

آنتن شکاف حلقوی تکه‌ای با قابلیت سوئیچ فرکانس برای مقابله با اختلال

میثم بیات^{۱*}، محسن غلامرضائی^۲، رضا هوشمند^۳

۱ و ۳- استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، ۲- دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۷/۱۱/۲۰، پذیرش: ۹۸/۰۵/۲۱)

چکیده

در این مقاله، یک آنتن جدید و کم‌حجم از نوع شکاف به شکل حلقوی تکه‌ای با قابلیت سوئیچ فرکانسی در حالت‌های باند باریک و پهن باند به‌منظور کاربرد در شبکه‌های بی‌سیم ارائه شده است. قابلیت تنظیم فرکانسی به‌ویژه از حالت‌های پهن باند به باند باریک به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای می‌تواند باعث مصون ماندن سامانه از اختلال و نویز گردد. در این آنتن، با قرار دادن دیودهای پهن روی یک شکاف نسبتاً پهن، برای نخستین بار ترکیبی از دو حالت پهن باند و شش حالت باند باریک ایجاد شده است. شکاف در صفحه زمینی به ابعاد $33 \times 36 \text{ mm}^2$ ایجاد شده است. محدوده فرکانسی ضرایب انعکاس اندازه‌گیری شده به‌ازای $S_{11} < -10 \text{ dB}$ برای حالت پهن باند اول در بازه $3.47-5.48 \text{ GHz}$ و برای حالت پهن باند دوم در بازه $5.2-7.37 \text{ GHz}$ است. محدوده عملکرد حالت‌های باند باریک نیز از $2.58-3$ و $4.88-5.5 \text{ GHz}$ برای تشدید اول و $4.88-5.5 \text{ GHz}$ برای تشدید دوم است. از آنتن پیشنهادی می‌توان برای کاربردهایی مانند WLAN IEEE 802.11a ($5.1-5.8 \text{ GHz}$)، WiMAX ($2.5-2.8 \text{ GHz}$)، زیر باندهای طیف فوق پهن‌باند مانند ($3.5-5 \text{ GHz}$) و نیز رادارهای باند C بهره برد.

کلیدواژه‌ها: باند باریک و پهن باند، آنتن با قابلیت سوئیچ، آنتن شکاف حلقوی، مصونیت از اختلال و نویز

Frequency Switchable Ring Sector Slot Antenna for Jamming Immunity

M. Bayat*, M. Gholamrezaee, R. Hooshmand

Shahid Sattari Aeronautical University of Science & Technology

(Received: 09/02/2019; Accepted: 12/08/2019)

Abstract

In this paper, a novel low-profile switchable narrow and wide band circular ring sector slot antenna is presented for wireless applications. Adjustable operating frequencies especially with the ability of switching between narrow and wide band modes could provide considerable immunity from jamming and noises. The combination of two wideband and six narrowband modes are provided using PIN diode switches inserted on the relatively wide slot. The slot is etched in the ground plane with the size of $33 \times 36 \text{ mm}^2$. The results show the operating frequency bands of $3.47-5.48 \text{ GHz}$ for the first wideband operation and $5.2-7.37 \text{ GHz}$ for the second wideband operation with $S_{11} < -10 \text{ dB}$. In narrowband modes, the operating frequencies can be adjusted from $2.58-3$ and $4.88-5.5 \text{ GHz}$ for the first (f_1) and second (f_2) resonances, respectively. The proposed antenna is suitable for applications such as WLAN IEEE 802.11a (5.1 to 5.8 GHz), WiMAX ($2.5-2.8 \text{ GHz}$), the ultra wideband (UWB) sub-band groups ($3.5-5 \text{ GHz}$ and $5-6.5 \text{ GHz}$) and also C-band radars.

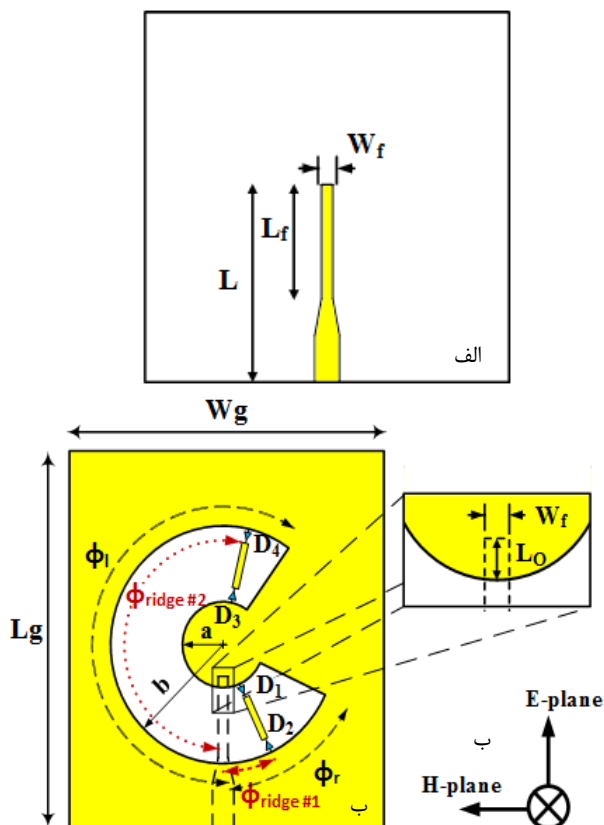
Keywords: Narrow/Wide-Band, Jamming and Noise Immunity, Switchable Antenna, Ring Sector Slot Antenna

۱. مقدمه

باند باریک ارائه شده است که دارای یک تفاوت عمده نسبت به پیشینیان خود است، بدان معنا که عنصر تشعشعی پایه نه به صورت پهن باند بلکه باند باریک است. تفاوت دیگر، به نوع عنصر تشعشعی برمی‌گردد، بدان معنا که از یک شکاف نسبتاً پهن با سوئیچ‌هایی که به‌طور عرضی نسبت به آن قرار گرفته‌اند، استفاده شده است. این در حالی است که تاکنون در صورت شکاف‌دار بودن عنصر تشعشعی، شکاف باریک و عرض آن به اندازه طول سوئیچ بوده است [۱۶]. مزیت شکاف پهن در اینجا باعث می‌شود که بتوان با ایجاد برآمدگی^۳ در آن، تشدیدها را جابه‌جا نمود. این دو تفاوت باعث می‌گردد اولاً دو حالت پهن باند (بیش از یک حالت) محقق گردد و ثانیاً محدوده عملکرد حالت‌های باند باریک خارج از محدوده‌های پهن باند نیز قرار گیرد.

