

مجله علمی ترویجی «دانش غیرعالم»

سال یازدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹، (پیاپی ۴۳): صص ۲۷-۳۷

علمی - ترویجی

روش‌های کاهش سطح مقطع راداری برای آنتن‌های ریزنواری

مرتضی محمدی^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۸

چکیده

فناوری نهان‌سازی یکی از روش‌های مهم در محفوظ ماندن جنگنده‌ها و کشتی‌های نظامی در سرزمین دشمن به شمار می‌رود. یکی از روش‌های فناوری نهان‌سازی، کاهش سطح مقطع راداری (RCS) آنتن‌های مورد استفاده در رادارهای این جنگنده‌ها و کشتی‌ها می‌باشد. در این تحقیق، به روش‌های کاهش سطح مقطع راداری برای آنتن‌های ریزنواری و تاثیر این روش‌ها روی عملکرد آن‌ها پرداخته شده است. در ابتدا به تعریف و روابط حاکم بر سطح مقطع راداری و اهمیت کاهش آن پرداخته شده است. سپس شش روش اصلی کاهش سطح مقطع راداری برای آنتن‌های ریزنواری در این گزارش آورده شده است. این شش روش عبارت‌اند از: شکل‌دهی آنتن، شکاف باند الکترونیکی (EBG)، تشدیدگرهای حلقوی شکاف‌دار مکمل (CSRR)، صفحه زمین با سطوح انتخابگر فرکانسی (FSS)، ساختار فرامواد جذب (MMA)، تشدیدگرهای ریزنواری. در هر بخش به مقایسه نمودار سطح مقطع راداری (RCS) آنتن‌های مرجع و آنتن‌های تغییر یافته برای کاهش RCS پرداخته شده است. مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها در بخش‌های مربوطه بیان شده است.

کلید واژه‌ها: سطح مقطع راداری، آنتن ریزنواری، شکاف باند الکترونیکی، سطوح انتخابگر فرکانس، فرامواد

^۱ استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه هوایی شهید ستاری - (m.mohammadi@ssau.ac.ir) - نویسنده مسئول

۱- مقدمه

فناوری نپان‌سازی که ماندگاری هواپیماهای جنگنده، کشتی‌های جنگی و وسایل نقلیه را در سرزمین دشمن افزایش می‌دهد، به شدت مورد توجه قرار گرفته است، زیرا به طور مستقیم به پیروزی یا شکست در جنگ مربوط می‌شود. فناوری نپان‌سازی شامل کاهش امواج صوتی، نوری، مادون قرمز و الکترومغناطیسی است. فراتر از همه این موارد، روش‌های کاهش سطح مقطع راداری (RCS)، که تشخیص و رهگیری را برای رادار دشمن کاهش می‌دهد، به یک موضوع پژوهشی مهم و جالب تبدیل شده است [۱۲-۱].

اکثر هواپیماهای نظامی برای جلوگیری از تشخیص توسط سیستم‌های راداری دشمن نیاز به سطح مقطع راداری کوچک دارند. به منظور ساخت یک هواپیمای رادار گریز، مانند F-117، B-2 و F-22، روش‌های طراحی قابل توجه‌ای بر اساس شکل هندسی و ساختارها یا مواد جاذب راداری (RAM/RAS) استفاده می‌شود تا RCS این جنگنده‌ها را کاهش دهد [۱۳]. برای این جنگنده‌ها، سیستم ورودی هوا، سایبان خلبان و موشک‌ها عامل مهمی برای افزایش سطح مقطع راداری می‌باشند. با این حال، این افزایش RCS را می‌توان با استفاده از روش‌های رایج از قبیل طراحی شکل هندسی، RAM یا RAS کاهش داد.

آنتن‌ها سهم زیادی در افزایش RCS کلی یک هواپیمای رادار گریز دارند. با این حال، روش‌های جاذب راداری معمولی (RAM/RAS) را نمی‌توان به آنتن‌های هواپیما اعمال کرد، زیرا آن‌ها به شدت عملکرد آنتن را کاهش می‌دهند. در نتیجه، آنتن‌ها تنها تجهیزاتی هستند که نمی‌توانند RCS خود را در طول عملیات کاهش دهند [۱۴]. مطابق مراجع [۱۵]، [۱۶] مقدار RCS به‌وضوح به تعدادی از متغیرها، از قبیل فرکانس اندازه‌گیری، زاویه دید، شکل، نوع، جنس، و قطبیدگی آنتن وابستگی زیاد دارد. علاوه بر این، آنتن‌های نصب شده اثرات قابل توجهی بر RCS اهداف دارند. بنابراین، RCS آنتن را نمی‌توان نادیده گرفت و امکان افزایش RCS یک هواپیمای رادار گریز را بالا می‌برد.

بسیاری از روش‌ها برای کاهش RCS آنتن قبلاً پیشنهاد شده و توسعه یافته‌اند، که هرکدام دارای مزایای خاص خود است. با این حال، این روش‌ها به دلیل فداکاری عملکرد آنتن، از قبیل تلفات بازگشتی، پهنای باند، الگوی تابش، راندمان و کارایی استفاده نشده است [۱۷]. در این مطالعه، ما به بیان روش‌هایی برای کاهش RCS می‌پردازیم که از بازدهی آنتن در حد امکان کاسته نشود. هدف از ارائه این مقاله، گزارش دادن امکان توسعه آنتن‌های ریزنواری برای کاربردهای نظامی، مانند استفاده در یک هواپیما و کشتی جنگی رادارگریز است.

۲- تعریف سطح مقطع راداری و اهمیت آن

زمانی که یک موج الکترومغناطیسی با یک منبع برخورد می‌کند، انرژی تابیده شده به مانع در راستاهای مختلف پراکنده می‌شود. توزیع فضایی انرژی به شکل، اندازه و ترکیب مواد مانع و فرکانس موج تابیده شده بستگی دارد. این توزیع انرژی را پراکنش گویند و مانع را معمولاً هدف می‌نامند.

زمانی که امواج پراکنده شده به سمت منبع تابش باز نگرند، آن‌را bistatic scattering گویند و زمانی که امواج تابیده شده پس از برخورد با مانع به سمت منبع تابش باز گردند آن‌را monostatic scattering گویند. اما علاوه بر راستای پراکنش انرژی و توزیع فضایی آن، تغییرات دیگری نیز حاصل می‌شود. معمولاً موج تابیده شده علاوه بر پراکنش در راستاهای مختلف دچار تغییرات در قطبش، تضعیف و یا حتی دگرسوایی در فرکانس می‌شود که بر سیگنال دریافتی اثر می‌گذارد. معمولاً قطبیدگی موج پراکنش به دو نوع مختلف تقسیم می‌شود. یک نوع قطبیدگی را قطبیدگی اصلی و دیگری را قطبیدگی متعامد گویند. در حالت کلی آن بخش از انرژی بازتابیده شده که درای قطبیدگی مشابه آنتن گیرنده است، قابل بهره‌برداری می‌باشد، بنابراین در محاسبه RCS صورت حساب عدم تطبیق قطبیدگی نیز باید در نظر گرفته شود [۱۸].

