طراحی آنتن میکرواستریپ با شکاف U شکل و تغذیه تزویج مجاورتی جهت کاربرد در آنتن رادار روزنه مصنوعی

مرضیه نصیریان[1] ذاکرحسین فیروزه[2] محسن مداح علی[3] غلامرضا عسکری[4]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران
m.nasirian@ec.iut.ac.ir
۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران
zhfirouzeh@cc.iut.ac.ir
۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران
maddahali@cc.iut.ac.ir
۴- مربی- پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران
askarigh@cc.iut.ac.ir

چکیده: این مقاله ابتدا به استخراج مشخصات لازم برای آنتن راداری روزنه مصنوعی با مشخصات سیستمی معلوم پرداخته و با توجه به نیاز به بهره زیاد و پهنای باند امپدانسی وسیع، طراحی آرایه‌ای از المان‌های میکرواستریپ از نوع پچ با شکاف U شکل و تغذیه تزویج مجاورتی را مد نظر قرار داده است. ابتدا توسط یک بررسی پارامتری برای چنین المانی، پارامترهای اصلی در طراحی استخراج گردیده و سپس المانی با پهنای باند بیش از ۱۶ درصد طراحی شده و نتایج شبیه سازی با اندازه‌گیری مقایسه شده است. در انتها طراحی اولیه‌ای برای ابعاد و توزیع دامنه جریان کل آرایه‌ای صفحه‌ای ازاین المان مطرح می‌شود تا به‌صورت تئوری دستیابی به مشخصات مطلوب برای کل آنتن فراهم گردد.

کلمات کلیدی: آنتن میکرواستریپ، باند وسیع، شکاف U شکل، تغذیه تزویج مجاورتی، رادار روزنه مصنوعی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۹/۱۰
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۷/۱۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۸/۱۹
نام نویسنده‌ی مسئول: مرضیه نصیریان
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – اصفهان – دانشگاه صنعتی اصفهان – دانشکده‌ی برق و کامپیوتر

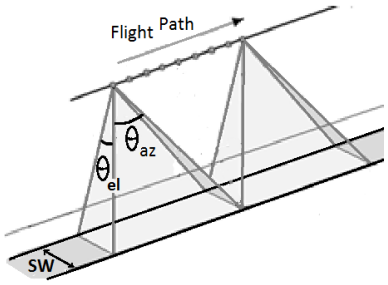
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.2.1.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.2 Summer 2016

۱- مقدمه

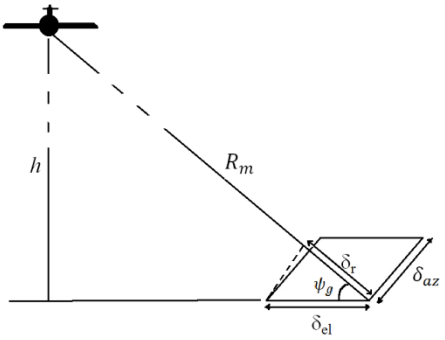
امروزه رادارهای روزنه مصنوعی SAR از مرسوم‌ترین ابزارهای تصویربرداری از طریق سکوهای متحرک هوایی هستند که به‌واسطه تکنیک پردازشی خاص، معادل یک آنتن بسیار بزرگ را به‌طور مصنوعی سنتز کرده و تصویربرداری با قدرت تفکیک بالا را میسر می‌نمایند [۱]. مانند هر رادار دیگری، در SAR نیز، آنتن آن وظیفه‌ی ارسال و دریافت سیگنال را به عهده دارد. انواع مختلفی از آنتن‌ها از جمله آنتن‌های رفلکتوری، هورن، موجبر شکافدار، میکرواستریپ و غیره در SAR به‌کار می‌روند؛ اما در هرحال مشخصات لازم برای این آنتن، باید از پارامترهای مربوط به تصویربرداری SAR استخراج شود. در بخش بعد مشخصات مورد نیاز آنتن رادار روزنه مصنوعی که مشخصات مربوط به تصویربرداری آن معلوم است، به طور تقریبی محاسبه می‌گردد. سپس در بخش‌های بعدی، آنتن از نوع آرایه میکرواستریپی برای حصول مشخصات فوق انتخاب می‌شود و ابتدا به طراحی یک المان تکی و سپس طراحی اولیه برای کل آرایه می پردازیم. همچنین در فرآیند طراحی تک المان آنتن، با مطالعه‌ی پارامتری، چگونگی وابستگی رفتار فرکانسی آنتن میکرواستریپ با شکاف U شکل و تغذیه تزویج مجاورتی را نسبت به پارامترهای مختلف ابعاد ساختار، مورد بررسی قرار داده و با توجه به نتایج شبیه‌سازی روندی کلی برای طراحی چنین آنتنی پیشنهاد می کنیم.

۲- استخراج تقریبی پارامترهای آنتن از مشخصات سیستمی SAR

آنتن مورد نظر در این مقاله، برای راداری در مود تصویربرداری نواری و برای نصب روی یک هواپیمای بدون سرنشین پیش‌بینی شده است که در ارتفاع (h) تقریبی ۳/۵ کیلومتر پرواز می کند. در شکل ۱ پهنای نوار رصد شونده توسط رادار بر روی زمین (SW[1]) تقریبا ۸۰۰ متر و در شکل ۲، زاویه‌ی پویش[2] (ψ_g)، حدود ۴۵ درجه است. در اینصورت فاصله‌ی مرکز این نوار تا رادار (R_m)، حدود ۵ کیلومتر خواهد بود. همچنین قدرت تفکیک مطلوب در هر دو جهت سمت[3] و ارتفاع[4] (δ_{az} و δ_{el})، برابر با ۰/۵ متر است. در ادامه به استخراج پارامترهای طراحی آنتن، با توجه به داده‌های مذکور پرداخته می شود.