۲. طراحی آنتن

آنتن پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. عنصر تشعشع‌کننده از نوع شکاف به شکل حلقوی تکه‌ای^۴ بوده و با خط خط ریز نوار تغذیه می‌گردد.



شکل ۱. آنتن پیشنهادی با قابلیت سوئیچ فرکانسی، الف) نمای رو و ب) نمای زیر.

در دهه گذشته، پیشرفت زیادی در زمینه تنظیم و تغییر مشخصه‌های آنتن‌های مختلف با هدف افزایش کارایی آن‌ها صورت گرفته است. از این مشخصه‌ها می‌توان به باند کاری [۱]، الگوی تشعشعی [۲] و قطبش [۳] اشاره نمود که تنظیم آن‌ها با سازوکارهای مختلفی از قبیل سوئیچ‌های الکترونیکی مانند دیودهای پین [۴] و ورتور [۱]، سوئیچ‌های الکترومکانیکی مانند MEMS^۱ [۵] عملگرهای مکانیکی [۶]، پنوماتیکی [۷]، نوری [۸] و مایع [۹] صورت می‌گیرد. با پیشرفت شبکه‌های بی‌سیم و گسترش کاربردهای ادواتی مانند رایانه، تلفن همراه و ... لزوم انتقال سریع و دقیق حجم وسیعی از اطلاعات به‌ویژه اطلاعات چندرسانه‌ای بیش از گذشته احساس می‌گردد. آنتن‌های پهن باند گزینه مناسبی برای این منظور هستند. این گزینه می‌تواند با ایجاد قابلیت سوئیچ‌زنی از حالت‌های باند باریک به حالت‌های پهن باند مناسب‌تر نیز گردد. یکی از کاربردهای این قابلیت مقابله با نویز و به‌ویژه اختلال^۲ [۱۰] است. بدان معنا که در صورت هدف واقع شدن فرکانس کار در یک حالت پهن باند، می‌توان با تغییر وضعیت به حالت‌های باند باریک از اختلال مصون ماند که می‌تواند در رادارهای باند C مورد استفاده قرار گیرد [۱۴-۱۱].

تاکنون، آنتن‌های متعددی با قابلیت سوئیچ‌زنی فرکانسی ارائه شده‌اند [۱، ۴، ۵، ۸، ۱۵-۲۴]. اما در اکثر آن‌ها تنها قابلیت تغییر فرکانس در حالت‌های باند باریک وجود دارد [۱ و ۱۵-۲۰]. در این میان، تنها تعداد محدودی از آنتن‌های ارائه شده در مقالات دارای قابلیت سوئیچ‌زنی فرکانسی در هر دو حالت باند باریک و پهن باند هستند [۲۴-۲۱] و تقریباً در تمامی موارد، تنها یک حالت پهن باند وجود دارد. این امر از آنجا ناشی می‌گردد که آنتن تشعشعی پایه (بدون سوئیچ) خود پهن باند بوده و حالت‌های باند باریک با سوئیچ ایجاد می‌گردد. به عبارت ساده‌تر، در این گونه آنتن‌ها، قابلیت سوئیچ فرکانسی از ترکیب یک عنصر پهن باند با یک فیلتر سوئیچ‌شونده محقق می‌گردد. در نتیجه، حالت‌های باند باریک با فیلتر شدن عملکرد پهن باند عنصر تشعشعی پایه ایجاد می‌گردند. اگرچه استفاده از یک آنتن تشعشعی پهن باند به‌عنوان آنتن پایه معمول‌ترین روش بدین منظور است، اما این روش دارای محدودیت‌هایی است از جمله:

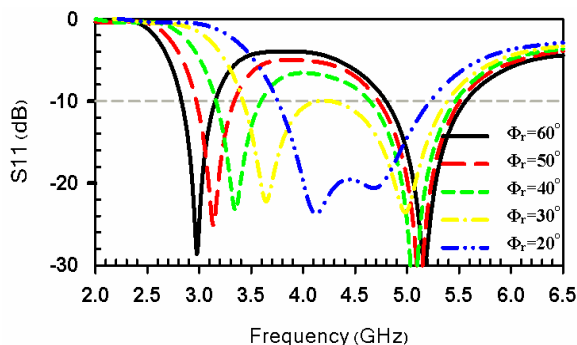
- عدم امکان تحقق بیش از یک حالت پهن باند
- محدود شدن فرکانس تشدید حالت‌های باند باریک در بازه فرکانسی عملکرد آنتن پایه

در این مقاله، روش دیگری برای تحقق عملکرد پهن باند و

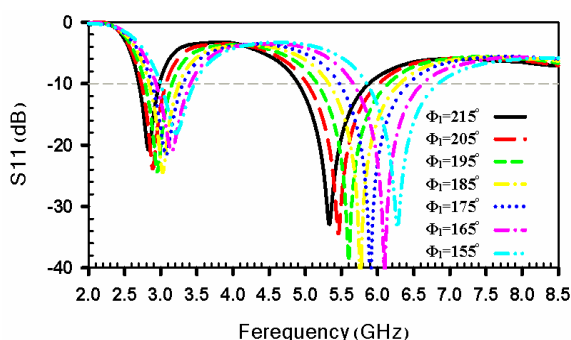
^۳ Ridge
^۴ Ring Sector

^۱ Micro Electro Mechanical Switch
^۲ Jamming

در شکل‌های (۴-۵)، تأثیر مقادیر مختلف زوایای ϕ_1 و ϕ_r بر f_1 و f_2 نشان داده شده‌اند. در هر مرحله تنها یکی از این زوایا تغییر داده شده و دیگری ثابت نگاه داشته شده است.



شکل ۴. نتیجه شبیه‌سازی اثر ϕ_r بر فرکانس تشدید اول آنتن پایه (بدون سوئیچ) با $\phi_1 = 226^\circ$



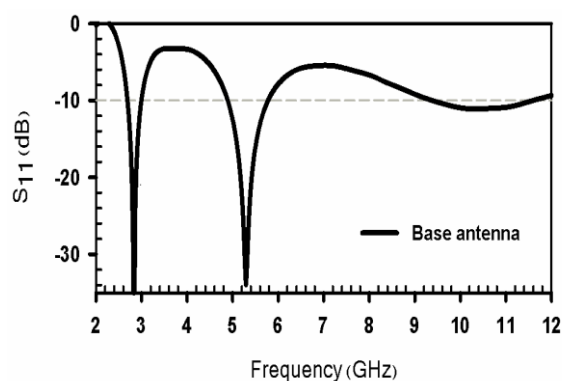
شکل ۵. نتیجه شبیه‌سازی اثر ϕ_1 بر فرکانس تشدید دوم آنتن پایه (بدون سوئیچ) با $\phi_r = 70^\circ$