بر اساس استاندارد IEEE برای پراکنش ناشی از برخورد یک موج صفحه‌ای مسطح با یک جسم و در صورتی که موج پراکنده شده دارای قطبیدگی برابر قطبیدگی گیرنده باشد، RCS به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{P_s}{P_i} \quad (1)$$

به طوری که P_s توان بازتاب شده از هدف در واحد سطح، P_i توان تابش شده به هدف در واحد سطح و r فاصله هدف تا گیرنده می‌باشد. σ دارای واحد متر مربع (m^2) است که معمولاً بر حسب dBsm بیان می‌شود. چنانچه هدف در میدان دور آنتن گیرنده واقع شده باشد [۱۸]:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \left| \frac{E^s}{E^i} \right|^2 = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \left| \frac{H^s}{H^i} \right|^2 \quad (2)$$

که در آن، E^i و H^i میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تابشی و E^s و H^s میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی پراکنده شده توسط هدف هستند. در محاسبه سطح مقطع راداری از هدف می‌توان فرض نمود که میدان تابیده شده به هدف یک موج صفحه‌ای مسطح است. بر این اساس موج تولید شده توسط منبع

که در آن، \hat{r} بردار واحد از هدف تا گیرنده و E^i بردار واحد قطبیدگی موج تابیده شده به هدف است. در نهایت با توجه به روابط (۵) و (۶) خواهیم داشت:

$$\sigma = \sigma_{\parallel} + \sigma_{\perp} \quad (7)$$

که در آن، RCS کل در گیرنده برابر مجموع RCS موازی و عمودی است. نقش پارامتر σ را در معادله رادار و در توان دریافتی توسط گیرنده می‌توان مشاهده نمود. بر اساس معادله رادار [۱۹]:

$$P_R = \left[\left(\frac{P_T G_T}{4\pi R_T^2} \right) \cdot \frac{1}{L_{MT} L_T} \right] \cdot \left[\left(\frac{\sigma}{4\pi R^2} \right) \cdot \frac{1}{L_{MR} L_R} \right] \cdot \left(\frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \right) \cdot \frac{1}{L_P} \quad (8)$$

که در آن، P_R توان دریافتی، P_T توان ارسالی، G_R بهره آنتن گیرنده، G_T بهره آنتن فرستنده، L_R صورت حساب تلف در کانال گیرنده، L_T صورت حساب تلف در کانال فرستنده، L_{MR} تلفات محیط ناشی از مواد تشکیل دهنده بین گیرنده و هدف، L_{MT} تلفات محیط ناشی از مواد تشکیل دهنده بین فرستنده و هدف، L_P صورت حساب تلف ناشی از عدم تطبیق قطبیدگی بین فرستنده و گیرنده (در حالتی که آنتنها یکی هستند) به دلیل چرخش فواره و به هم ریختگی قطبیدگی در مورد موج تابش و بازتابش، R فاصله بین هدف و گیرنده، R_T فاصله بین فرستنده و هدف می‌باشند.

با پیشرفت تکنولوژی نهم‌سازی کاهش سطح مقطع راداری (RCSR) در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه واقع شده است. آنتن بعنوان یک پراکنده ساز خاص، سهم قابل توجهی در سطح مقطع راداری یک قطعه با سطح صاف کوچک، از قبیل پهپادها و کشتی‌ها دارد. بنابراین کاهش سطح مقطع راداری برای آنتن یک امر ضروری و واجب است.

آنتن‌های ریزنواری به دلیل اندازه کوچک، وزن پایین و ساخت آسان، مصارف نظامی زیادی دارند. در نتیجه این گونه آنتن‌ها برای کاربردهای ارتباطی و راداری روی هواپیما، کشتی و .. نصب می‌شوند. پس آنتن ریزنواری می‌تواند بعنوان پراکنده ساز عمل کند. پس برای کاهش سطح مقطع راداری اهداف، کاهش سطح مقطع راداری آنتن نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به هر حال آنتن ریزنواری یک سطح مقطع راداری قابل توجه از نوع monostatic دارد که به آسانی قابل آشکار سازی هست. بنابراین کاهش سطح مقطع راداری برای آنتن مایکرواستریپی ضروری است. در چند دهه اخیر تعدادی راه کار برای کاهش سطح مقطع راداری آنتن ارائه شده که عبارت اند از: شکل دادن آنتن، مواد

می‌تواند یک موج کروی، بیضوی و یا مسطح باشد، اما این موج در گذر از واحد سطح فضایی در فاصله دور و در گذر از یک صفحه مسطح هم فاز خواهد بود که این مفهوم همان موج صفحه‌ای مسطح است و لذا از این به بعد در محاسبات خود موج برخوردی را در محل هدف از نوع صفحه‌ای مسطح در نظر خواهیم گرفت.

معمولا رابطه (۲) به عنوان تعریف RCS شناخته می‌شود. به علت بزرگ بودن شعاع (فاصله منبع از هدف) مقدار RCS مستقل از r می‌باشد ولی به پارامترهای نظیر فرکانس، ابعاد هدف، شکل، مواد سازنده (ترکیبات سازنده هدف)، شکل هندسی، راستای پراکندگی موج از هدف و قطبیدگی‌های تابیده شده و دریافت شده، در یک جمله به چگونگی توزیع توان موج تابیده شده و بازتابیده شده در اطراف هدف بستگی دارد.

به‌طور عمومی، موج بازتابیده شده از هدف ناشی از یک صفحه تابیده شده با دامنه واحد به یک هدف از نظر یک مشاهده کننده که در فاصله دور از هدف قرار دارد بصورت زیر قابل بیان است [۱۸]:

$$E^s = S \frac{e^{-jkr}}{kr} \quad (3)$$

که در آن، k و λ به ترتیب ثابت انتشار و طول موج در محیط می‌باشد. S یک تابع برداری بدون بعد و مختلط است که تابعی از زاویه تابش، مشخصات هدف و قطبیدگی موج تابش است. تابع S به r بستگی ندارد، اما بر r متعتمد است و به عنوان تابع پراکندگی شناخته می‌شود و E^s موج برگشتی از هدف می‌باشد. محاسبه دقیق و تحلیلی S کاری بسیار پیچیده و دشوار و در برخی موارد ناممکن است و تنها برای برخی از اشکال ساده هندسی قابل محاسبه است و برای سایر موارد از طریق روش‌های عددی محاسبه می‌گردد. چنانچه موج تابیده شده E^i دارای قدرت واحد باشد، با توجه به رابطه‌های (۲) و (۳):

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{\pi} |S|^2 \quad (4)$$

بر اساس اینکه قطبیدگی موج بازتابیده شده موازی موج تابیده شده باشد یا اینکه بر آن عمود باشد، دو نوع RCS تعریف می‌شود که آنها را RCS های موازی و متعامد گویند [۷].

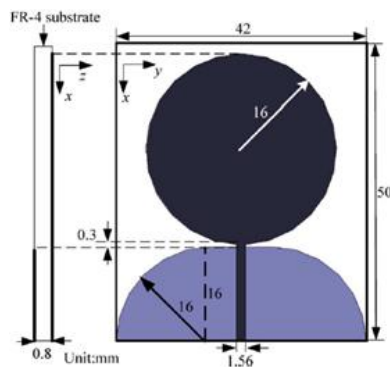
$$\sigma_{\parallel} = \frac{\lambda^2}{\pi} |S \cdot E^i|^2 \quad (5)$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{\lambda^2}{\pi} |S \cdot \hat{r} \times E^i|^2 \quad (6)$$

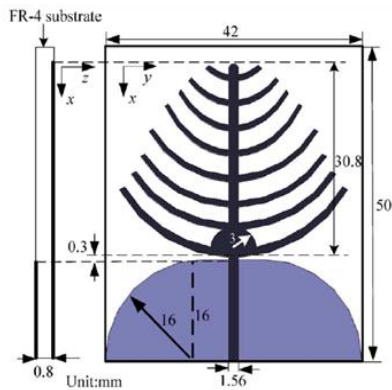
آنتن، موی حساس جانور، یا یک عضو احساس کننده، که در شکل (۱) نشان داده شده است؛ می‌تواند به حشره کمک کند تا اطلاعات خارجی را بهتر دریافت کرده و تعادل خودش را حفظ کند. در این بخش یک آنتن مشابه شاخک حساس حشرات (insect tentacle antenna (ITA)) بر اساس شکل ارگان حساس حشرات طراحی می‌شود تا اینکه تاثیر علم فرایند زیستی را روی کاهش سطح مقطع راداری نشان دهد. تعداد زیادی مدل بیونیکی وجود دارد که می‌تواند برای طراحی آنتن به این منظور استفاده شود [۲۷].



شکل (۱): برخی از عکس‌های بیولوژیکی.



