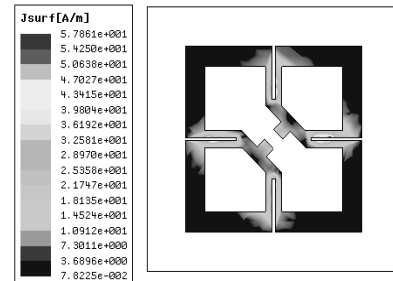
(ج)



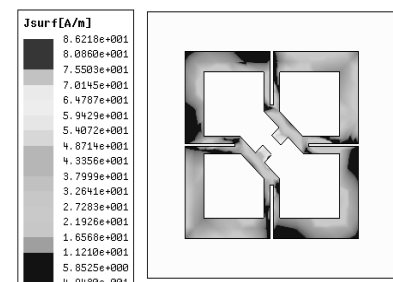
(د)

شکل ۹- جریان آنتن برای مورد دوم (الف) تراکم جریان بدون فرامواد در ۷ گیگاهرتز (ب) بردار توزیع جریان بدون فرامواد در ۷ گیگاهرتز (ج) تراکم جریان با فرامواد ۴ گیگاهرتز (د) بردار توزیع جریان با فرامواد در ۴ گیگاهرتز

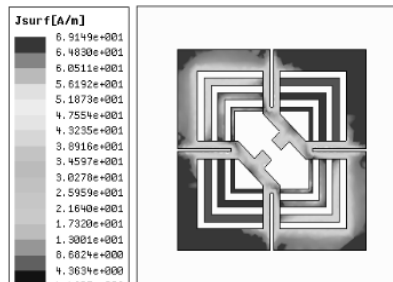
الگوی تابشی شبیه سازی شده برای موارد ۱ و ۲ ارائه و الگو با بار فرامواد و بدون بارهای فرامواد بررسی شده است.



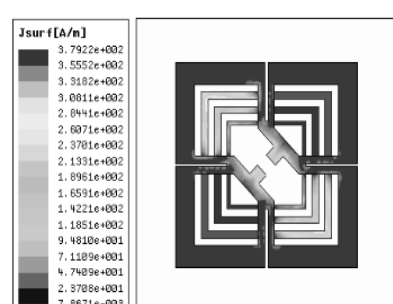
(الف)



(ب)



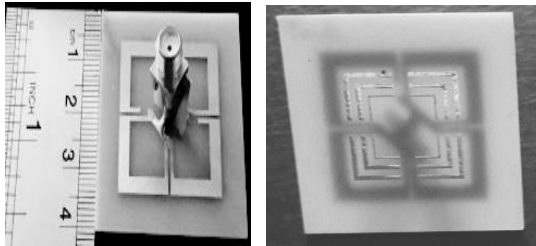
(ج)



(د)

شکل ۸- جریان آنتن برای مورد اول (الف) در ۴ گیگاهرتز بدون بار فرامواد (ب) ۷ گیگاهرتز بدون بار فرامواد (ج) در ۴.۵ گیگاهرتز با بار فرامواد (د) در ۶ گیگاهرتز با بار فرامواد

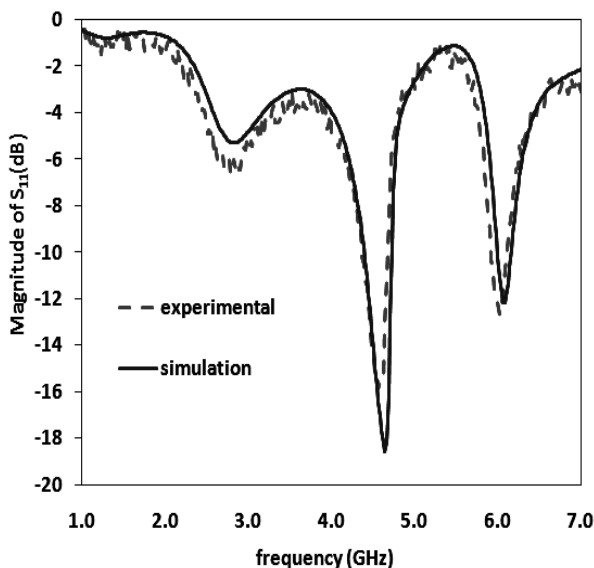
لایه انتخاب شده و آنتن نمونه برای ایجاد الگوی تابشی دایروی اصلاح شده است.