۳. طراحی دو حالت پهن باند

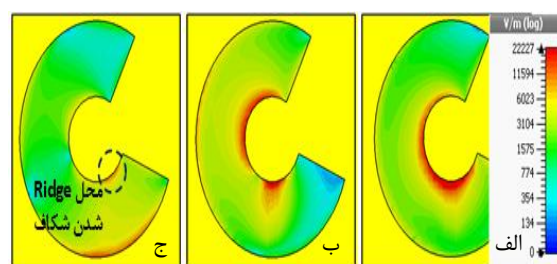
در این بخش، مراحل ارتقاء آنتن پایه به آنتن با قابلیت سوئیچ فرکانسی تشریح می‌گردد. نخست، مراحل طراحی دو حالت پهن باند ارائه می‌گردد:

حالت اول (WB #1): همان‌طور که در بخش (۲) بیان گردید و در شکل (۴) نشان داده شد، f_1 با کاهش ϕ_r افزایش و f_2 تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. در صورتی که ϕ_r بیشتر کاهش یابد f_2 نیز کاهش می‌یابد و یک تشعشع پهن باند از به هم پیوستن دو تشدید ایجاد می‌گردد. کاهش ϕ_r می‌تواند با ایجاد اتصال کوتاه شعاعی شکاف با استفاده از یک زائده مطابق شکل (۶-الف) محقق گردد.

حالت دوم (WB #2): این حالت از نزدیک شدن فرکانس‌های تشدیدهای دوم و سوم و اتصال آن‌ها به یکدیگر محقق می‌گردد.



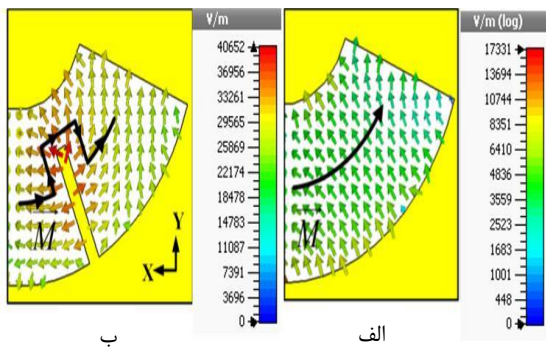
شکل ۲. فرکانس‌های تشدید آنتن پایه



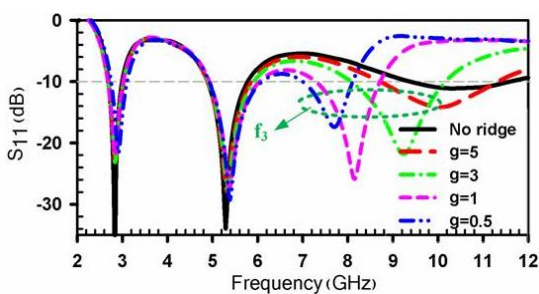
شکل ۳. توزیع میدان الکتریکی روی شکاف آنتن پایه

(الف) $f_1 = 2/81$ GHz، (ب) $f_2 = 5/25$ GHz و (ج) $f_3 = 10/6$ GHz

فرکانس‌های تشدید یک شکاف باریک به پارامترهایی مانند طول، مکان و عرض خط تغذیه و نیز طول شکاف وابسته است [۲۵]. تشدید اول (f_1)، متناظر با $\frac{\lambda_{gs}}{2}$ (نصف طول موج هدایت شکاف) و تشدید دوم (f_2)، با مکان و طول خط تغذیه و نیز ابعاد شکاف تعیین می‌گردد. شکاف‌های پهن قبلاً به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲۶]. آنتن پایه با فرکانس‌های تشدید $f_1 = 2/81$ GHz، $f_2 = 5/25$ GHz و $f_3 = 10/6$ GHz طراحی شده است. جنس زیر لایه از نوع FR4 با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_r = 4/4$ ، ضخامت $0/8$ mm و تانژانت تلفات $\delta = 0/022$ است. نتایج شبیه‌سازی شده ضریب انعکاس آنتن پایه در شکل (۲) نشان داده شده است. توزیع میدان الکتریکی روی شکاف در سه فرکانس تشدید در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، در f_1 کل طول شکاف ($\phi_1 + \phi_r$) و در f_2 تکه سمت چپ (ϕ_1) نقش مهم‌تری در تشعشع ایفا می‌نمایند (شکل‌های ۳-الف و ب). بنابراین، اگر تنها ϕ_r تغییر کند f_1 تغییر می‌کند (به دلیل تغییر طول شکاف) و f_2 تغییر محسوسی نخواهد داشت. به‌طور مشابه در صورت تغییر ϕ_1 و ثابت ماندن ϕ_r ، f_2 تغییر خواهد کرد. البته f_1 نیز به دلیل کاهش طول کلی شکاف مقداری تغییر می‌کند.



شکل ۷. بردارهای میدان الکتریکی و جریان مغناطیسی روی شکاف در فرکانس f_3 ، الف) بدون برآمدگی و ب) با برآمدگی



شکل ۸. نتیجه شبیه‌سازی اثر برآمدگی بر تشدید سوم (فاصله برحسب mm)

۴. دیود پین

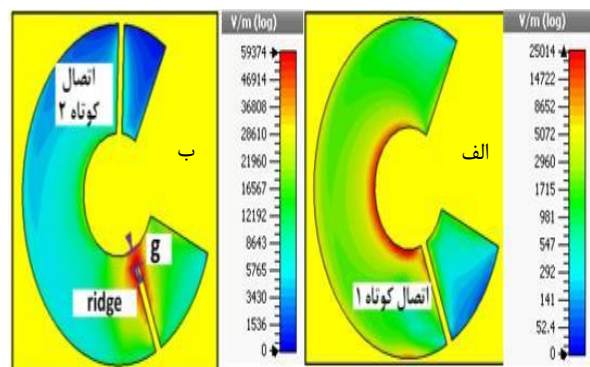
یکی از چالش‌های طراحی آنتن‌های با قابلیت سوئیچ زنی، تأثیر مدل واقعی (پارازیتی)^۱ سوئیچ‌های مورد استفاده بر عملکرد ساختار است. در حالت ایده‌آل، یک سوئیچ در حالت وصل با اتصال کوتاه و در حالت قطع با مدار باز مدل می‌گردد. در نظر گرفتن پارامترهای مدل واقعی سوئیچ، غالباً باعث جابه‌جایی تشدیدها و یا کاهش بهره آنتن می‌گردد. در صورتی که آنتن دارای عملکردهای پهن باند باشد جابه‌جایی تشدیدها ممکن است به قدری باشد که عملکرد پهن باند از بین رفته و تبدیل به باند باریک گردد. در این صورت، لزوم در نظر گرفتن مدل واقعی سوئیچ‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها و تقلیل تأثیر مخرب آن‌ها در صورت وجود، دوچندان می‌گردد.