(الف)



(ب)

شکل (۲): هندسه آنتن‌های، الف) PCDMA و ب) ITA

در این بخش مقدار RCS دو آنتن ITA و مونوپل دیسک

جذب کننده (RAM)، المان حذف کننده فعال و غیر فعال (passive and active cancellation) [۱۹-۲۲]. شکل دادن سطوح آنتن برای کاهش سطح مقطع راداری معمولاً از ترفند انحراف انرژی از جهت آشکار کننده عمل می‌کند (بعنوان تکنولوژی ریدوم) [۲۳-۲۵] یا مساحت پراکنده‌ساز کاهش می‌دهد [۲۶-۲۷].

سطح مقطع راداری کلی یک آنتن بر حسب مولفه‌های مدی ساختار و مولفه‌های مدی آنتن تعیین می‌شود. سطح مقطع راداری کلی به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹ و ۲۸]:

$$\sigma = \left| \sqrt{\sigma_s} - (1 - \Gamma_a) \sqrt{\sigma_a} e^{j\phi} \right|^2 \quad (9)$$

جایی که: σ سطح مقطع راداری کلی آنتن، σ_s پراکندگی مد ساختاری، σ_a پراکندگی مد آنتن، Γ_a ضریب انعکاس وابسته به عدم تطبیق، و ϕ فاز نسبی بین دو مولفه σ_a و σ_s می‌باشد.

معادله (۹) نشان می‌دهد که کاهش سطح مقطع راداری می‌تواند به وسیله کاهش دادن مد آنتن (σ_a) یا مد ساختاری (σ_s) صورت پذیرد. به هر حال، کاهش دادن مد آنتن برای یک آنتن مشخص مشکل است. بنابراین، برای کاهش سطح مقطع راداری آنتن‌ها به صورت عمده از کاهش مد ساختار استفاده می‌شود.

۳- روش‌های کاهش RCS آنتن‌ها

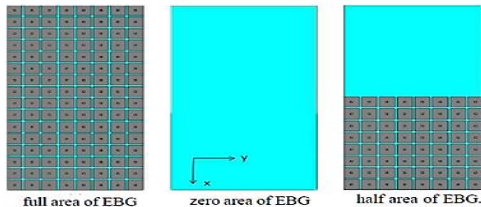
در این بخش روش‌های کاهش RCS آنتن‌های ریز موج بررسی شده است.

۳-۱- کاهش RCS از طریق شکل دادن آنتن

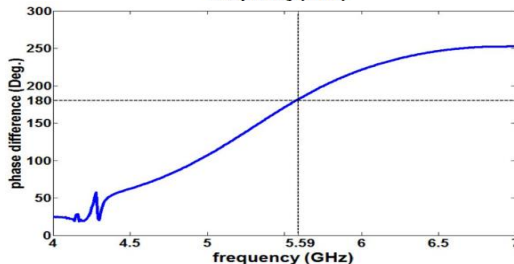
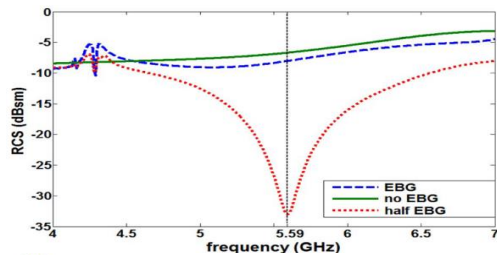
روش‌های بیولوژیکی و سیستم‌های یافت شده در طبیعت می‌تواند برای مطالعه و طراحی سیستم‌های مهندسی و فناوری مدرن به کار برده شود، که از آن مفهوم مصنوعی (bionic) استخراج شده است. استفاده از علم فرایند زیستی در سازه‌های مصنوعی قابل توصیف است (این به دلیل این است که استفاده از شکل تکاملی موجودات زنده به‌طور معمول موجب راندمان و بهینه‌سازی بیشتر می‌شوند). تجربیات و آزمایشات نشان داد که مرغ دریایی دارای ۲۰۰ برابر سطح مقطع راداری بزرگتر نسبت به گاو پرند (cowbird) هست، در حالی که آن‌ها هم اندازه هستند. اما سطح مقطع راداری یک زنبور عسل ۱۶ برابر بزرگتر از یک گنجشک است. این مفهوم علم فرایند زیستی در کاربردهای زیادی به‌طور گسترده و موفقیت‌آمیزی استفاده شده است. پس با این وجود، یک دلیل برای این که باور کنیم که علم فرایند زیستی می‌تواند برای کنترل سطح مقطع راداری آنتن به کار برده شود وجود دارد. در قلمرو حیوانات ارگان لمسی یا حسی، از قبیل

مصنوعی عمل می‌کند (AMC) که ضریب انعکاس آن برابر ۱ است در حالیکه PEC ضریب انعکاسش برابر ۱- است. بنابراین، ترکیب این دو نوع هادی باعث می‌شود امواج انعکاس یافته همدیگر را حذف کنند. پس به RCS خوبی می‌رسیم. نوع دیگری از ساختار پررودیک، سطوح انتخابگر فرکانس (FSS) نیز برای کاهش RCS خارج محدوده فرکانس کاری آنتن به کار می‌رود. اما آن مشکل است تا RCS با FSS در همان فرکانس کاری کاهش داده شود [۲۹].

انواع مختلفی از زیر لایه در شکل (۴) نشان داده شده است که به ترتیب شامل ساختارهای EBG روی قسمت بالایی زیر لایه با مساحت کامل، نصف مساحت و مساحت صفر می‌باشد. طرف دیگر زیر لایه بوسیله صفحه زمین پوشیده شده است. شکل (۵) نتایج شبیه سازی سطح مقطع راداری monostatic سه ساختار شکل (۴) را نشان می‌دهد (نتایج CST). همان گونه که از شکل مشاهده می‌شود وقتی که فرکانس نزدیک ۵/۵۹ گیگاهرتز می‌شود، RCS ساختار با پوشش نصف EBG به کمینه مقدار خود می‌رسد. این به خاطر این است که در فرکانس ۵/۵۹ گیگاهرتز اختلاف فاز موج بازگشتی در جهت Z از ساختار با EBG و بدون EBG دارای ۱۸۰ درجه می‌باشد (شکل ۵). بنابراین آن ممکن است که برای ساختار با نصف EBG موج انعکاسی از قسمت‌های متفاوت هم دیگر را خنثی کنند. به وسیله این روش، RCS آنتن آرایه پچ با ساختار EBG می‌تواند کاهش یابد.



شکل (۴): سه نوع متفاوت از زیر لایه.



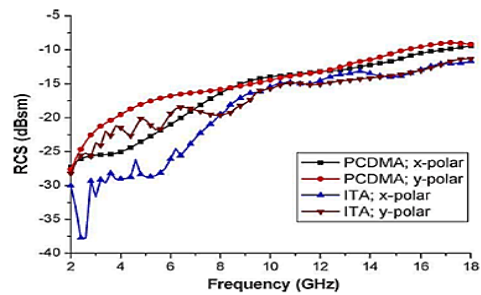
شکل (۵): نتایج RCS حاصل از این سه زیر لایه و اختلاف فاز بین ساختار با EBG و بدون EBG.

مانند دایروی چاپ شده (printed circular-disc monopole antenna) (PCDMA) که در شکل (۲) نشان داده شده مقایسه می‌شوند. این دو آنتن از نظر پهنای باند امیدانسی و پترن مشابه هم هستند. همان گونه که مشاهده می‌شود آنتن ITA بر اساس ارگان حسی حشره می‌باشد که دارای ۸ کمان پچ می‌باشد. هر یک از این کمان‌های پچ دارای عرض ۱ میلی‌متر می‌باشند. این کمان‌های پچ در امتداد محور X از شماره ۱ تا ۸ در جهت افزایش مقدار X مرتب شده‌اند. فاصله بین پچ‌های مجاور ۳ میلی‌متر است. شعاع و زاویه مرکزی هر کمان در جدول (۱) آورده شده است. هر یک از این کمان‌ها متقارن هستند.