(الف) (ب)

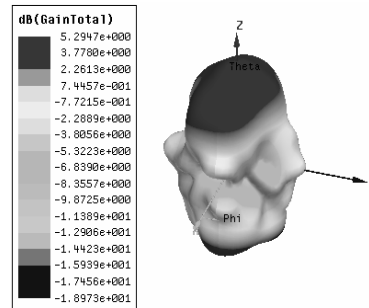
شکل ۱۱- آنتن ساخته شده برای اندازه گیری (الف) بار فرامواد در لایه ی پایین (ب) نمای بالا و ساختار تغذیه

تلفات بازگشتی در شکل (۱۲) برای آنتن پیشنهاد شده، ارائه و نتایج شبیه سازی و اندازه گیری با هم مقایسه که نشان داده شده است، تلفات بازگشتی اندازه گیری شده کاملا مطابقت خوبی با نمونه شبیه سازی دارد. با این حال، اتصال بالون با پیچ تلفات بزرگی را در آنتن ایجاد می کند. در این مدل پیشنهادی چندین جابجایی فرکانسی وجود دارد که به دلیل ناخالصی زیر لایه میباشد. آنتن دارای سه باند تشدید در ۲،۷، ۴،۵ و ۵،۹ گیگاهرتز است. قابل توجه است که با تغییر اندازه و بهینه سازی آنتن، فرکانس عملیاتی می تواند برای دیگر باندها اصلاح شود.

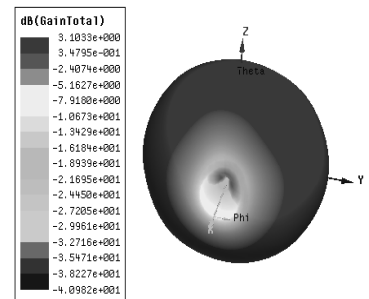


شکل ۱۲- تلفات بازگشتی حالت شبیه سازی و اندازه گیری

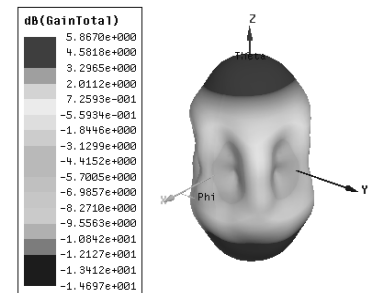
شکل (۱۰-الف) الگوی تابشی را برای ۷ گیگاهرتز بدون بارهای فرامواد نشان می دهد و در این فرکانس، آنتن شکل دو جهته با بهره ۵،۸ dB دارد. پس از اضافه کردن فرامواد تابش در فرکانس های پایین ایجاد می شود و آنتن یک الگوی همه جهته با یک شکل تیوب مانند با مقدار بهره ۳،۱ dB (شکل ۱۰-ب) ارائه می دهد. در فرکانس دوم، الگوی دو جهته برای آنتن باقی می ماند که در شکل (۱۰-ج) نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)



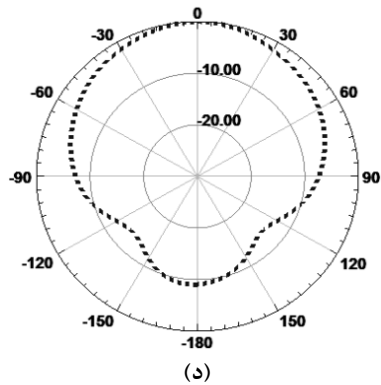
(ج)

شکل ۱۰- بهره آنتن (الف) آنتن بدون فرامواد در ۷ گیگاهرتز (ب) آنتن با فرامواد در ۴ گیگاهرتز (ج) آنتن با فرامواد در ۶ گیگاهرتز

### نتایج اندازه گیری و شبیه سازی

شکل (۱۱) آنتن ساخته شده را نمایش می دهد. در شکل نشان داده شده است که یک بالون با طول ۱۰ میلیمتر برای تغذیه آنتن استفاده شده است. زیر لایه FR-4 برای زیر





شکل ۱۳- اندازه گیری الگوی تابشی آنتن (الف) الگوی تابشی اصلی و متعامد برای  $\phi = 0^\circ$  (ب) الگوی تابشی اصلی و متعامد برای  $\phi = 90^\circ$  (ج) الگوی LHCP (د) الگوی RHCP. برای (الف) و (ب) خطوط توپر، الگوی تابشی اصلی و خطوط چین الگوی تابشی متعامد را نشان می دهند.