شکل(۱): هندسه مسیر تصویربرداری و زوایای پرتو نیم توان آنتن



شکل(۲): هندسه کوچکترین قطعه قابل تفکیک

۲-۱- فرکانس کار آنتن

انتشار و بازتاب امواج الکترومغناطیسی در اتمسفر، به شدت به فرکانس آنها بستگی دارد. اگرچه ضریب انتقال اتمسفر برای باندهای فرکانسی X، C و L بیشترین مقدار بوده و این فرکانس‌ها در رادارهای هوابرد بسیار معمول اند [۲]، اما اهداف ساخت بشر، در باند فرکانسی Ku، دارای سطح مقطع راداری بالا بوده و قابلیت تفکیک خوبی دارند. همچنین، با توجه به محدودیت ابعاد فضای قابل اختصاص به آنتن به علت ملاحظات آئرودینامیکی، هر چه فرکانس کار بالاتر باشد، به علت کوچک شدن آنتن، بهره[5] قابل حصول از آنتنی با این ابعاد، بیشتر می شود. همچنین برای هرمحدوده‌ی فاصله و ارتفاع معلوم و برای هر شرایط جوی خاص، منحنی‌هایی برای نسبت سیگنال به نویز[6] بر حسب فرکانس وجود دارد، که باند فرکانسی بهینه برای دست‌یابی به بیشترین SNR را به ما می دهد[۳]. طبق این نمودارها، می توان دید که در محدوده ی مورد نظر در این مقاله، باند فرکانسی Ku ، انتخاب مناسب است.

۲-۲- پهنای پرتو آنتن در سمت و ارتفاع

برای رادار SAR در مود تصویربرداری نواری، با فرض اینکه پرتو آنتن در جهت سمت، به‌خوبی (و یکنواخت) تمام قطعه‌ی مورد نظر را روشن کند، یک رابطه‌ی کلی برای پهنای پرتو نیم توان آنتن در جهت سمت (θ_{az})، به‌صورت زیر است [۳]:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.2.1.7]

$$\theta_{az} = \frac{\lambda_0}{2\delta_{az}} \quad (۱)$$

اما در عمل به‌دلیل شکل پترن آنتن و افت ۳ دسیبلی در دو لبه ی قطعه ای که در پهنای پرتو نیم توان آنتن قرار می گیرد، در رفت و برگشت در مجموع یک افت به میزان ۶ دسیبل خواهیم داشت. بنابراین باید درعمل θ_{az} از آنچه در رابطه‌ی فوق بیان شده است، بیشتر انتخاب شود [۴]. در مسئله‌ی موردنظر، رابطه‌ی (۱)، θ_{az} را حدود ۱ درجه بدست می‌دهد. اما با استدلال فوق و همچنین برای ملاحظات مربوط به جبران خطاهای حرکتی، این زاویه ۲/۶ درجه هدف‌گذاری می‌شود.

پهنای پرتو نیم‌توان آنتن در جهت ارتفاع (θ_{el})، برابر است با [۵]:

$$SW \cong \frac{\theta_{e1} R_m}{\sin\psi_g} \quad (۲)$$

در اینصورت θ_{el} ، حدود ۶/۵ درجه بدست می‌آید که در هدف‌گذاری مقدار ۷ درجه برای آن در نظر گرفته می‌شود.

۳-۲- پهنای باند فرکانسی

در SAR، با استفاده از تکنیک فشرده‌سازی پالس، قدرت تفکیک ارتفاع به این‌صورت بدست می آید [۶]:

$$\delta_{e1} = c / 2B\cos\psi_g \quad (۳)$$

که در آن c، سرعت نور در خلأ و B، پهنای باند مؤثر سیگنال با جاروب فرکانسی[۷] است.

با توجه به مقادیر پارامترها در رابطه (۳)، پهنای باند B، حداقل باید حدود ۴۲۵ مگاهرتز باشد. اما در عمل به علت مزایای استفاده از پهنای باند زیاد، از جمله امکان بکارگیری تکنیک‌های مفیدی همچون جهش فرکانسی[۸] یا کاربرد نظارت چندگانه[۹] برای SAR و همچنین امکان توسعه‌ی سیستم در آینده، پهنای باند مطلوب بیش از ۱۰ درصد (بیش از 1.67 GHz در فرکانس مرکزی 16.7 GHz) در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲- بیشترین سطح گلبرگ های کناری پترن (SLL)

به‌طور کلی و در یک تقریب اجمالی، اگر برای تغییرات RCS[۱۰] هدف، A دسیبل و برای انواع نویزهای موثر در مسیر سیگنال، B دسیبل منظور شود و بخواهیم سیگنال دریافتی از هدف، نسبت به سیگنال دریافتی از کلاتر های اطراف، حداقل C دسیبل قویتر باشد، لازم است که (با توجه به تاثیر SLL به صورت دوبرابر، هم در سیگنال ارسالی از آنتن و هم در دریافت سیگنال بازتابی از هدف)، SLL حداکثر (A+B+C)/2- دسیبل باشد. در این طراحی A ، B و C هر کدام حدود ۱۰ دسیبل بوده و بنابراین SLL باید حداکثر ۱۵- دسیبل باشد تا در مجموع سیگنال‌های مزاحم را ۳۰ دسیبل تضعیف کرده و تشخیص سیگنال هدف را با مشکل مواجه نکند.

۵-۲- نوع آنتن

نیاز به حجم و وزن کم (در کاربرد نصب روی UAV)، ما را به انتخاب آنتن میکرواستریپ در طراحی، هدایت می‌کند. اما از آنجایی‌که میکرواستریپ‌ها ذاتا پهنای باند باریکی دارند، از تکنیک‌هایی برای افزایش پهنای باند باید سود جست. همچنین، با توجه به بهره زیاد موردنظر برای آنتن (۳۰dB)، بایستی از آنتن‌های آرایه‌ای میکرواستریپ با ابعاد بزرگ استفاده شود.