جدول (۱): شعاع و زاویه مرکزی هر کمان پچ آنتن ITA.

شماره پچ	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
شعاع (mm)	۶	۹	۹	۱۱	۱۶	۱۸	۱۹.۵	۲۰.۶
زاویه (deg)	۸۴	۱۰۴	۱۳۴	۱۴۲	۱۱۴	۱۰۸	۱۱۰	۱۱۸

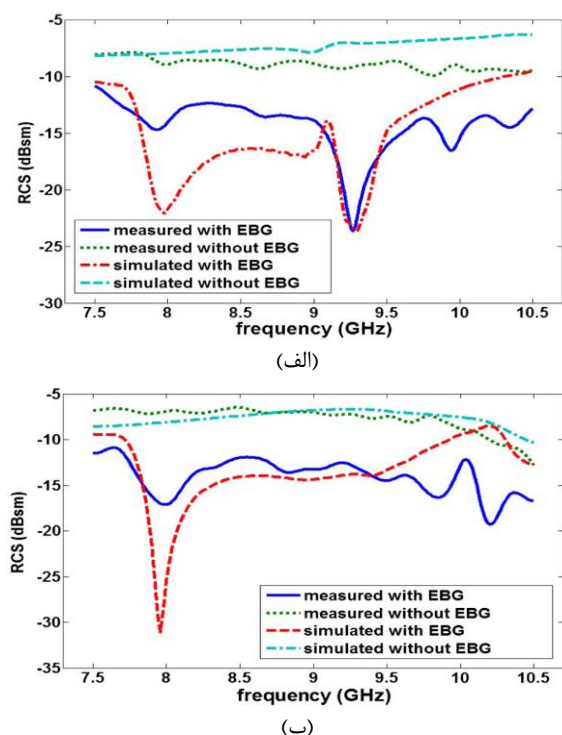
مقدار RCS دو آنتن تحت شرایطی که ورودی آن‌ها به بار تطبیق شود در شکل (۳) نشان داده شده است. این شکل شامل دو قطبیدگی یعنی میدان تابشی در جهت موازی با محور X و Y می‌باشد. جهت انتشار موج در جهت محور Z می‌باشد، جایی که بیشینه مقدار RCS اتفاق می‌افتد. همان طور که مشاهده می‌شود RCS آنتن ITA در کل محدوده فرکانسی UWB کمتر از آنتن PCDMA است [۲۷]. دلیل این کاهش RCS برای آنتن ITA نسبت به آنتن PCDMA کاهش RCS مد ساختاری می‌باشد و این به سبب اندازه کوچک آن می‌باشد.



شکل (۳): مقایسه RCS آنتن PCDMA و ITA با بار تطبیق شده.

۲-۲- کاهش RCS به روش EBG

در این بخش ما محدوده شکاف الکترومغناطیسی (EBG) قارچ مانند را برای کاهش RCS یک آنتن آرایه پچ مورد بررسی قرار می‌دهیم. اساس این روش مربوط به مشخصه امپدانس بالای ساختار EBG قارچ مانند است. ساختار EBG قارچ مانند به وسیله آرایه پررودیکی از پچ‌های فلزی که هر کدام از المان‌ها با یک میله به زمین وصل شده‌اند، تشکیل شده است. این نوع از ساختار EBG دارای کاربردهای زیر هستند: کاهش انعکاس، کاهش امواج سطحی، کوچک سازی آنتن و بهبود عملکردهای دیگر آنتن ریزنواری. در فرکانس رزونانس، EBG شبیه هادی مغناطیسی



شکل (۷): مقایسه RCS بر حسب فرکانس برای موج تابشی،

(الف) در جهت x و (ب) در جهت y.

۳-۳- کاهش RCS با CSRR

بعضی از روش‌های که برای کاهش RCS گزارش شده است عبارت‌اند از: فرکتال، بهبود ساختار آنتن، و استفاده از ویژگی بیونیکی. سطوح انتخابگر فرکانس وقتی که RCS out band مد نظر است به خوبی به کار می‌آید اما به هیچ عنوان مناسب کاهش RCS in band نمی‌باشد. ساختار EBG نیز برای کاهش RCS به کار می‌رود اما جهت‌دهی (directivity) آنتن را حدود 2dB کاهش می‌دهد. ساختاری که در این بخش ارائه می‌شود استفاده از روش CSRR است که علاوه بر کاهش RCS، در کوچک‌سازی آنتن، band-notched antenna و ... به کار می‌رود [۳۰].

به منظور بررسی تاثیر CSRR روی مشخصه تشعشعی آنتن‌های ریزنوار، یک سری شبیه‌سازی‌ها انجام شده است. همان گونه که در شکل (۸) نشان داده شده است، یک آنتن ریزنوار با پارامترهای $L_1 = 13/72$ mm و $W_1 = 13/72$ mm در فرکانس ۵ GHz طراحی شده است. جریان‌ها روی صفحه زمین آنتن بدون CSRR و با CSRRها با چرخش‌های متفاوت به ترتیب در شکل (۸) نشان داده شده است. وقتی که CSRR داری انتهای باز (opening end) در امتداد محور x هستند توزیع جریان تقریباً مشابه آنتن بدون CSRR است، در حالی که وقتی CSRR با انتهای باز در امتداد محور y هستند، توزیع جریان به‌طور کلی تغییر می‌کند.

شکل (۶-الف) یک آنتن پچ آرایه ای 2×2 با فرکانس مرکزی ۵ گیگاهرتز را نشان می‌دهد. پچ‌ها از طریق پراب‌های کواکسیالی تغذیه می‌شوند. پارامترهای طراحی در مرجع [۲۹] آورده شده است. شکل (۶-ب) آنتن آرایه پچ دیگری را با همان اندازه که در شکل (۶-الف) آورده شده است نشان می‌دهد، اما با این تفاوت که قسمتی از این آرایه با ساختار EBG قارچ مانند اطراف هر پچ می‌باشد. همان گونه که در بالا بحث شد، کاهش RCS این آرایه پوشیده با EBG بخاطر وجود EBG است. بنابراین، اگر RCS آنتن آرایه پچ در همان فرکانس کاری آنتن مد نظر باشد، EBG باید به گونه‌ای طراحی شود که این محدوده فرکانسی را پوشش دهد. مقدار پارامترهای EBG برای in band و out band به شرح زیر است:

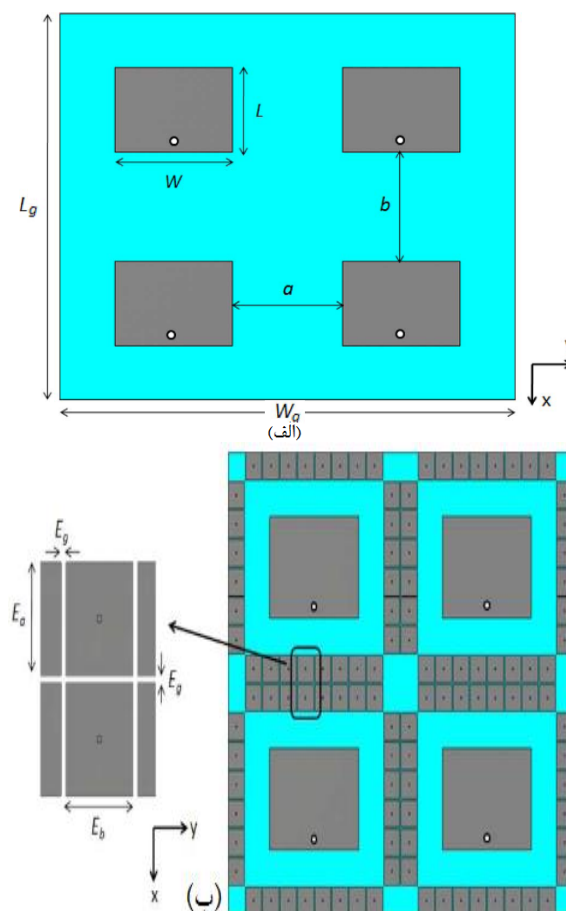
$$E_a = 5.3\text{mm}, E_b = 5\text{mm}, E_g = 0.3\text{mm}, d = .25\text{mm}, [\text{in-band}]$$