جدول ۱- مقایسه پارامترهای مختلف آنتن

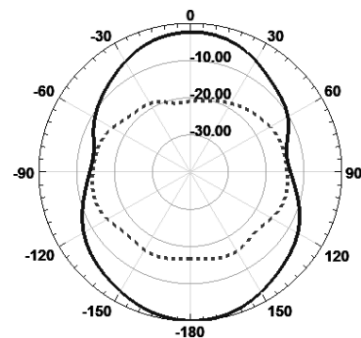
frequency	gain dB	efficiency	Step	polarization
2.5 GHz	3.5	72 %	300	linear
4.5 GHz	4.5	78%	360	circular
5.9 GHz	4.2	70%	240	linear

جدول ۲- مقایسه خروجی مدار تست اندازه گیری شده با مدل هایی جدید ارائه شده دیگر در این زمینه

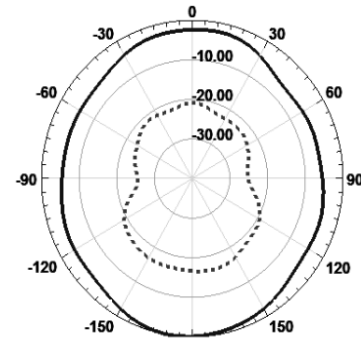
Antenna	Gain dB	Efficiency	B.W GHz	Size
Model	4.5	78%	2-7	40*40
Ref [23]	2.1	56%	4-6.5	30*30
Ref [24]	3.7	61%	3-7	80*80
Ref [25]	4.1	69%	2.5-7	60*60

با توجه به جدول ارائه شده مشخص میشود ساختار پیشنهادی از نظر عملکرد و فشردگی نسبت به دیگر مدل های ارائه شده مناسب تر و قابلیت پیاده سازی بهتری را دارا می باشد. در شکل (۱۴) اندازه گیری نسبت به محور دو بعدی

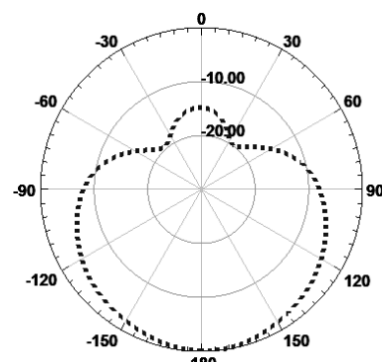
الگوی آنتن برای ۴.۵ گیگاهرتز به دست آمده و برای این فرکانس، دو الگوی تابشی اصلی و متعامد برای  $\phi$  برابر با صفر و ۹۰ ارائه شده است که در شکل (۱۳-الف و ب) نتایج شبیه سازی مشخص شده برای نشان دادن الگوی تابشی دایروی با الگوی تابشی آنتن، یک آزمایش بر روی LHCP و RHCP انجام و نتایج الگوی تابشی دایروی در بخش های شبیه سازی (ج و د) نشان داده شده است. بهره و بازده آنتن به طور تجربی در جدول (۱) به دست آمده است و همان طور که در (الف و ب) نمایش داده شده است که الگوی دو جهته برای آنتن باقی می ماند.



(الف)



(ب)

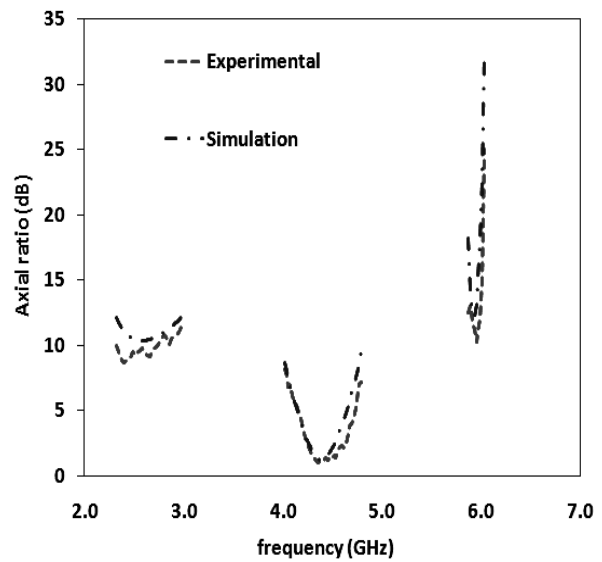


(ج)

باند میباشد. از طرفی مشخصه باند باریک عیب اصلی آنتن پچ می باشد و به منظور کاهش این ضعف، در این مقاله آنتن فراپهن باند بهینه به همراه اسلات و زمین ناقص پیشنهاد شده است. عدم پیش بینی الگوی تابشی و جهت گرایی جریان به عنوان نقص دیگری در این نوع سیستم ها بشمار می آید. برای بهبود پهنای باند کاری آنتن و الگوی تابشی ایده تشکیل FSS پیشنهاد و مورد استفاده قرار گرفته است.