۳- طراحی المان آنتن

گام اول، طراحی یک المان با پهنای باند وسیع است. به‌طور کلی دو رویکرد عمده برای افزایش پهنای باند امپدانسی در یک سیستم وجود دارد: یکی افزایش تطبیق امپدانسی در بازه فرکانسی مورد نظر با استفاده از تکنیک‌های مختلف و دیگری استفاده از چند رزوناتور با فرکانس‌های نزدیک به هم، که اصطلاحا عناصر پارازیتی[۱۱] نام دارند [۷]؛ استفاده از یک شکاف رزونانسی در پچ، مثالی از رویکرد دوم است (اگرچه از شکاف روی پچ بمنظور تشعشع در چند باند فرکانسی نیز استفاده می‌شود [۸] اما با نزدیک کردن این باندها به یکدیگر می‌توان به مشخصه‌ای پهن‌باند دست یافت). همچنین علاوه بر بکارگیری ساختارهایی همچون tapered slot [۹] و غیره، پارامترهای ساختاری و روش‌های مختلف تغذیه نیز می‌توانند برای افزایش پهنای باند آنتن به‌کار روند، که از آن جمله می‌توان به تغذیه تزویج مجاورتی و یا تغذیه تزویج روزنه‌ای اشاره نمود. هوین[۱۲] و لی[۱۳] در سال ۱۹۹۵، اولین بار از یک شکاف U شکل در پچی با تغذیه کواکسیال، به منظور افزایش پهنای باند استفاده کردند [۱۰]. سه سال بعد این روش به همراه تغذیه تزویج مجاورتی به‌کار گرفته شد، که در آن از استاب Π شکل در خط تغذیه برای تزویج بیشتر و نیز تنظیم تطبیق امپدانس استفاده شده بود [۱۱]. سپس در کارهای مشابه به‌منظور جاسازی کامل استاب‌های خط تغذیه در زیر پچ و ایجاد درجات آزادی بیشتردر ایجاد تطبیق امپدانسی، یک یا چند شاخه دیگر به استاب Π شکل

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.2 Summer 2016
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.2.1.7]

افزوده شد که همچنان متضمن پهنای باند وسیع درساختارهایی در باندهای فرکانسی X و Ku بودند [۱۲]و [۱۳].

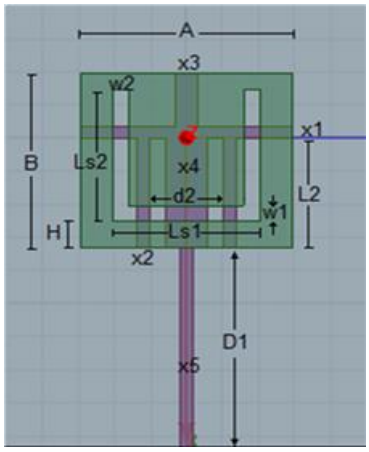
در [۱۴]، بررسی‌های دقیقی بر روی چگونگی تأثیر پارامترهای مختلف ساختار، بر مشخصه فرکانسی آنتنی تک لایه با شکاف U شکل در پچ و با تغذیه کواکسیال انجام شده است، اما با تغییر نوع تغذیه به تزویج مجاورتی، تعداد زیادی پارامتر جدید به مسئله وارد می شود که به‌علت تزویج های متعدد بین استاب-های تغذیه و شکاف U شکل، تحلیل دقیق رفتار رزونانسی را عملا غیرممکن می‌سازد؛ اما در عین حال با بررسی‌های پارامتری می‌توان پارامترهای تأثیرگذارتر در مشخصه فرکانسی آنتنی با چنین ساختار را شناسایی نموده و بدین ترتیب روندی کلی برای طراحی استخراج نمود. در این مقاله، بررسی مذکور برای آنتن پچ با شکاف U شکل و تغذیه تزویج مجاورتی در بخش بعد انجام می‌شود و نتایج آن ارائه می‌گردد.

۱-۳- ساختار آنتن

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ساختار آنتن میکرواستریپ موردنظر با تغذیه تزویج مجاورتی، بصورت دو لایه بوده و شامل دو زیرلایه از جنس Duroid 5880 با ضخامت‌های 31mil و 20mil است. پچ شامل شکاف U شکل، روی زیرلایه بالایی و خط تغذیه‌ی شامل استاب‌ها، روی زیرلایه پایینی قرار می‌گیرد. همچنین لایه‌ی زیرین زیرلایه پایینی، به عنوان زمین ساختار در نظر گرفته می‌شود. نمای آنتن از بالا به‌همراه پارامترهای تعیین‌کننده ابعاد، در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



شکل (۳): ساختار دولایه آنتن



شکل(۴): نمای آنتن از بالا به‌همراه پارامترهای متناظر با ابعاد شکل

جدول (۱): مقادیر نامی پارامترها

Name	Value	Unit
w1	0.45	mm
w2	0.45	mm
Ls1	4.11	mm
Ls2	3.52	mm
L2	3.33	mm
d2	2.04	mm
x1	0.36	mm
x2	0.36	mm
x3	0.61	mm
x4	1	mm
h1	20	mil
B	5.3	mm
A	5.92	mm
h2	31	mil
x5	0.36	mm
H	0.82	mm