$$E_a = 3.5\text{mm}, E_b = 3.3\text{mm}, E_g = 0.2\text{mm}, d = .2\text{mm}$$

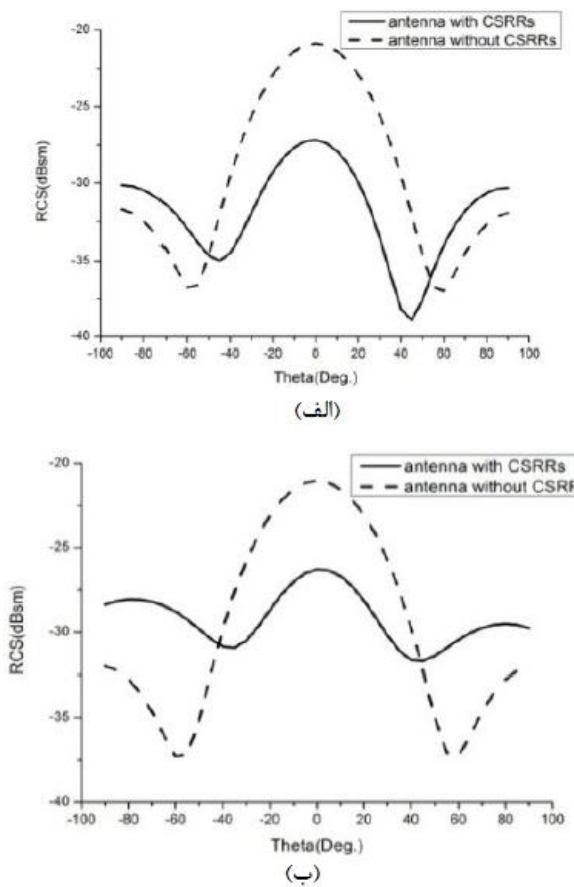
$$[7.5 - 10.5\text{GHz}, \text{out-band}]$$

با در نظر گرفتن پارامترهای EBG برای حالت out-band

نتایج RCS بر حسب فرکانس به صورت شکل (۷) می‌باشد.



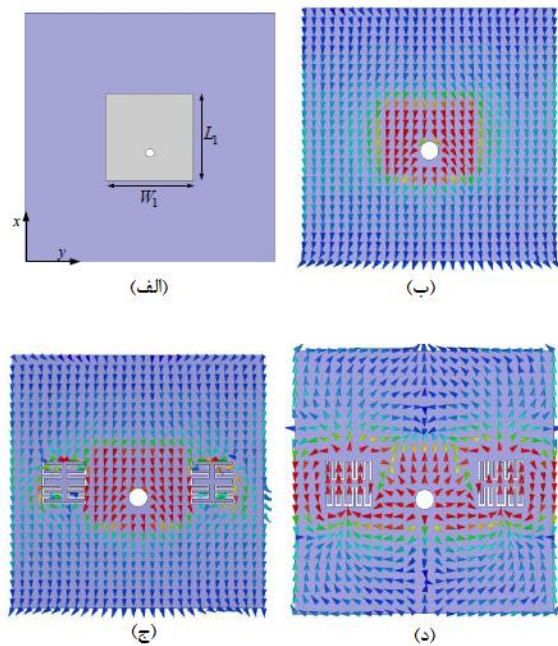
شکل (۶): آنتن پچ آرایه‌ای 2×2 بدون EBG و با EBG.



شکل (۱۰): سطح مقطع راداری monostatic دو آنتن در، (الف) صفحه XOZ و (ب) صفحه YOZ.

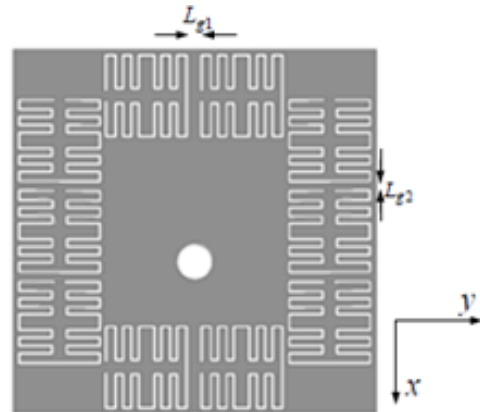
۳-۴- کاهش RCS با استفاده از FSS میان‌نگذر

روش دیگر برای کاهش RCS به‌کار بردن ریدوم‌های سطوح انتخابگر فرکانسی (FSS) برای آنتن است. در این حالت، برای امواج الکترومغناطیسی در فرکانس کاری آنتن شفاف است. انتقال سیگنال آنتن اصلاً تحت تاثیر آن قرار نمی‌گیرد. چنین مزیت ریدوم‌های FSS آن‌ها را صاحب کاربردهای ویژه کرده است. اخیراً FSS برای جایگزینی صفحه زمین فلزی کامل در آنتن آرایه انعکاسی برای کاهش RCS پیشنهاد شده است. روش‌های مشابهی نیز برای آنتن‌های مونوپل مورد استفاده قرار می‌گیرد (این روش هنگامی مناسب است که در حالت آرایه دیگر پوشش الگو نداشته باشیم). در این بخش، یک روش کاهش سطح مقطع راداری برای آنتن پیچ میکرواستریپی در باند فرکانسی وسیعی پیشنهاد می‌شود. این روش به‌وسیله جایگزینی صفحه زمین فلزی کامل در آنتن پیچ معمولی با یک صفحه زمین ساخته شده با سلول‌های میان‌نگذر FSS به همراه صفحه فلزی جزئی ارائه شده است. برای نشان دادن برتری روش پیشنهادی، تاثیر صفحات زمین متفاوت روی عملکرد آنتن بررسی شده است، بنابراین، آنتن

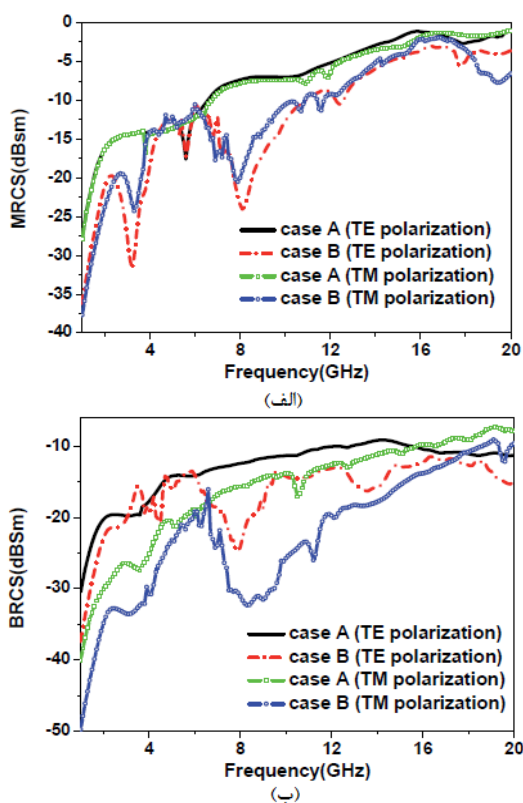


شکل (۸): (الف) هندسه آنتن میکرواستریپ مرجع، (ب) توزیع جریان روی زمین آنتن ۱، (ج) توزیع جریان روی زمین آنتن ۲، (د) توزیع جریان روی زمین آنتن ۳.