سوئیچ‌های به کاررفته به منظور تغییر باند کاری در این آنتن، دیود پین از نوع bar50-02v هستند. در حالت وصل، دیود پین معادل یک مدار RL سری و در حالت قطع معادل یک مدار RC موازی سری شده با یک سلف است [۲۸]. مقادیر سلف، خازن و مقاومت با توجه به برگه مشخصات فنی دیود [۲۹] در شکل (۹) نشان داده شده است. چهار دیود مطابق شکل (۱) روی شکاف تعبیه شده است.

بدین منظور لازم است f_2 افزایش و f_3 کاهش یابد. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شد، در صورت کاهش ϕ_1 ، f_2 افزایش می‌یابد. مشابه حالت قبل، کاهش ϕ_1 با اتصال کوتاه شکاف مطابق شکل (۶-ب) محقق می‌گردد. مکان این استاب به نحوی است که همپوشانی دو عملکرد پهن باند به حداقل برسد تا بازه فرکانسی وسیع‌تری تحت پوشش قرار گیرد. برای کاهش f_3 نیز به شکاف مطابق شکل (۶-ب)، برآمدگی اضافه می‌گردد. ملاحظه می‌گردد که در صورت افزایش طول استاب (کاهش g) کاهش می‌یابد. مکان اولیه برای قرار دادن برآمدگی که بیش‌ترین تأثیر را بر f_3 داشته باشد با توجه به شدت میدان الکتریکی روی شکاف در تشدید سوم تعیین می‌گردد. مطابق شکل (۳-ج)، شدت میدان در مکان مشخص شده روی ساختار پایه بیشینه است. دلیل کاهش f_3 با افزایش طول زائده نیز با افزایش طول جریان مغناطیسی روی شکاف قابل توجیه است. جریان مغناطیسی سطحی روی شکاف به صورت

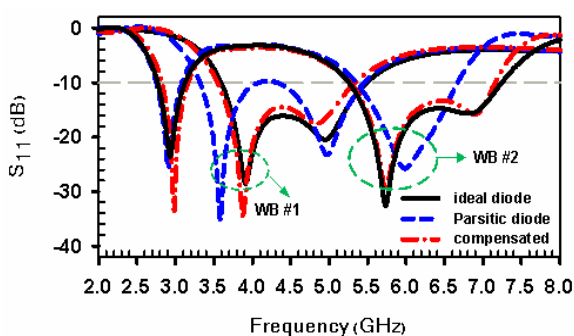
$$\vec{M}_s(\rho, \phi) = -\hat{n} \times \vec{E}(\rho, \phi) \quad (1)$$

تعریف می‌گردد که در آن \vec{E} بردار میدان الکتریکی و \hat{n} بردار عمود بر شکاف است [۲۷]. وقتی شکاف بدون برآمدگی باشد، جهت بردار میدان الکتریکی روی شکاف در فرکانس f_3 به صورت شعاعی است. در نتیجه، جریان مغناطیسی تنها مؤلفه $\hat{\phi}$ خواهد بود (شکل ۷-الف). با ایجاد برآمدگی، بردار میدان الکتریکی علاوه بر مؤلفه شعاعی دارای مؤلفه در جهت $\hat{\phi}$ نیز خواهد بود. در نتیجه، جریان مغناطیسی مؤلفه شعاعی نیز پیدا خواهد کرد (مطابق شکل ۷-ب). هر چه طول برآمدگی بیشتر شود طول مغناطیسی بیشتر شده و f_3 بیشتر کاهش می‌یابد. تأثیر برآمدگی بر تشدید f_3 در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۹. توزیع میدان الکتریکی روی شکاف در حالت‌های پهن باند، الف) پهن باند اول در f_1 و ب) پهن باند دوم در f_3

¹ Parasitic model



شکل ۱۰. شبیه‌سازی ضرایب انعکاس حالت‌های پهن باند با مدل‌های ایده‌آل و پارازیتی دیودها و نیز جبران اثرات پارازیتی

جدول ۱. پارامترهای طراحی بهینه‌شده آنتن پیشنهادی

پارامتر	a (mm)	b (mm)	ϕ_r (deg)	ϕ_l (deg)	ϕ_{ridge1} (deg)	ϕ_{ridge2} (deg)
مقدار	۳/۷	۱۰/۷	۶۷	۲۱۰	۲۲	۱۹۰
پارامتر	w_f (mm)	L_f (mm)	L (mm)	L_o (mm)	W_g (mm)	L_g (mm)
مقدار	۰/۹۵	۹/۲	۱۵/۲	۱	۳۳	۳۶

جدول ۲. حالت‌های پهن باند به همراه وضعیت دیودهای پهن و پهنای باند شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده

حالت‌های پهن باند	اول (WB1)	دوم (WB2)
D_1 D_2 D_3 D_4	۱ ۱ ۰ ۰	۱ ۱ ۱ ۱
پهنای باند شبیه‌سازی (GHz)	۳/۵۴-۵/۳۶ (۴۱٪)	۵/۱۵-۷/۱ (۳۲٪)

۵. حالت‌های باند باریک

در یک آنتن با چند فرکانس تشدید، تنظیم هر یک از فرکانس‌ها به نحوی که سایر فرکانس‌ها جابه‌جا نشود می‌تواند امری چالش برانگیز باشد. زیرا به‌طور معمول با تغییر یک تشدید، سایر تشدیدها جابه‌جا می‌گردند. این قابلیت به‌طور معمول با استفاده از دیودهای و رکتور صورت می‌پذیرد زیرا تغییرات امپدانس ناشی از تغییر خازن دیود به‌صورت پیوسته و به‌طور معمول در بازه‌های محدود انجام می‌گیرد [۳۰]. دیود و رکتور دارای نقاط وضعی مانند نیاز به ولتاژ معکوس بالا (گاهی بیش از ۲۰ ولت [۳۱]) و نیز عدم وجود یک رابطه خطی بین ولتاژ و ظرفیت خازن است و لذا استفاده از آن همواره امکان‌پذیر نیست. همان‌طور که در شکل‌های (۴-۵) نشان داده شد، f_1 و f_2 می‌توانند به‌طور مستقل با پارامترهای ϕ_{ridge1} و ϕ_{ridge2} جابه‌جا شوند. بنابراین، با قطع و وصل کردن دیودها در هر یک از قسمت‌های چپ و راست شکاف می‌توان تشدیدها را به‌طور مستقل جابه‌جا نمود. به‌عنوان مثال، همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، در حالت دوم نسبت به حالت اول که در آن همه دیودها قطع