۲-۳- بررسی پارامتری

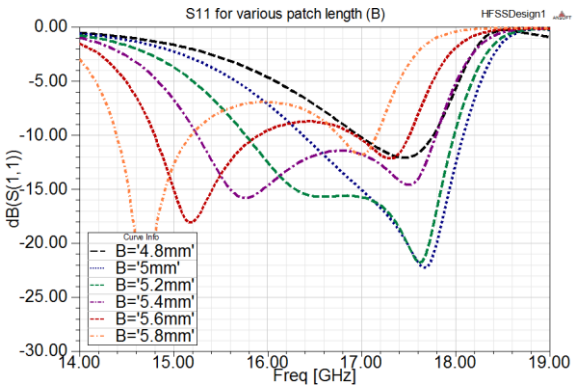
ابعاد اولیه‌ی ارائه شده در جدول ۱، از روند طراحی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، به‌دست آمده‌اند. در بررسی پارامتری، هر بار مقدار یکی از متغیرها حول مقدار نامی تغییر داده شده و بقیه، مطابق با مقادیر اولیه در نظر گرفته می‌شوند و به‌این‌ترتیب تأثیر پارامترهای مختلف بصورت جداگانه، در مشخصه فرکانسی آنتن به‌دست می‌آید. به‌طور کلی، با توجه به وجود دو رزوناتور پچ و شکاف U شکل، مشخصه‌ی فرکانسی آنتن شامل دو رزونانس نزدیک به‌هم می‌باشد. شکل ۵ برای نمونه، نمودارهای مربوط به بررسی پارامتری را برای چهار پارامتر مهم نشان می دهد. شبیه سازی ها توسط نرم افزار تجاری HFSS انجام شده‌اند. نتایج بررسی همه‌ی پارامترها، بطور خلاصه در جدول گردآوری شده است؛ f_1 و f_2 به‌ترتیب فرکانس اولین و دومین رزونانس در نمودار S11 بوده و f_c، فرکانس مرکزی در باند عبور 10dB- است. عبارت تلفات بازگشتی "Return loss level" نیز، بیانگر سطح تطبیق امپدانسی در باند عبور می باشد. در این بررسی مقدار همه پارامترها، به‌نسبت یکسان، حول مقدار نامی تغییر داده شده و تأثیر افزایش هر پارامتر بر کاهش (-)، افزایش (+)، یا عدم تغییر (0) مشخصه‌ی موردنظر، در این جدول بیان شده است. "++" و "--"، نشان‌دهنده افزایش و کاهش زیاد مشخصه-ی مربوطه بوده و "0(+)" و "0(-)" بیانگر افزایش و کاهش، به میزان کم هستند. با بررسی داده‌های بدست آمده در جدول، چهار پارامتر اصلی، شناسایی می شوند که عبارتند از: طول پچ (B)، پهنای پچ (A)، طول استاب های عمودی رو به پایین تغذیه (L2) و طول بازوهای عمودی شکاف U شکل (Ls2)؛ که در این

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.2 Summer 2016
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.2.1.7]

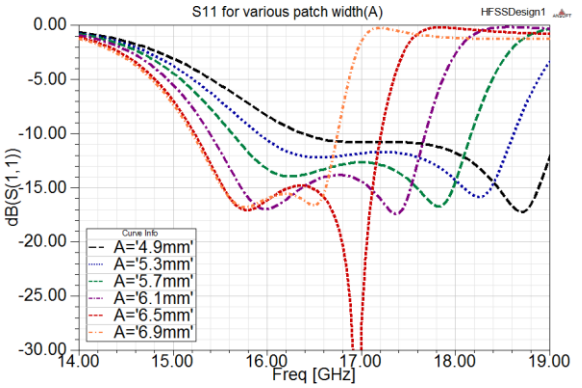
میان طول پچ (B)، در تعیین کل رفتار آنتن، از همه‌ی پارامترها تأثیرگذارتر است.

سایر پارامترهای مهم عبارتند از: فاصله افقی بین دو استاب رو به پایین تغذیه (d2)، میزان فاصله شکاف U شکل از لبه پچ (H)، طول شکاف افقیU (Ls1) و همچنین پهنای قسمت هایی از خطوط تغذیه (x2, x4 و x5).

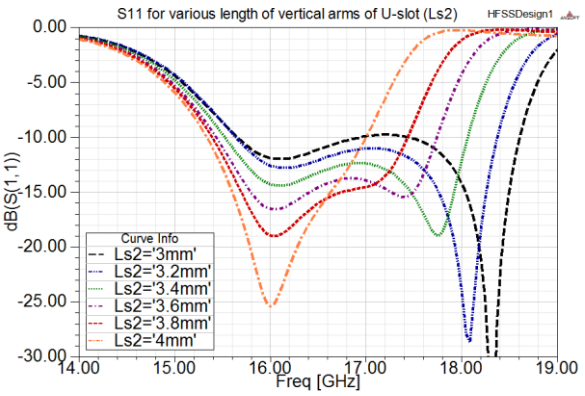
دیگر پارامترها مانند پهنای شکاف ها و استاب های افقی و روبه‌بالای تغذیه، در تعیین رفتار امپدانسی آنتن، تقریبا بی-تأثیرند.



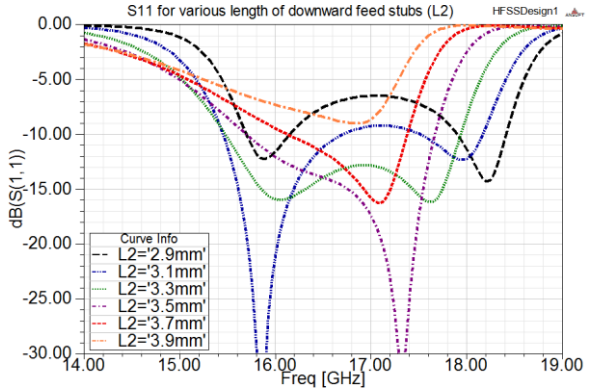
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۵): تأثیر پارامترهای مهم بر رفتار رزونانسی المان میکرواستریپ: الف) طول پچ (B). ب) پهنای پچ (A). ج) طول بازوهای عمودی شکاف U شکل (Ls2) و د) طول استاب‌های روبه-پایین تغذیه (L2).

جدول (۲): چگونگی وابستگی پاسخ فرکانسی به تغییر پارامترها

Parameter	f_1	f_2	f_c	$f_2 - f_1$	Return loss level
A+	-	- -	-	-	-
B+	- -	- -	- -	++	++
d2+	+	+	+	0	0(+)
H+	0	0(+)	+	0(+)	0(+)
L2+	+	- -	+	- -	++
Ls1+	+	0(+)	0	-	0
Ls2+	0(-)	- -	-	- -	-
w1+	0	0	0	0	0
w2+	0	0	0	0	0(+)
x1+	0(-)	0(-)	0	0	0(+)
x2+	0	+	0	+	+
x3+	0(-)	0	0	0(+)	0(+)
x4+	+	0(-)	0	-	-
x5+	-	0	0	+	+

برخی دیگر از نتایج بدست آمده از این جدول، به این شرح است:

اولین فرکانس رزونانس (f_1)، بیش از همه، تابع طول پچ است و می توان گفت به‌طور غالب از رزونانس پچ تأثیر می پذیرد.