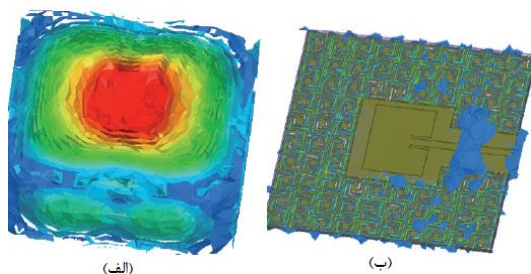
شکل (۹) صفحه زمین آنتن پیچ میکرواستریپی با CSRR را نشان می‌دهد. شکل (۱۰) سطح مقطع راداری monostatic دو آنتن پیچ را در صفحه XOZ و YOZ با موج تابشی phi-polarized نشان می‌دهد. در صفحه XOZ، سطح مقطع راداری monostatic در محدوده زاویه ای $0 < \theta < 50^\circ$ درجه به طور چشمگیری کاهش یافته و RCS در جهت عمود بر آنتن به اندازه ۶/۳ dB کم شده است. در صفحه YOZ، سطح مقطع راداری monostatic در محدوده زاویه ای $0 < \theta < 40^\circ$ به‌طور چشمگیری کاهش یافته و RCS در جهت عمود بر آنتن به اندازه ۵ dB کم شده است. تاثیر کاهش RCS در صفحه XOZ بهتر از صفحه YOZ است.



شکل (۹): صفحه زمین آنتن پیچ ریزنواری با CSRR.



شکل (۱۳): RCS شبیه سازی شده الف) MRCS بر حسب فرکانس (ب) BRCS بر حسب فرکانس.

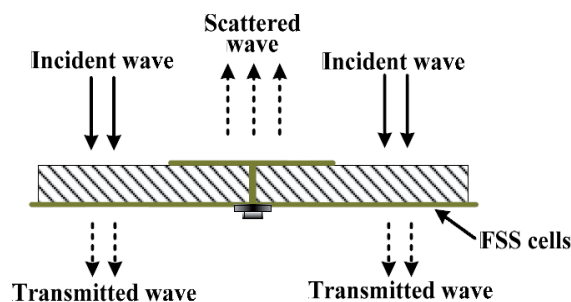


شکل (۱۴): توزیع میدان الکتریکی در بالای پچ تشعشعی در فرکانس $8/1 \text{ GHz}$ (الف) حالتی که زمین کامل هست (ب) حالتی که زمین کوچک شده ترکیبی از FSS می شود.

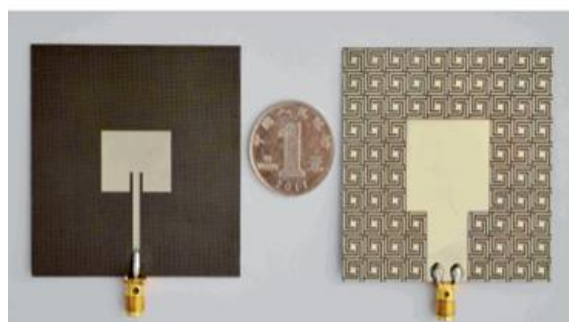
شکل (۱۲) آنتن ساخته شده روی زمین هایبریدی FSS و کوچک شده نشان می دهد. این پچ که در فرکانس $5/66 \text{ GHz}$ کار می کند. (اندازه این پچ و پارامترهای طراحی آن در مرجع [۳۱] آورده شده است). با استفاده از نرم افزار HFSS، هم سطح مقطع راداری monostatic و هم سطح مقطع راداری bistatic برای دو آنتن با قطبیدگی متفاوت مقایسه شده است (شکل (۱۳)). همان گونه که شکل (۱۳-الف) نشان می دهد وقتی $\theta = \varphi = 0^\circ$ ، یک کاهش کمی در monostatic RCS (MRCS) در داخل باند کاری آنتن وجود دارد، در مقابل، یک کاهش RCS چشم گیری بیرون فرکانس غیر کاری آنتن یعنی $4-1 \text{ GHz}$ و $20-6/6 \text{ GHz}$ برای هر دو قطبش وجود

پچ جدید پیشنهاد شده است. این آنتن به وسیله صفحه هایبریدی که شامل سلول های FSS کوچک شده و صفحه فلزی جزئی است تشکیل شده است. در مقایسه با آنتن های معمولی، این آنتن جدید دارای عملکرد تشعشعی مناسب بوده و کاهش RCS خارج باند آن دارای پهنای باند $20-1 \text{ GHz}$ برای یک زاویه تابشی پهن می باشد که راندمان روش پیشنهادی را تایید می کند. مزیت های مهم این روش عبارت اند از: وزن پایین، پروفایل کوچک، شکل پذیری آسان و ساخت آسان نسبت به آنتن اصلی می باشد [۳۱].

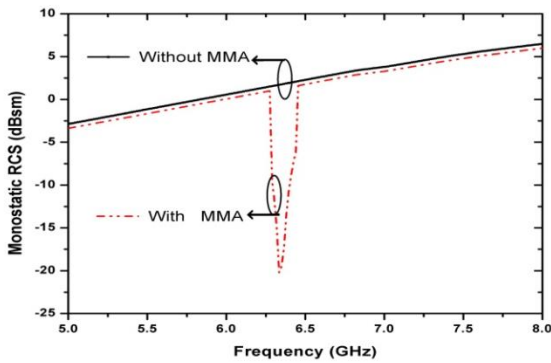
یک آنتن پچ ریزنواری معمولی، معمولاً روی یک زیرلایه که پشت آن به وسیله صفحه زمین کامل پوشانده شده تشکیل می شود. به هر حال، صفحه زمین سهم زیادی در RCS کلی آنتن دارد. همان گونه که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، برای کاهش RCS آنتن در باند فرکانسی پهن، صفحه فلزی به وسیله سلول های میان گذر FSS جایگزین می شوند. بر خلاف مکانیزم عملکرد ریدوم های FSS، این سلول های FSS دارای مشخصه میان گذر می باشند و فقط به عنوان یک صفحه فلزی در باند کاری آنتن عمل می کنند، در حالی که خارج این باند این سلول ها دارای عملکرد فیلترکنندگی پهن باند می باشند. بنابراین اکثر انرژی موج تابشی مستقیماً از آنتن عبور کرده و به وسیله RAM که در زیر آنتن می باشد جذب می شود. در این روش میدان پراکنده شده E^s به شدت کاهش یافته، و در نتیجه طبق رابطه اصلی برای RCS، به کاهش RCS پهن باند دست پیدا می کنیم.



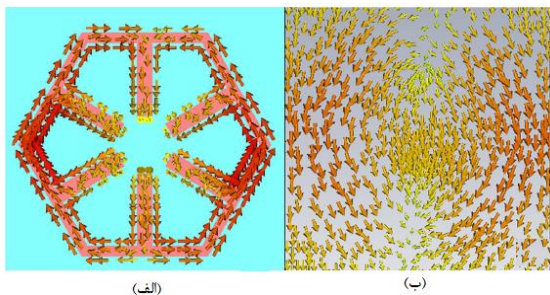
شکل (۱۱): شماتیک کاهش RCS.



شکل (۱۲): نمای بالایی و پایینی آنتن ساخته شده با FSS.



شکل (۱۶): مقایسه RCS آنتن معمولی و آنتن با MMA.



شکل (۱۷): جریان سطحی در (الف) بالا (ب) پایین ساختار طراحی شده در فرکانس 6.35GHz.