شکل ۹. مدار معادل دیود پهن، الف) وصل و ب) قطع

در حالت پهن باند اول، دیودهای D_1 و D_2 وصل و دیودهای D_3 و D_4 قطع هستند. نتایج شبیه‌سازی تلفات بازگشتی این حالت به‌ازای مدل‌های ایده‌آل (اتصال کوتاه در حالت وصل و مدار باز در حالت قطع) و پارازیتی دیودها در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، جابه‌جایی تشدیدها با در نظر گرفتن اثر پارازیتی دیودها، عملکرد پهن باند را تقریباً به باند باریک تبدیل کرده است. شکل (۱۰)، نتایج شبیه‌سازی حالت دوم پهن باند با دیودهای D_1 ، D_2 ، D_3 و D_4 روشن و D_1 خاموش را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، به‌ازای مدل پارازیتی دیودها، فرکانس‌های f_2 و f_3 به یکدیگر نزدیک می‌شوند. این امر باعث افت پهنای باند به میزان ۸٪ (۷۰۰ MHz) نسبت به مدل ایده‌آل دیودها می‌گردد. به‌منظور کاهش اثرات پارازیتی دیودها، طراحی به‌نحوی اصلاح می‌گردد که عملکردهای پهن باند به‌ازای مدل واقعی دیودها محقق گردند. نحوه اصلاح به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

اصلاح عملکرد پهن باند اول (WB #1): برای اصلاح این

حالت لازم است فرکانس f_1 افزایش یابد. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شد، این امر با کاهش ϕ_r محقق می‌گردد. لذا با کاهش ϕ_{ridge1} می‌توان f_1 را افزایش داد. در شکل (۱۰) نتیجه شبیه‌سازی عملکرد اصلاح‌شده نشان داده شده است.

اصلاح عملکرد پهن باند دوم (WB #2): برای اصلاح این

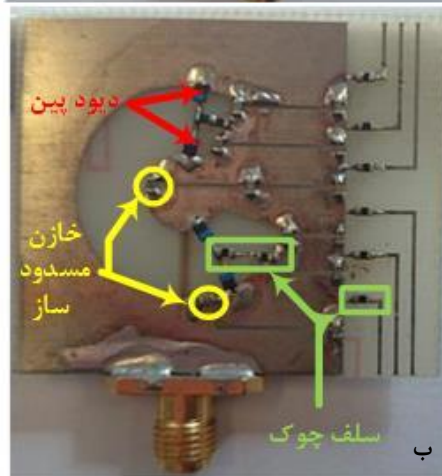
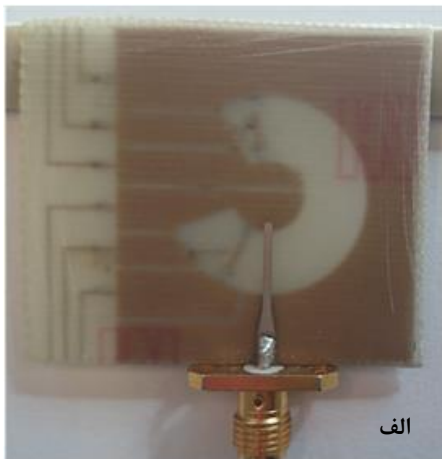
حالت لازم است f_2 کاهش و f_3 افزایش یابد. میزان کاهش برای f_2 حدود ۰/۱ GHz و میزان افزایش برای f_3 ، ۰/۶ GHz است. برای کاهش f_2 ، ϕ_{ridge2} افزایش می‌یابد. برای افزایش f_3 طول گپ افزایش می‌یابد (شکل ۸). همچنین کاهش ϕ_{ridge1} که در اصلاح عملکرد حالت اول به‌کار رفت نیز باعث افزایش f_3 می‌گردد. در شکل (۱۰) نیز نتیجه شبیه‌سازی اصلاح‌شده حالت دوم پهن باند نشان داده شده است. در جدول (۱)، پارامترهای بهینه‌سازی شده آنتن و در جدول (۲)، وضعیت دیودها و نتایج شبیه‌سازی شده حالت‌های پهن باند آورده شده‌اند.

جدول ۳. حالت‌های باند باریک به‌همراه وضعیت دیودهای پین و تشدیدهای شبیه‌سازی‌شده

#	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	تشدیدهای شبیه‌سازی‌شده (GHz) و پهنای باند (%)
۱	۲/۷۶ (%/۱۱/۴) و ۵/۱۷ (%/۱۷/۵)
۲	.	.	.	۱	۲/۸۳ (%/۱۰/۵) و ۴/۸۸ (%/۱۴/۸)
۳	.	۱	.	.	۲/۶۱ (%/۱۰) و ۵/۲۵ (%/۱۵)
۴	.	.	۱	۱	۳ (%/۷/۳) و ۵/۴۶ (%/۱۴/۱)
۵	.	۱	۱	۱	۲/۷۱ (%/۱۰/۶) و ۵/۵۱ (%/۱۵/۵)
۶	.	۱	۱	.	۸/۳ (%/۱۰/۵) و ۵ (%/۱۱/۹)

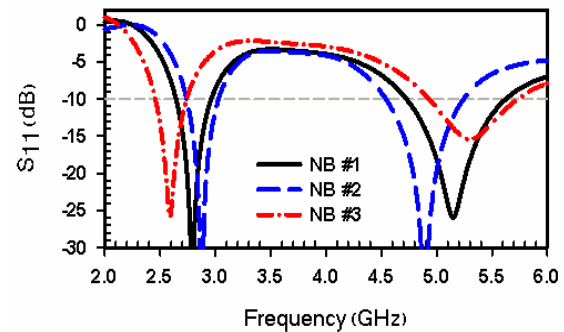
۶. ساخت و نتایج اندازه‌گیری

آنتن ساخته‌شده با در نظر گرفتن خطوط بایاس DC در شکل (۱۴) نشان داده شده است. به‌منظور جداسازی بخش RF (صفحه زمین) از بخش DC (خطوط تغذیه) و همچنین جداسازی کاتد دیودها از صفحه زمین، از سلف‌های ۲۲ nH به‌عنوان چوک^۱ استفاده شده است.