فرکانس رزونانس دوم (f_2)، به‌شدت تحت تأثیر ابعاد پچ، L2 و Ls2 بوده و d2 و x2 نیز در تعیین این فرکانس موثرند. این فرکانس را می توان بیشتر متأثر از رزونانس شکاف U شکل دانست، زیرا پارامتر Ls2، مستقیما به طول بازوی شکاف مربوط است و L2 ، d2 و x2 نیز که به‌ترتیب طول استاب‌های روبه-پایین تغذیه، محل قرارگیری و پهنای این استاب‌ها هستند، مبین چگونگی جای‌گیری تغذیه در زیر شکاف بوده و با تنظیم

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.2.1.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.2 Summer 2016

میزان کوپلینگ میان تغذیه و شکاف، عملا طول موثر شکاف و در نتیجه فرکانس رزونانس ناشی از شکاف را تعیین می کنند.

تأثیرپذیری زیاد تلفات بازگشتی از طول پچ و L2، موید وابستگی شدید سطح تطبیق امپدانسی به طول استاب‌های تغذیه است؛ زیرا L2، مستقیما به طول استاب‌های روبه‌پایین تغذیه مربوط بوده و تفاضل B-L2 نیز تعیین‌کننده‌ی طول استاب بالایی می باشد.

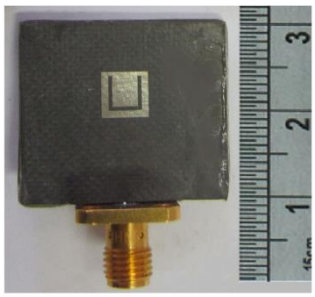
با استفاده از این نتایج، روند کلی طراحی چنین آنتنی به صورت زیر پیشنهاد می گردد:

ابتدا با توجه به فرکانس مرکزی و با استفاده از قواعد ابتدایی طراحی آنتن پچ و احتمالا با درنظرگرفتن محدودیت ابعاد المان در آرایه‌سازی، ابعاد پچ تعیین شده و برای سایر پارامترها، مقادیر اولیه، با لحاظ کردن حداقل دقت ساخت انتخاب شوند. با این ابعاد اولیه، یک پاسخ ابتدایی برای مشخصه‌ی آنتن بدست می آید؛ سپس پارامترهای اصلی، طبق داده‌های جدول ۲، در جهت مناسب برای بهبود مشخصه‌های پاسخ، تغییر داده شوند. از آنجا-که طول پچ (B)، کلیه‌ی مشخصات آنتن را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد، ترجیحا در این مرحله، هر بار یکی از پارامترهای A، L2 و Ls2 تغییر داده شوند (و B ثابت بماند)؛ این مرحله در صورت لزوم، تا رسیدن به یک جواب نسبتا قابل قبول تکرار شود. در گام بعدی با تغییر پارامترهای تأثیرگذار دیگر (مانند d2, H, Ls1) می توان پاسخ را بهبود داد؛ اولویت آن است که برای بهبود یک مشخصه، از پارامتری استفاده شود که تأثیر آن بر سایر مشخصه‌های پاسخ، بسیار کم (0 یا (±)0 در جدول) باشد. سرانجام، تنظیم نهایی می تواند با سایر پارامترهای کم تأثیرتر صورت پذیرد.

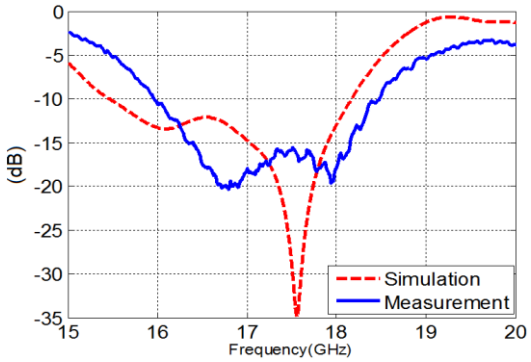
۳-۳- نتایج شبیه سازی و اندازه‌گیری

برای تست عملی المان طراحی شده‌ی آنتن، باید المان به یک کانکتور ۵۰ اهم متصل شود؛ برای جلوگیری از تلفات ناشی از عدم تطبیق امپدانسی، ابتدا آنتن توسط مبدل امپدانسی ربع موج[۱۴]، به خط میکرواستریپ ۵۰ اهم تطبیق داده می‌شود.

آنتن ساخته شده، به‌همراه کانکتور ۵۰ اهم در شکل ۶ مشاهده می‌شود. در شکل ۷، نتایج اندازه گیری و شبیه‌سازی S11 برای المان تکی با هم مقایسه شده است. با توجه به بالا بودن فرکانس کار و حساسیت زیاد ابعاد آنتن (مخصوصا خطوط نازک تغذیه) به خطای ساخت و نیز حساسیت بالای نتایج به چگونگی لحیم‌کاری کانکتور به آنتن، می‌توان گفت که نتایج اندازه گیری و شبیه‌سازی تطابق نسبتا خوبی دارند. علاوه بر این جابجایی فرکانس مرکزی و سطح تطبیق می‌تواند به علت ایجاد یک شکاف هوا بین دو زیرلایه در اثر جاسازی کانکتور بین دو لایه باشد. پهنای باند به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، ۲/۷۱ GHz بوده که معادل ٪۱۶ فرکانس مرکزی ۱۶/۷ GHz می‌باشد. در اندازه‌گیری، مقدار این پارامتر، ۲/۴۵ GHz به‌دست آمده است. در شکل ۸ توزیع جریان روی آنتن در سه فرکانس مختلف مشاهده می‌شود.