۳-۶- کاهش RCS با استفاده از تشدیدگرهای ریزنواری

تشدیدگرهای ریز نواری به‌طور گسترده به‌عنوان فیلترها در مدارات میکروویوی استفاده می‌شوند. تشدیدگرهای ریزنواری مستطیلی و مربعی، به دلیل ساخت آسان و عملکرد خوبشان بیشتر استفاده می‌شوند. این تشدیدگرها، که به‌وسیله تشعشع کننده‌ها تغذیه می‌شوند به اصطلاح آنتن رزونانسی ریزنواری نامیده می‌شوند. بنابراین، نظریه طراحی این تشدیدگرها مشابه تئوری آنتن ریزنواری است. به منظور تایید این تشدیدگرهای ریزنواری می‌تواند باعث کاهش سطح مقطع راداری در همان باند کاری آنتن شود، آنتن پیشنهادی به همان اندازه آنتن مرجع طراحی شده است. آنتن پیشنهادی با پنج تشدیدگر در شکل (۱۸-ب) نشان داده شده است. تشدیدگرهای شماره ۱، ۲ و ۳ دارای اندازه یکسان بوده در حالی که شماره ۴ و ۵ اندازه دیگری دارند. هم آنتن و هم تشدیدگرها طوری طراحی شده‌اند که در مد TM_{01} کار کنند. اندازه بهینه آن‌ها به‌صورت زیر می‌باشد [۳۲]:

$$a = 20\text{mm}, b = 15\text{mm}, d1 = 14\text{mm}, d2 = 25\text{mm}, L = 80\text{mm}$$

$$p = 4\text{mm}, a1 = 14.7\text{mm}, a2 = 15\text{mm}, d3 = 7.15\text{mm}, d4 = 10\text{mm}$$

تشدیدگرها می‌توانند RCS را در همان باند کاری آنتن با استفاده از خاصیت حذف کننده غیرفعال کاهش دهند. به منظور تایید این روش، RCS های آنتن مرجع و پیشنهادی داده شده

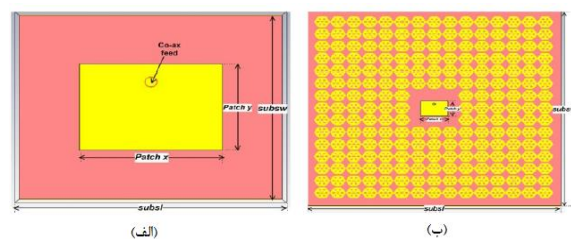
دارد. شکل (۱۳-ب) bistatic RCS (BRCS) با زاویه انعکاس $\theta = 60^\circ$ و $\varphi = 225^\circ$ ، مطابق با زاویه تابش $\theta = 60^\circ$ و $\theta = 45^\circ$ را نشان می‌دهد.

برای فهمیدن بهتر رفتار آنتن‌ها، توزیع میدان پراکنده شده شبیه‌سازی شده در صفحه xoy در فرکانس ۸/۱ GHz در شکل (۱۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل متوجه می‌شویم که میدان پراکنده شده حالت زمین کوچک شده ترکیب با FSS کمتر از حالت زمین کامل است. به‌عنوان یک نتیجه، حالت B دارای RCS کمتری نسبت به حالت A است.

۳-۵- کاهش RCS با استفاده از ساختار فرامواد

برای بررسی ویژگی نهان سازی جاذب متامتریالی (MMA)، یک آنتن پچ معمولی و یک آنتن با متامتریال روی یک FR-4 ضخامت ۱ میلی‌متر در باند C با CST شبیه‌سازی و طراحی شده است (شکل (۱۵)). به منظور تایید تاثیر کاهش RCS با استفاده از آنتن پیشنهادی، نمودار monostatic RCS دو آنتن را با استفاده از CST در شکل (۱۶) نشان داده شده است [۳۱]. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود MRCS آنتن با MMA بین فرکانس ۶/۲۷-۶/۴۵GHz کاهش یافته است. از این‌رو، به این نتیجه می‌رسیم که آنتن با MMA دارای RCS کمتری در همان باند کاری نسبت به آنتن معمولی می‌باشد.

به منظور فهمیدن دلیل سازوکار جذب MMA پیشنهادی، جریان سطحی در فرکانس جذب در شکل (۱۷) نشان داده شده است. شکل (۱۷-الف و ب) جریان سطحی را در بالا و پایین ساختار طراحی شده نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود جهت این جریان‌ها در بالا و پایین ساختار در خلاف جهت هم دیگر هستند. این دو جریان سطحی که در جهت خلاف هم هستند تشکیل یک حلقه جریان چرخشی می‌دهند، که در صفحه عمود بر جهت میدان مغناطیسی تابشی تشکیل می‌شود. این پدیده منجر به تحریک مغناطیسی می‌شود که نفوذپذیری مغناطیسی موثر ساختار را کنترل می‌کند. علاوه بر این این توزیع جریان تلفات FR-4 را نیز افزایش می‌دهد.



شکل (۱۵): شماتیک طراحی (الف) آنتن پچ معمولی (ب) آنتن میکرواستریپی با MMA.

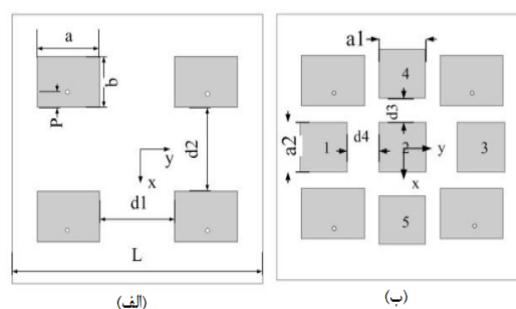
۴- نتیجه گیری

با توجه به مباحث گفته شده در این مقاله به این نتیجه رسیدیم که یک سری از روش‌های کاهش سطح مقطع راداری در خارج باند کاری آنتن و یک سری دیگر در باند کاری آنتن مناسب می‌باشند. روش‌های که موجب کاهش سطح مقطع راداری در باند کاری آنتن می‌شوند دارای پهنای باند باریک می‌باشند. برای حل مشکلات پهنای باند و باند کاری آنتن پیشنهاد می‌شود برای تحقیقات آینده از روش‌های ترکیبی کاهش سطح مقطع راداری که در این مقاله ارائه شده است، استفاده شود.

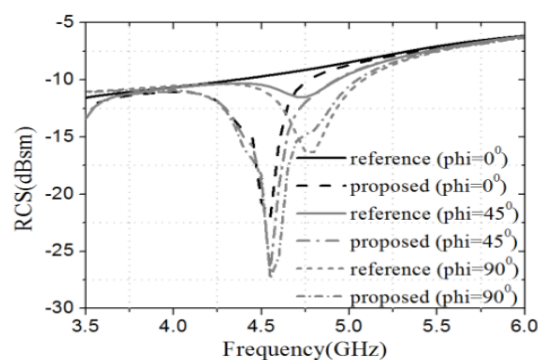
۵- مراجع

- [1] M. Taslimi and A. Ebrahimzadeh, "Implementation of RCS software calculator using physical optics theorem (RCSP0)," Journal of Radar, vol. 4, pp. 1-10, 2017. (In Persian)
- [2] E. Ameri, S. H. Esmaeli, and S. H. Sedighy, "Ultra wideband radar cross section reduction by using polarization conversion metasurfaces," Scientific Reports, vol. 9, 2019.
- [3] Z. Zou and Z. Nie, "RCS reduction of steps by using phase cancellation," Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Xi'an, 2017.
- [4] X. Q. Jia, Y. J. Zheng, X. Y. Cao, J. Gao, Q. Chen, and Y. Q. Fu, "Ultra-wideband RCS reduction and gain enhancement of patterned-surface-based aperture coupling patch antenna with optimized arrangement method," AIP Advances, vol. 9, 2019.
- [5] A. Luqman et al., "Wideband RCS reduction using coding diffusion metasurface," Materials, vol. 12, 2019.
- [6] G. Dong, X. Li, Y. Liu, S. Zhu, Y. He, and A. Zhang, "Multi-polarization, polarization-independent, Wide-angle RCS reduction metasurface based on random phase gradients," Appl. Opt., vol. 58, pp. 764-771, 2019.
- [7] Y. Fan, J. Wang, X. Fu, Y. Li, Y. Pang, L. Zheng, M. Yan, J. Zhang, and S. Qu, "Recent developments of metamaterials/metamaterials for RCS reduction," EPJ Appl. Metamat., vol. 6, 2019.
- [8] M. Pazokian, N. Komjani and M. Karimipour, "Broadband RCS reduction of microstrip antenna using coding frequency selective surface," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, pp. 382-1385, 2018.
- [9] Q. Chen, M. Guo, D. Sang, Z. Sun, and Y. Fu, "RCS reduction of patch array antenna using anisotropic resistive metasurface," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 18, pp. 1223-1227, 2019.
- [10] Y. Shi, Z. K. Meng, W. Y. Wei, W. Zheng, and L. Li, "Characteristic mode cancellation method and its application for antenna RCS reduction," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 18, pp. 1784-1788, 2019.
- [11] Y. Liu, Y. Jia, W. Zhang, Y. Wang, S. Gong, and G. Liao, "An integrated radiation and scattering performance design method of low-RCS patch antenna array with different