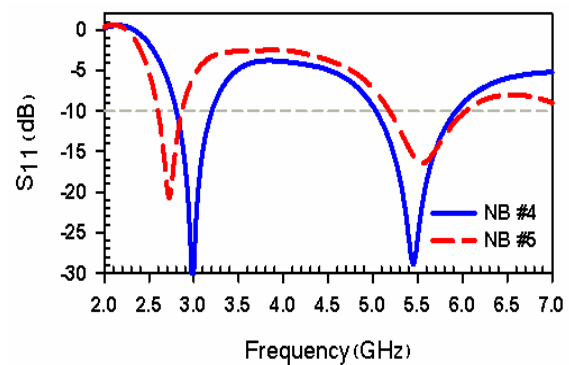
شکل ۱۴. آنتن ساخته‌شده با مونتاژ دیودهای پین و خطوط بایاس، (الف) نمای رو، (ب) نمای زیر

هستند، D_4 وصل شده که در نتیجه آن f_2 جابجا شده است. در حالت سوم با وصل D_2 ، f_1 نسبت به حالت اول جابجا می‌گردد. به‌طور مشابه، در حالت‌های چهارم و پنجم با وصل D_2 که در قسمت راست شکاف قرار گرفته است f_1 جابجا می‌گردد (شکل ۱۲). تمام نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار CST Studio suit انجام گرفته است.

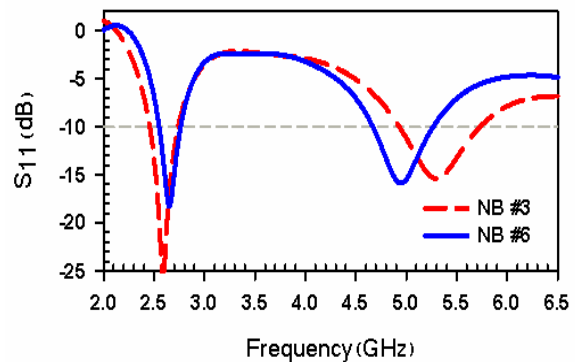


شکل ۱۱. نتایج شبیه‌سازی حالت‌های باند باریک، تنظیم f_2 در حالت‌های اول و دوم و f_1 در حالت‌های اول و سوم

با وصل D_3 در حالت ششم نسبت به حالت سوم نیز f_2 جابجا می‌گردد (شکل ۱۳). در جدول (۳)، وضعیت دیودها و فرکانس‌های تشدید شبیه‌سازی‌شده شش حالت آورده شده‌اند.

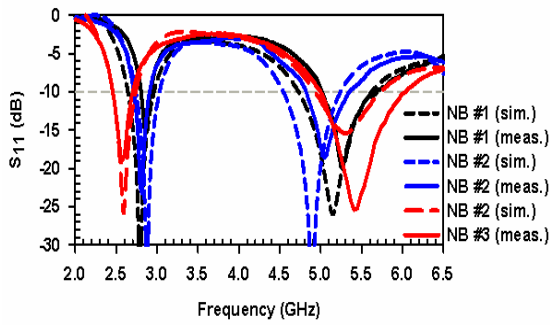


شکل ۱۲. نتایج شبیه‌سازی حالت‌های باند باریک، تنظیم f_1 در حالت‌های چهارم و پنجم

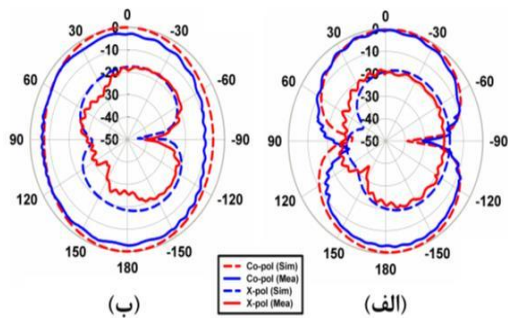


شکل ۱۳. نتایج شبیه‌سازی حالت‌های باند باریک، تنظیم f_2 در حالت‌های سوم و ششم

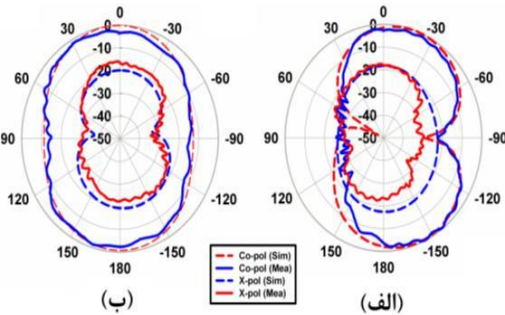
¹ Choke



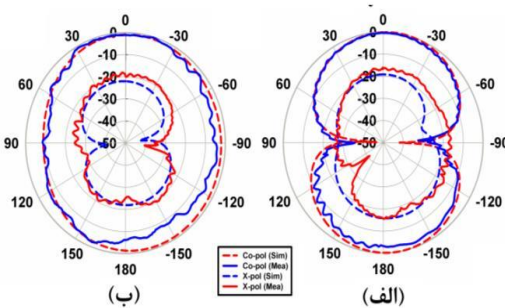
شکل ۱۶. نتایج اندازه‌گیری ضرایب انعکاس حالت‌های باند باریک اول تا سوم



شکل ۱۷. نتایج شبیه‌سازی (خط‌چین) و اندازه‌گیری شده (خط ممتد) الگوی تشعشعی حالت پهن باند اول در فرکانس $f_0 = 4/5$ GHz (الف صفحه E-plane و ب صفحه H-plane)



شکل ۱۸. نتایج شبیه‌سازی (خط‌چین) و اندازه‌گیری شده (خط ممتد) الگوی تشعشعی حالت پهن باند دوم در فرکانس $f_0 = 5/8$ GHz (الف صفحه E-plane و ب صفحه H-plane)



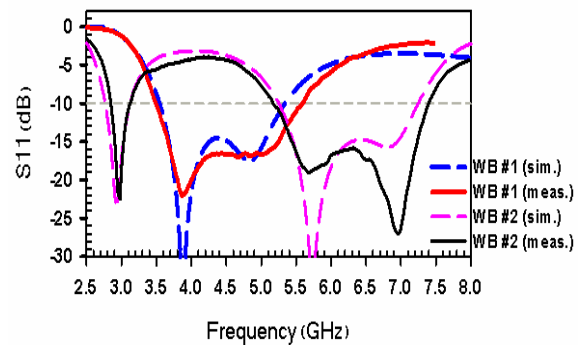
شکل ۱۹. نتایج شبیه‌سازی (خط‌چین) و اندازه‌گیری شده (خط ممتد) الگوی تشعشعی حالت باند باریک دوم در فرکانس $f_1 = 2/77$ GHz (الف صفحه E-plane و ب صفحه H-plane)

به‌منظور امکان تغذیه مستقل دیودها، آندهای آن‌ها از یکدیگر جدا شده‌اند. این امر با ایجاد شکاف‌های باریک به عرض 2 mm در صفحه زمین محقق شده است. از آنجاکه صفحه زمین باید کامل باشد، از خازن‌های مسدودکننده 12 pF استفاده شده است. ابعاد کلی آنتن با در نظر گرفتن خطوط تغذیه $41 \times 36 \text{ mm}^2$ است.