شکل (۶): نمای آنتن ساخته شده از روبرو



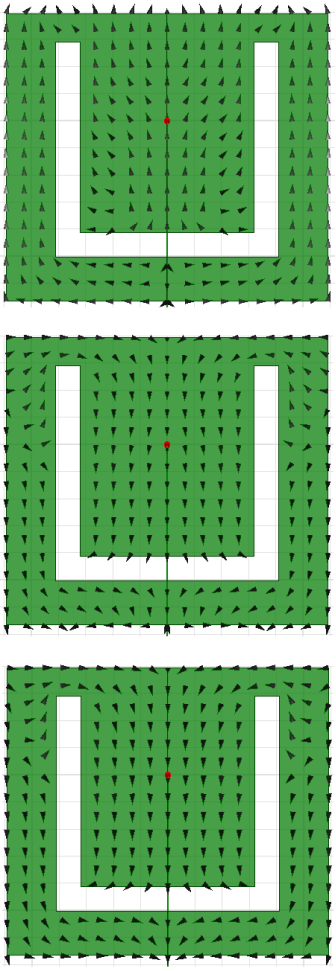
شکل (۷): نمودار S_{11} برای یک المان آنتن

ساختار این آنتن بصورت سه بعدی در شکل ۹ ارائه شده است. در این شکل، صفحه XZ همان صفحه E و صفحه YZ، صفحه H این آنتن بوده و با درنظرگرفتن دستگاه مختصات کروی، در صفحه E ، مولفه همسوی میدان همان E_θ و مولفه متعامد میدان، E_φ بوده و در صفحه H بالعکس است. نتایج اندازه گیری و شبیه‌سازی پترن تشعشعی در دو فرکانس متفاوت، در شکل ۱۰ تا ۱۳ قابل مشاهده‌اند. پهنای پرتو نیم توان در صفحات E و H، در فرکانس ۱۶/۷ GHz، به‌ترتیب برابر با ۸۸ و ۷۹ درجه بوده و بهره‌ی نرمالیزه شده‌ی آنتن، روی محور تقارن، ۷/۱۶ dB اندازه‌گیری شده است.

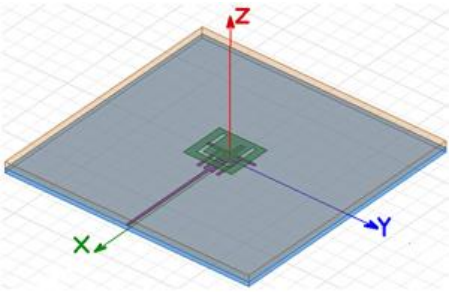
همان‌گونه که در نمودارهای پترن مشاهده می‌شود، وجود کانکتور اضافه شده برای تست، باعث نوعی عدم تقارن در پترن صفحه‌ی E آنتن می‌شود، که ناشی از این است که بدنه فلزی کانکتور، مانند یک بازتابنده عمل می‌کند و باعث لوچی پترن و فشردگی آن به سمت مقابل می‌گردد؛ اثر کانکتور، با توجه به

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.2.1.7]

بزرگ بودن ابعاد آن نسبت به ساختار، قابل توجه است، اما در آرایه بزرگ، با کوچک شدن ابعاد کانکتور نسبت به ساختار، این مشکل بسیار کمتر خواهدبود و چون در آنجا کانکتور نزدیک به تعداد کمی از المان‌ها می‌باشد، اثر آن محدود است.

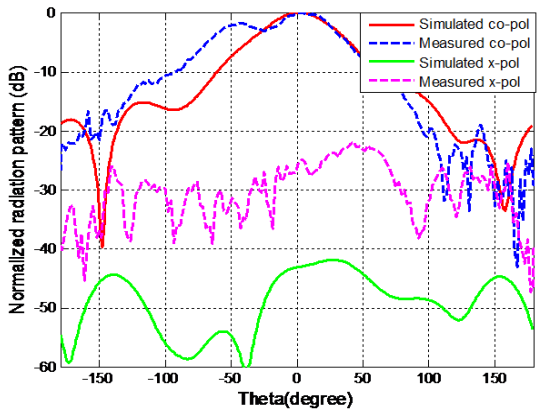


شکل (۸): توزیع جریان روی آنتن (از بالا به پایین به ترتیب برای فرکانس‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ گیگاهرتز)

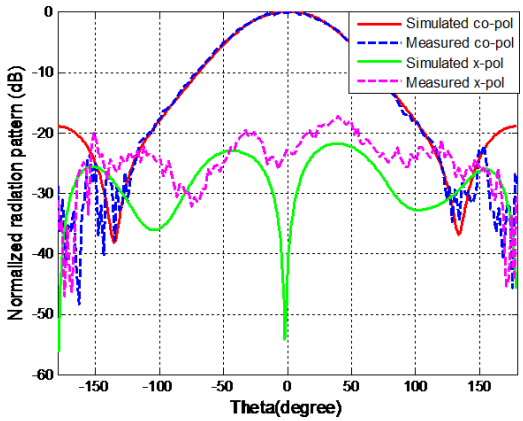


شکل (۹): ساختار سه بعدی آنتن

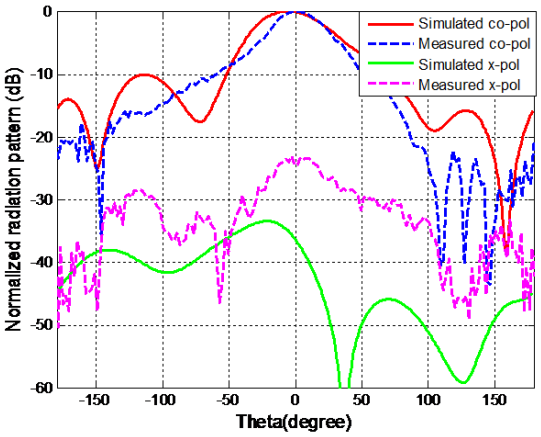
ضمن اینکه اگر از کانکتوری با بدنه کوچکتر استفاده شود نتایج بهتری حاصل خواهد شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در صفحه‌ی H که چنین عاملی وجود نداشته است، پترن تا حد زیادی تقارن خود را حفظ کرده است.