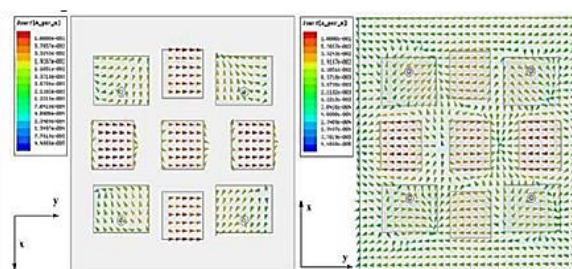
است. در شکل (۱۹) پاسخ فرکانسی monostatic RCS آنتن‌های مرجع و پیشنهادی برای یک موج صفحه‌ای تابشی phi-polarized نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود in-band RCS می‌تواند به مقدار قابل توجهی برای جهت‌های مختلف کاهش یابد. در مقایسه با آنتن مرجع، RCS آنتن پیشنهادی در همان باند کاری به اندازه ۱۷/۵ dB کاهش می‌یابد. با مراجعه به شکل (۲۰) مشاهده می‌شود که مد TM_{01} برای موج تابشی phi-polarize در تشدیدگرها تحریک می‌شوند. شکل (۲۰) نشان می‌دهد که توزیع جریان روی تشدیدگرهای ریزنواری و صفحه زمین در خلاف جهت هم هستند و اختلاف فاز 180° درجه بین آن‌ها را نشان می‌دهد. این پدیده ثابت می‌کند که میدان پراکنده شده تشدیدگر می‌تواند میدان پراکنده شده از صفحه زمین و پیچ را حذف کند. این نوع روش برای کاهش RCS دارای مزیت ساختار ساده و ساخت آسان نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد.



شکل (۱۸): دید از بالا (الف) آنتن مرجع، (ب) آنتن پیشنهادی.



شکل (۱۹): مقایسه MRCS آنتن مرجع و پیشنهادی.



شکل (۲۰): توزیع جریان روی تشدیدگر (سمت چپ) و صفحه زمین (سمت راست).

- [23] Y. Zheng, J. Gao, X. Cao, Z. Yuan, and H. Yang, "Wideband RCS reduction of a microstrip antenna using artificial magnetic conductor structures," *Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 1582-1585, 2015.
- [24] M. Gustafsson, "RCS reduction of integrated antenna arrays and radomes with resistive sheets," *Proc. IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation Society*, pp. 3479-3482, 2006.
- [25] M. Gustafsson, "RCS Reduction of integrated antenna arrays and radomes with resistive sheets," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Albuquerque, NM*, pp. 3479-3482, 2006.
- [26] H. Chen, X. Hou, and L. Deng, "Design of frequency-selective surfaces radome for a planar slotted waveguide antenna," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 1231-1233, 2009.
- [27] W. Jiang, Y. Liu, S. X. Gong, and T. Hong, "Application of bionics in antenna radar cross section reduction," *IEEE Antennas Wireless. Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 1275-1278, 2009.
- [28] S. Genovesi, F. Costa, and A. Monorchio, "Low-profile array with reduced radar cross section by using hybrid frequency selective surfaces," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, pp. 2327-2335, 2012.
- [29] J. Zhang, J. Wang, M. Chen, et al., "RCS reduction of patch array antenna by electromagnetic band-gap structure," *IEEE Antennas Wireless. Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 1048-1051, 2012.
- [30] Y. Jia, Y. Liu, and S. Gong, "RCS reduction of microstrip antenna by complementary split-ring resonators structure," *International Workshop on Antenna Technology*, 2014.
- [30] H. Yang, X. Y. Cao, Q. R. Zheng, J. J. Ma, and W. Q. Li, "Broadband RCS reduction of microstrip patch antenna using bandstop frequency selective surface," *Radio Engineering*, vol. 22, 2013.
- [31] H. B. Baskey, A. K. Jha, and M. J. Akhtar, "Design of metamaterial based structure for the radar cross section reduction of a microstrip antenna," *IEEE International Microwave and RF Conference*, 2014.
- [32] Y. Liu, H. Wang, K. Li, and S. Gong, "RCS reduction of a patch array antenna based on microstrip resonators," *Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, 2015.
- antenna elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, pp. 6199-6204, 2019.
- [12] P. Yao, B. Zhang, and J. Duan, "A broadband artificial magnetic conductor reflecting screen and application in microstrip antenna for radar cross-section reduction," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, pp. 405-409, 2018.
- [13] H. K. Jang, W. J. Lee, and C. G. Kim, "Design and fabrication of a microstrip patch antenna with a low radar cross section in the X-band," *Smart Materials and Structures*, 2011.
- [14] T. E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M. T. Tuley, "Radar Cross Section," *Sci. Tech. Publishing*, 2004.
- [15] W. Wiesbeck and E. Heidrich, "Influence of antennas on the radar cross section of camouflaged aircraft Radar," *Int. Conf.* pp. 122-125, 1992.
- [16] A. Sharma, D. Gangwar, B. Kumar Kanaujia, and S. Dwari, "Gain enhancement and RCS reduction of CP patch antenna using partially reflecting and absorbing metasurface," *Journal Electromagnetics*, vol. 39, 2019.
- [17] D. C. Evenden, "The RCS of antennas on a missile-like body Antenna Radar Cross-Section," pp. 1-5, 1991.
- [18] C. B. Wilsen and D. B. Davidson "The radar cross section reduction of microstrip patches," *4th IEEE AFRICON*, vol. 2, pp. 730-733, 1996.
- [19] Y. Liu, Y. Hao, H. Wang, K. Li, and S. Gong, "Low RCS microstrip patch antenna using frequency selective surface and microstrip resonator," *Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, 2015.
- [20] M. Skolnik, "Radar Handbook," Third Edition, 2008.
- [21] Yohandri, D. Rianto, and A. Putra, "Study of single layer Radar Absorber Material (RAM) based on coconut shell activated carbon," *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, Singapore, pp. 1536-1539, 2017.
- [22] I. G. Lee, S. H. Yoon, J. S. Lee, and I. P. Hong, "Design of wideband radar absorbing material with improved optical transmittance by using printed metal-mesh," *Electronics Letters*, vol. 52, pp. 555-557, 2016.

Radar Cross Section Reduction Methods for Microstrip Antennas

M. Mohammadi*

Abstract

The stealth technology is one of the most important strategies for protecting fighters and warships in the enemy's territory. Reducing the radar cross-section (RCS) of the antennas used in the radar of these fighters and ships is one of the stealth technology techniques. In this research, the methods of the radar cross section reduction for the microstrip antennas and their effects on performance of the antennas are presented. First, the radar cross section definition and the related governing relationships are presented and the importance of RCS reduction is discussed. Then, six main methods of radar cross-section reduction for microstrip antennas are introduced. These methods are: antenna shaping, electronic band gap (EBG), complementary split ring resonators (CSRRs), ground plane with frequency selective surface (FSS), metamaterial absorbers (MMA), and microstrip resonators. In each section, the radar cross section (RCS) of the reference and modified antennas are compared and the advantages and disadvantages of the relevant method is outlined.

Keywords: Radar cross section, microstrip antenna, electronic band gap, frequency selective surface, metamaterial.

Key Words: *Radar Corss Section, Microstrip Antenna, Electronic Band Gap, Frequency Selective Surface, Metamaterial*

* Department of Electrical Engineering, Aeronautical University, Tehran, Iran (mor_mohammadi@elec.iust.ac.ir)-Writer-in-Charge