پچ اصلی آنتن پیشنهادی دارای چهار عنصر پارازیتی است که بخش دست چپی و لایه زمین را تشکیل می دهند تا زمینی مجازی برای سلف مهار کننده ایجاد شود. برای افزایش بهره آنتن و پهنای باند، لایه FSS در یک طرف قرار می گیرد و با لایه فوم جدا FR-4 در نظر گرفته می شود. در این مقاله با ارائه طرح ترکیبی و نوآورانه سعی شده است یک روش ایده آل و مناسب با بالاترین کیفیت ارائه داده شود. آنتن پیشنهادی با تغییرات در زمین سیستم، خط تغذیه، CRLH و در نهایت ساختار اصلاح شده با خطوط انتقال همگن یک ایده نوآورانه به منظور سمت گرایی جهت جریان و امکان پیش بینی الگوی تشعشی را امکان پذیر می کند. همچنین در جهت بهبود عملکرد سیستم، ابعاد، پهنای باند، بهره آنتن و کاهش تلفات نیز ایجاد و ارائه شده است. در نهایت آنتن پیشنهادی یک آنتن موثر در بهینه سازی و کنترل سیستم های پرواز و هشدار هوایی بشمار می آید و به عنوان یک سیستم با ضریب اطمینان بالا و کاربردی در امنیت پرواز ارائه می گردد.

انجام و میدان E در هر دو محور مورد بررسی قرار میگیرد و نتایج برای همه تشدیدها برای چند نقطه در حدود ۴,۵ گیگاهرتز با گام ۲۰ مگاهرتزی مورد بررسی قرار میگیرد، همانطور که در شکل نشان داده شده است، آنتن پیشنهادی دارای تشعشع الگوی تابشی دایروی در ۴,۵ گیگاهرتز و برای ۲,۵ و ۵,۹ گیگاهرتز دارای الگوی تابشی خطی است. از طرفی براساس نتایج حاصله مشخص میشود مدل پیشنهادی دارای بهترین بهره و کارایی در الگوی تابشی دایروی می باشد و شرایط مطلوبی از بهینه سازی و کنترل را در الگوی دایروی تامین می کند.



شکل ۱۴- مقایسه نسبت محوری آنتن را برای شبیه سازی و تجربی

### نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی، طراحی و ساخت یک آنتن فراپهن باند به منظور پوشش چندین باند فرکانسی و ایجاد بهینه سازی و کنترل مطلوب در سیستم های هوایی و طیف گسترده پرداخته شده است. آنتن CRLH-TH پیشنهادی با ابعاد کوچک، بهره والگوی تشعشی مناسب را امکان پذیر میکند که از طریق ایجاد تغییرات در ساختار زمین و خط تغذیه آنتن به وجود می آید. مشکل اصلی در آنتن های فشرده کاهش بهره با کوچک سازی در فرکانس های پایین است که آنتن پیشنهادی این امر را تا حد بسیار زیادی برطرف می کند. با توجه به عرض باند مناسب که از طریق طراحی آنتن CRLH پیشنهادی در اختیار سیستم قرار گرفته میشود، یک ایده کارآمد در طراحی آنتن های کنترلی با تطبیق مناسب به منظور تأمین چندین