نتایج اندازه‌گیری ضرایب انعکاس آنتن به ازای دو حالت پهن باند در شکل (۱۵) نشان داده و در جدول (۴) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، در حالت اول به‌ازای $S_{11} < -10 \text{ dB}$ ، بازه فرکانسی $3/47-5/48 \text{ GHz}$ (پهنای باند $4/5$) و در حالت دوم $5/2-7/37 \text{ GHz}$ (پهنای باند $2/34$) است.

نتایج اندازه‌گیری ضرایب انعکاس حالت‌های اول تا سوم باند باریک نیز در شکل (۱۶) نشان داده شده و فرکانس‌های تشدید در جدول (۵) آورده شده است. در شکل‌های (۱۷-۱۸)، نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده الگوی تشعشعی آنتن در حالت‌های پهن باند اول و دوم در صفحات E-plane و H-plane و در فرکانس‌های مرکزی به ترتیب $4/5 \text{ GHz}$ و $5/8 \text{ GHz}$ نشان داده شده است. در شکل (۱۹) نیز الگوی تشعشعی حالت باند باریک دوم در $f_1 = 2/77 \text{ GHz}$ نشان داده شده است.

منحنی‌های Axial ratio تمامی حالت‌ها در شکل (۲۰) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، آنتن دارای قطبش خطی است. منحنی‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده بهره به‌ازای حالت‌های پهن باند در شکل (۲۱) نشان داده شده است. مقادیر بهره نیز در جدول (۶) آورده شده است. به‌طور کلی، می‌توان گفت نتایج اندازه‌گیری شده دارای همخوانی با نتایج شبیه‌سازی شده هستند.



شکل ۱۵. نتایج اندازه‌گیری ضرایب انعکاس حالت‌های پهن باند

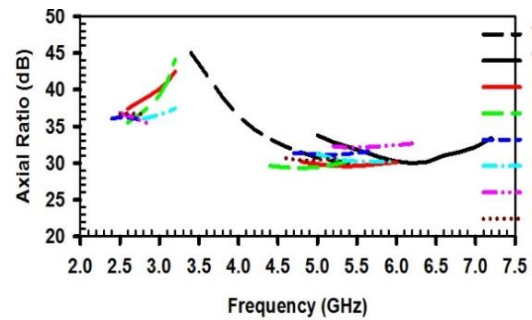
جدول ۴. نتایج اندازه‌گیری حالت‌های پهن باند

حالت‌های پهن باند	اول (WB1)	دوم (WB2)
$D_2 D_3 D_4 D_1$	۱ ۱ ۰ ۰	۰ ۱ ۱ ۱
پهنای باند اندازه‌گیری (GHz)	$3/47-5/48$ ($4/5$)	$5/2-7/37$ ($2/34$)

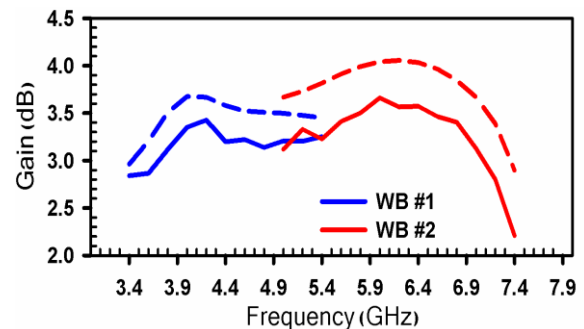
¹ Blocker

۸. مراجع

- [1] Nguyen-Trong, N.; Fumeaux, C. "Tuning Range and Efficiency Optimization of a Frequency-Reconfigurable Patch Antenna" IEEE Antennas & Wireless Propag. Lett. 2018, 17, 150-154.
- [2] Lu, Z. L.; Yang, X. X.; Tan, G. N. "A Multidirectional Pattern-Reconfigurable Patch Antenna with CSRR on the Ground"; IEEE Antennas & Wireless Propag. Lett. 2017, 16, 416-419.
- [3] Lin, W.; Wong, H. "Wideband Circular Polarization Reconfigurable Antenna"; IEEE Trans. Antennas & Propag. 2015, 63, 5938-5944.
- [4] Shirazi, M.; Huang, J.; Li, T.; Gong, X. "A Switchable-Frequency Slot-Ring Antenna Element for Designing a Reconfigurable Array"; IEEE Antennas & Wireless Propag. Lett. 2018, 17, 229-233.
- [5] Wright, M. D.; Baron, W.; Miller, J.; Tuss, J.; Zeppitella, D.; Ali, M. "MEMS Reconfigurable Broadband Patch Antenna for Conformal Applications"; IEEE Trans. Antennas & Propag. 2018, 66, 2770-2778.
- [6] Jouade, A.; Himdi, M.; Chauloux, A.; Colombel, F. "Mechanically Pattern-Reconfigurable Bended Horn Antenna for High-Power Applications"; IEEE Antennas & Wireless Propag. Lett. 2017, 16, 457-460.
- [7] Tang, X.; Khodasevych, I. E.; Rowe, W. S. T. "Reconfigurable Split-Ring Resonators Using Pneumatic Levitation System"; IEEE Trans. Antennas & Propag. 2018, 66, 763-770.
- [8] Da Costa, I. F.; Cerqueira, A.; Spadoti, D. H.; da Silva, L. G.; Ribeiro, J. A. J.; Barbin, S. E. "Optically Controlled Reconfigurable Antenna Array for mm-Wave Applications"; IEEE Antennas & Wireless Propag. Lett. 2017, 16, 2142-2145.
- [9] Wang, C.; Yeo, J. C.; Chu, H.; Lim, C. T.; Guo, Y. X. "Design of a Reconfigurable Patch Antenna Using the Movement of Liquid Metal"; IEEE Ant. & Wireless Propag. L. 2018, 17, 974-977.
- [10] Bayat, M.; Madani, M. H. "Design and Simulation of a Linear Adaptive System to Remove the CWI in Loran Navigation System Receivers"; Adv. Defence Sci. & Technol. 2018, 04, 267-277.
- [11] Stasiak, K.; Ciesielski, M.; Kurowska, A.; Przybysz, W. "A Study on using Different Kinds of Continuous-Wave Radars Operating in C-Band for Drone Detection"; Proc. International Microwave and Radar Conference, MIKON, Poznan, Poland, 2018, 521-526.
- [12] Qin, F.; Gao, S.; Luo, Q.; Mao, C.; Gu, C.; Wei, G; Xu, J.; Li, J.; Wu, C.; Zheng, K.; Zheng, S. "A Simple Low-Cost Shared-Aperture Dual-Band Dual-Polarized High-Gain Antenna for Synthetic Aperture Radars"; IEEE Trans. Antennas & Propag. 2016, 64, 2914-2922.
- [13] Ndini, K.; Gromek, D.; Wielgo, M.; Sameczyński, P.; Malanowski, M. "C-Band FMCW Radar Analogue-Front-End for SAR/ISAR Applications"; Proc. Signal Processing Symposium, Debe, Poland, 2015, 1-5.
- [14] Eldek, A.; Elsherbeni, A. Z.; Smith, C. E. "Wide-Band Modified Printed Bow-Tie Antenna with Single and Dual Polarization for C - and X-Band Applications"; IEEE Trans. Antennas & Propag. 2005, 53, 3067-3072.
- [15] Wang, S.; Zhu, L.; Wu, W. "A Novel Frequency-Reconfigurable Patch Antenna Using Low-Loss Transformer Oil"; IEEE Trans. Antennas & Propag. 2017, 65, 7316-7321.