شکل (۱۰): پترن تشعشعی صفحه‌ی E در فرکانس ۱۶/۷ GHz



شکل (۱۱): پترن تشعشعی صفحه‌ی H در فرکانس ۱۶/۷ GHz



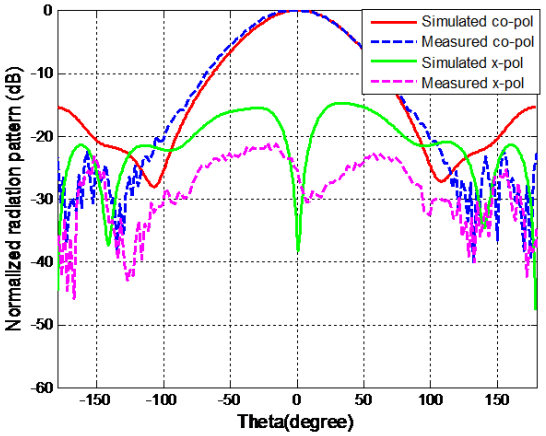
شکل (۱۲): پترن تشعشعی صفحه‌ی E در فرکانس ۱۸ GHz

۴- طرح کلی آنتن آرایه‌ای

بهره مطلوب برای آنتن موردنظر در این مقاله، ۳۰ دسیبل است. برای دستیابی به چنین بهره‌ای، به آرایه بزرگ نیاز است؛ از طرفی به‌علت پهن بودن پترن یک المان میکرواستریپ، بهره کل آنتن، عمدتا توسط فاکتور آرایه تعیین می‌شود و به‌طور تجربی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.2.1.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.2 Summer 2016

نیز در آرایه های بزرگ، تـأثیر بهـره المـان فقـط حـدود ۲ تـا ۳ دسیبل است. از این رو در طرح اولیه، فرض می‌شود بهره المـان، تقریبا جبران کننده تلفـات کـل (رانـدمانی کـه در دایرکتیـویتی ضرب می شود تا بهره بدست آید) بوده و اثـر آن را در بهـره کـل آنتن فقط به صورت فوق لحاظ کرده و سعی مـی‌شـود از فـاکتور آرایه، دایرکتیویتی برابر بـا بهـره مطلـوب مسـئله (۳۰ دسـیبل) بدست آید.



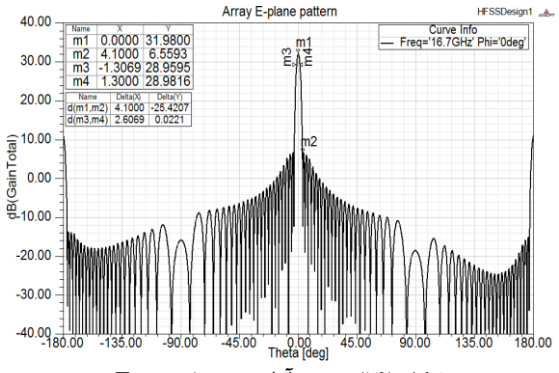
شکل (۱۳): پترن تشعشعی صفحه‌ی H در فرکانس ۱۸ GHz

از سوی دیگر، اگرچه دسـتیابی بـه SLL نهـایی بـه میـزان حداکثر ۱۵- دسیبل، مطلوب است، اما با در نظرگرفتن خطاهـای اجتناب ناپذیر در ساخت و نیـز بـا توجـه بـه ایـن نکتـه کـه در آرایه‌های میکرواستریپ عوامل مزاحمی ماننـد کوپلینـگ عناصـر آرایه و نیز تشعشعات ناخواسته از خطوط تغذیه، خصوصا در آرایه های بزرگ، باعث افزایش شدید SLL می شوند، برای یک پاسـخ مطمئن‌تر، در طراحی توزیع مناسب برای جریان المان‌های آرایـه ، SLL، حداکثر ۲۵- دسیبل هدف‌گذاری می‌گردد.

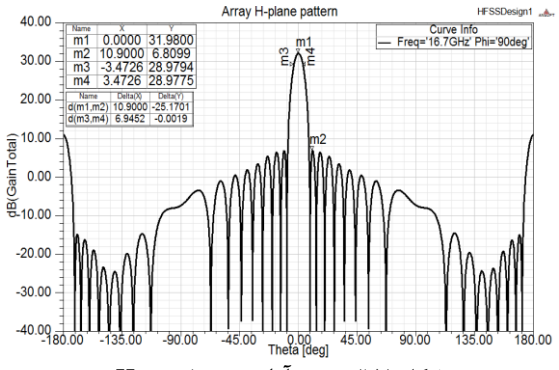
با توجه به پهلوتاب[۱۵] بودن پترن مطلـوب، بـرای اجتنـاب از ایجاد گلبرگ توری[۱۶]، فاصله گذاری عناصـر آرایـه بایـد از طـول موج در فضای آزاد (λ_0) کمتر باشـد؛ از طرفـی کـم بـودن ایـن فاصله به افزایش کوپلینگ بین المان‌ها منجـر مـی‌شـود. در یـک انتخاب معمول، این فاصله حدود λ_0 ۰/۷۵ درنظرگرفته می‌شـود [۱۵].

با درنظرگرفتن توزیع تفکیک‌پذیر برای آرایه صـفحه‌ای، بـه-منظور دستیابی به SLL مطلوب، بایستی از توزیع غیریکنواخـت برای دامنه جریان المان‌ها استفاده کرد (به‌علـت پهلوتـاب بـودن پترن، جریان همه المان‌ها باید هم‌فاز باشند). از بین توزیع هـایی که به کاهش SLL می انجامند، بهترین گزینه توزیع تیلور است، چراکه بهره آنتن را بخاطر کاهش SLL بـه میـزان نسـبتا کمـی کاهش می‌دهـد و در عـین حـال نسـبت بـه توزیـع چبـی‌شـف، مخصوصـاً وقتـی پـارامتر $\bar{n}$ بـزرگ انتخـاب شـود، دارای شـیب تغییرات نرم‌تر بوده و از نظر امکـان پیـاده‌سـازی تغذیـه (از نظـر حداکثر نسبت تقسیم توان عملی در مقسم‌های توان سه پـورتی) خوش‌رفتارتر است [۱۵].