## منابع و مراجع

- Wireless Engineering and Technology*, vol. 4, pp. 171-178, July 2013.
- [9] M. Rahimi, F.s B. Zarrabi, R. Ahmadian, Z. Mansouri and A. Keshtkar, "Miniaturization of antenna for wireless application with difference metamaterial structures," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 45, pp. 19-29, Sep. 2014.
- [10] N. Ojaroudi, Y. Ojaroudi and S. Ojaroudi, "Novel design of UWB band-stop filter (BSF) Based on Koch Fractal Structures," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, no. 15, vol. 7, pp. 89-97, 2015.
- [11] A. Pirooj, M. N.- Moghadasi and F. B. Zarrabi, "Design of compact slot antenna based on split ring resonator for 2.45/5 GHz WLAN applications with circular polarization," *Microwave and Optical Technology*, vol. 58, no.1, pp. 12-16, 2016.
- [12] K. Chandrasekaran, T., Muhammad Faeyz Karim and A. Alphones, "CRLH structure-based high-impedance surface for performance enhancement of planar antennas," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, no. 6, pp. 818-826, 2016.
- [13] A. Bhattacharya, B. Roy, S. K. Chowdhury and A. K. Bhattacharjee, "Design and analysis of a CRLH monopole antenna for wideband communication," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 32, no. 6, pp. 356-369, 2017.
- [14] M. Sedghi, M. Sadegh, M. Naser-Moghadasi and B. Ferdows Zarrabi, "Microstrip antenna miniaturization with fractal EBG and SRR loads for linear and circular polarizations," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 9, no. 4, pp.891-901, Sep. 2017.
- [15] F. S. Jafari and J. Ahmadi-Shokouh, "Industrial liquid characterization
- [1] P. Jae-Hyun, Y-H. Ryu, J-G. Lee and J-H. Lee, "Epsilon negative zeroth-order resonator antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 12, pp. 3710-3712, 2007.
- [2] K. Deepti Das, M. Gopikrishna, C. K. Anandan, P. Mohanan and K. Vasudevan, "CPW-fed Koch fractal slot antenna for WLAN/WiMAX applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation, Letters* .7, 2008, pp. 389-392.
- [3] A. Dimitris, E. John Papapolymerou, Manos M. Tentzeris and G. Christos Christodoulou, "A printed log-periodic Koch-dipole array (LPKDA)," *IEEE Antennas and Wireless Propagation, Letters* .7, 2008, pp. 456-460.
- [4] G. Rowdra, R. Dipak Poddar and K.Rabindra Mishra, "A moment-method characterization of dipole antennas," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 63, no. 4, pp. 279-286, July. 2009.
- [5] S. Ping Jack, G. A. E. Vandenbosch, S. Liam Ooi and M. R. N. Husna, "Wearable dual-band Sierpinski fractal PIFA using conductive fabric," *Electronics*, vol .47, no. 6, pp.365-367, 2011.
- [6] H. Jaegeun, K. Kwon, Y. Lee and J. Choi, "Hybrid mode wideband patch antenna loaded with a planar metamaterial unit cell," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 60, no. 2 pp. 1143-1147, Sep. 2012.
- [7] J. S. Gomez-Diaz, A. Alvarez-Melcon and J. Perruisseau-Carrier, "Analysis of the radiation characteristics of CRLH LWAs around broadside," In *Antennas and Propagation (EUCAP), 6th. IEEE, European Conference*, 2012, pp. 2876-2880,.
- [8] R. Abdelati and A. O. Said, "Tri-band fractal antennas for RFID Applications,"

- of microstrip patch antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 12, pp. 373-378, 2022.
- [23] D. H. Werner and S. Ganguly, "Design and Simulated CRLH Based fractal antenna engineering research," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 65, no. 1, pp. 508-517, July 2022.
- [24] K. T. Chandrasekaran and M. Faeyz Karim, "The behavior of CPW-FED microstrip patch antenna high-impedance surface," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 22, no. 6, pp. 218-226, 2023.
- [25] J-H. Park, Y-H. Ryu, J-G. Lee and J-H. Lee, "Design of CRLH Based," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 10, pp. 710-712, 2023.
- enhancement using microwave sensor equipped with electronic band gap structure," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 82, pp.152-159, July 2019.
- [16] G. Varamini, A. Keshtkar and M. Naser-Moghadasi, "Compact and miniaturized microstrip antenna based on fractal and metamaterial loads with reconfigurable qualification," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 83, pp. 213-221, 2020.
- [17] J. Franson, Steven and W. Richard Ziolkowski, "Gigabit per second data transfer in high-gain metamaterial CRLH structures at 60 GHz," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 10, pp. 2913-2925, 2020.
- [18] G. Varamini, A. Keshtkar and M. Naser-Moghadasi, "Fractal and miniaturized ultra-bordband antenna based and metamaterial loads with reconfigurable qualification," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 63, pp. 313-321, 2021.
- [19] S. Pyo, J-W. Baik, S-H. Cho and Y-S. Kim, "Metamaterial-based antenna with triangular slotted ground for efficiency improvement," *Electronics*, vol. 45, no. 3, pp.144-146, 2021.
- [20] S., Ping Jack, G. A. E. Vandenbosch, S. L. Ooi and M. R. N. Husna, "Wearable dual-band Sierpinski fractal PIFA using conductive fabric," *Electronics*, vol. 57, no. 6, pp. 365-367, Sep 2022,
- [21] Wang, C., Z-H. Yan, P. Xu, J-B. Jiang, and B. Li, "Trident-shaped dual-band CPW-fed monopole antenna for PCS/WLAN applications," *Electronics*, vol. 47, no. 4, pp. 231-232, 2022.
- [22] X. M. Yang, X. Mi, Q. H. Sun, Y. Jing, Q. Cheng, X. Yang Zhou, H. Wei Kong and T. J. Cui, "Increasing the bandwidth