شکل ۲۰. نمودار Axial ratio حالت‌های پهن باند و باند باریک



شکل ۲۱. نتایج شبیه‌سازی (خط چین) و اندازه‌گیری شده (خط ممتد) بهره حالت‌های پهن باند

جدول ۶. مقادیر بهره شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده حالت‌های پهن باند

حالت پهن باند	بهره شبیه‌سازی (dBi)	بهره اندازه‌گیری (dBi)
۱	۲/۹۵-۳/۷	۲/۸۴-۳/۴۲
۲	۲/۹-۴	۲/۲-۳/۶۶

جدول ۵. ضرایب انعکاس اندازه‌گیری شده سه حالت باند باریک و پهنای باند

#	تشدیدهای اندازه‌گیری شده (GHz) و پهنای باند (%)
۱	۲/۸۷ (%/۴/۷) و ۵/۲۸ (%/۱۲/۵)
۲	۲/۷۷ (%/۷/۸) و ۵ (%/۱۰/۴)
۳	۲/۵۸ (%/۹/۷) و ۵/۴ (%/۱۸/۱)

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک آنتن از نوع شکاف با قابلیت سوئیچ فرکانسی با ابعاد کلی $41 \times 36 \text{ mm}^2$ (با در نظر گرفتن خطوط پایاس) با ساختاری ساده و ارزان برای کاربرد در شبکه‌های بی‌سیم پیشنهاد و نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده آن ارائه گردید. برای نخستین بار ترکیبی از دو حالت پهن باند و حالت‌های باند باریک (شش حالت) با گستره فرکانسی $2/58-7/37 \text{ GHz}$ محقق گردید. همچنین، اثرات پارازیتی دیوهای مورد استفاده بررسی و تا حد قابل قبولی جبران گردید. قابلیت تغییر فرکانس علاوه بر افزایش قابلیت آنتن و در واقع تجمیع چند آنتن در یک ساختار امکان مصون ماندن از اختلال و نویز را فراهم می‌آورد.

- [24] Danesh, S.; Rahim, S.K.A.; Abedian, M.; Khalily, M.; Hamid, M.R. "Frequency-Reconfigurable Rectangular Dielectric Resonator Antenna"; IEEE Antennas & Wireless Propag. Lett. 2013, 12, 1331-1334.
- [25] Garg, R.; Bhartia, P.; Bahl, I.; Ittipiboon, A. "Microstrip Antenna Design Handbook"; Norwood, M.A. USA, Artech House, 2001, 441-448.
- [26] Kahrizi, M.; Sarkar, T. K.; Maricevic, Z. A. "Analysis of a Wideradiating Slot in the Ground Plane of a Microstrip Line"; IEEE Trans. Micro. Theory & Technol. 1993, 41, 29-37.
- [27] Balanis, C. A. "Antenna Theory: Analysis and Design"; Wiley, 1996, 575-644.
- [28] Yi, X.; Huitema, L.; Wong, H. "Polarization and Pattern Reconfigurable Cuboid Quadrifilar Helical Antenna"; IEEE Trans. Antennas & Propag. 2018, 66, 2707-2715.
- [29] Infineon, Tech. PIN Diode BAR50-02V Datasheet, 2013.
- [30] Ge, L.; Li, M.; Wang, J.; Gu, H. "Unidirectional Dual-Band Stacked Patch Antenna with Independent Frequency Reconfiguration"; IEEE Antennas & Wireless Propag. Lett. 2017, 113-116.
- [31] Zhang, L.; Zhang, S.; Liu, Y.; Liu, Q. H. "Broadband Tunable Frequency Selective Surface for Steerable Antenna Applications"; IEEE Trans. Antennas & Propag. 2016, 64, 5496-5500.
- [16] Han, L.; Wang, C.; Chen, X.; Zhang, W. "Compact Frequency-Reconfigurable Slot Antenna for Wireless Applications"; IEEE Antennas & Wireless Propag. Lett. 2016, 15, 1795-1798.
- [17] Yang, X. L.; Lin, J. C.; Chen, G.; Kong, F. I. "Frequency Reconfigurable Antenna for Wireless Communications Using Gaas FET Switch"; IEEE Antennas & Wireless Propag. Lett. 2015, 14, 807-810.
- [18] Sim, C. Y. S.; Han, T. Y.; Liao, Y. J. "A Frequency Reconfigurable Half Annular Ring Slot Antenna Design"; IEEE Trans. Antennas & Propag. 2014, 62, 3428-3431.
- [19] Nassar, I. T.; Weller, T. M.; Lusk, C. P. "Radiating Shape-Shifting Surface Based on a Planar Hoberman Mechanism"; IEEE Trans. Antennas & Propag. 2013, 2861-2864.
- [20] Chen, G.; Yang, X.; Wang, Y. "Dual-Band Frequency-Reconfigurable Folded Slot Antenna for Wireless Communications"; IEEE Antennas & Wireless Propag. Lett. 2012, 11, 1386-1389.
- [21] Bitchikh, M.; Mokhtari, M.; Rili, W. "Switchable UWB/Narrowband/Bi-Bands Octagonal Antenna using PIN diodes"; Electronics Lett. 2018, 54, 480-482.
- [22] Tang, M. C.; Wen, Z.; Wang, H.; Li, M.; Ziolkowski, R. W. "Compact, Frequency-Reconfigurable Filtenna with Sharply Defined Wideband and Continuously Tunable Narrowband States"; IEEE Trans. Antennas & Propag. 2017, 65, 5026-5034.
- [23] Qin, P. Y.; Wei, F.; Guo, Y. J. "A Wideband-to-Narrowband Tunable Antenna using a Reconfigurable Filter"; IEEE Trans. Antennas & Propag. 2015, 63, 2282-2285.