با کدنویسی در نرم‌افزار متلب[۱۷]، می‌توان دیـد کـه بـا توزیـع تیلوری با $\bar{n} = 4$ و SLL=-25dB، بـرای آرایـه‌ای صـفحه‌ای بـا ابعاد ۱۲×۳۲ و با فاصله گذاری λ_0 ۰/۷۲ در هر دو راستا، فـاکتور آرایه‌ی حاصل، علاوه برSLL مناسب، بـه دایرکتیـویتی مطلـوب برای پترن نیز منجـر مـی‌گـردد. بـا فـرض قرارگیـری المـانی بـا مشخصات المان طراحـی شـده در بخـش قبـل بـه‌جـای عناصـر ایزوتروپیک در چنین آرایه‌ای، توسط نرم‌افزار HFSS ، پترن کل آرایه طراحی شده، بدون در نظر گرفتن کوپلینـگ عناصـر و نیـز تلفات شبکه تغذیه، مطـابق بـا شـکل ۱۴ و ۱۵ بدسـت مـی‌آیـد. SLL در هر دو راستا بهتر از 25dB- است و پهنای پرتو نیم‌توان در صفحات E و H به‌ترتیب ۲/۶ و ۶/۹۴ درجه و مطابق با مقادیر مطلوب است. همچنین بهره بدست آمده حدود 32dB است کـه البته بدون در نظر گرفتن تلفات ناشی از شبکه تغذیـه بـوده و در صورتیکه این تلفات حـدود ۴۰٪ باشـد، بهـره بـه 30dB خواهـد رسید.



شکل (۱۴): پترن آرایه در صفحه‌ی E



شکل (۱۵): پترن آرایه در صفحه‌ی H

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.2.1.7]

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، پس از استخراج مشخصات لازم برای آنتن، یک آنتن آرایه میکرواستریپی برای کاربرد در رادار روزنه مصنوعی در نظر گرفته شد و یک المان میکرواستریپ با شکاف U شکل و تغذیه تزویج مجاورتی، مورد بررسی پارامتری قرار گرفته و رفتار فرکانسی آن بر حسب ابعاد مختلف ساختار بصورت کیفی بدست آمد. نتایج شبیه سازی و اندازه‌گیری المان طراحی شده، تطبیق نسبتا خوبی را نشان می‌دهد. همچنین، آرایه‌ای ۱۲×۳۲ از المان طراحی شده، با توزیع غیریکنواخت تیلور پیشنهاد و نتایج طراحی اولیه ارائه گردید؛ که نتایج بدست آمده از آن، با مقادیر مطلوب برای مشخصات آنتن رادار موردنظر، که در ابتدا استخراج شد، تطابق دارند.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند که از پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات دانشگاه صنعتی اصفهان، به‌خاطر حمایت از این پژوهش قدردانی نمایند.

مراجع

[1] K. Tomiyasu, “Tutorial review of Synthetic Aperture Radar (SAR) with applications to imaging of the ocean surface, ” Proc. IEEE, 1978, Vol. 66, pp. 563–583.

[2] Berens, P., “Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR), ” Research Institute for High-Frequency Physics and Radar Techniques, Wachtberg , 2003.

[3] A. W. Doerry, “Performance Limits for Synthetic Aperture Radar, ” SAR Applications Department Sandia National Laboratories, 2006.

[4] A. W. Doerry, “Optimal antenna beamwidth for stripmap SAR, ” Proc. SPIE 8021, Radar Sensor Technology XV, 2011.

[5] A. Freeman, “The myth of the minimum SAR antenna area constraint, ” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, Vol. No.38, pp. 320-324.

[6] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and Fung A.K., Microwave Remote Sensing, Artech House, 1986.

[7] Z. N., Chia, M. Chen, Broadband planar antennas, Wiley, 2006.

[۸] مرادی، نیک مهر، "طراحی و ساخت آنتن مایکرواستریپ سه بانده و دوپلاریزه برای BTS"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد دهم، شماره اول، صفحه ۱ تا ۶، بهار و تابستان ۱۳۹۲.

[۹] کمجانی، رجبی، " شبیه سازی آنتن Tapered Slot با استفاده از روش ماتریس خط انتقال سه بعدی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سوم، شماره دوم، صفحه ۱۴ تا ۲۳، پائیز و زمستان ۱۳۸۵.

[10] T., Lee, K. F. Huynh, “Single-Layer Single-Patch Wideband Microstrip Antenna," Electronics Letters, 1995, Vol. 31, No. 16, pp. 1310–1312.

[11] C.L. Mak, K.M. Luk, and K.F. Lee, “Proximity-coupled U-slot patch antenna," Electronics Letters, Apr 1998, Vol. 34 , No. 8, pp. 715-716.

[12] C. Kidder, M. Li, and K. Chang, “Broad-band U-slot patch antenna with a proximity-coupled double /spl Pi/-shaped feed line for arrays," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2002, Vol. 1 , No. 1, pp. 2 - 4.

[13] B. Strassner, “Lightweight, Wideband, Amplitude-Tapered, Linearly-Polarized, Dual-Axis Monopulse, Ku-Band Patch Antenna Array for SAR, ” Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 , pp. 4409 - 4412.

[14] S. Huff, G. Pan, K. Bernhard, J.T. Weigand, “Analysis and Design of Broad-Band Single-Layer Rectangular U-Slot Microstrip Patch Antennas, ” IEEE Trans. Antennas Propagat, 2003, Vol. 51, No. 3, pp. 457–468.

[15] D. G. Fang, Antenna theory and microstrip antennas, CRC Press Taylor and Francis Group, 2010.

زیرنویس‌ها

[1] Swath width
[2] Grazing angle
[3] Azimuth
[4] Elevation
[5] Gain
[6] SNR
[7] Chirp
[8] Frequency Agility
[9] Multi-Look
[10] Radar Cross Section
[11] Parasitic elements
[12] Huynh
[13] Lee
[14] Quarter wave transformer
[15] Broad side
[16] Grating lobe
[17] Matlab

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.2.1.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.2 Summer 2016