

# تحلیل و ارزیابی اثر پارامترهای مهم آنتن و ریدوم بر روی زاویه‌یابی یک شبیه‌ساز رادار مونوپالس برای یک سکوی پرتابه‌ای

رضا ترینیا<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری؛ مرتضی کازرونی<sup>۲</sup>، دانشیار؛ محسن فلاح<sup>۳</sup>، استادیار

۱- مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - reza\_toreinia@mut.ac.ir

۲- مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - kazerooni@mut.ac.ir

۳- مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - mohsen\_fallah@mut.ac.ir

**چکیده:** گام نهایی طراحی یک رادار عملیاتی مطلوب این است که آن را در یک سامانه شبیه‌سازی حلقه بسته تحلیل و ارزیابی کرد. این تحلیل و ارزیابی از جنبه خطا بسیار بااهمیت تلقی می‌شود. مهم‌ترین خطاهایی که در یک سامانه راداری مونوپالس مطرح می‌گردد خطای زاویه‌یابی هدف در راستای سمت و ارتفاع برای اهداف زمینی است. در این مقاله، در یک شبیه‌ساز حلقه بسته، استخراج، تحلیل و ارزیابی این خطاها حاصل شده است. با پیاده‌سازی این سامانه راداری به‌صورت نرم‌افزاری و استخراج زوایای هدف از طریق این سامانه و با در نظر گرفتن مختصات اولیه دقیق هدف، این خطاها به‌دست آمده است. در این راستا، سه نوع آنتن برای این منظور در نظر گرفته شده و اثر ریدوم نیز در شبیه‌سازی حلقه بسته راداری و استخراج خطاها لحاظ شده است. پارامترهای آنتن شامل بهره، لوچی پرتو و الگوی تشعشعی و پارامترهای ریدوم نیز تلف عبوری و خطای محوری ریدوم هستند. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها این جمع‌بندی حاصل می‌شود که لوچی پرتو آنتن در واحد محاسبات مونوپالس قابل جبران است ولی خطای انحراف دید ریدوم موجب ایجاد خطای غیرقابل جبران در اندازه‌گیری موقعیت خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** رادار مونوپالس، لوچی پرتو، آنتن، ریدوم، شبیه‌ساز راداری، خطای زاویه‌یابی.

## Analysis and Evaluation of Important Antenna and Radome Parameters Effect on the Angle Measurement of a Monopulse Radar Simulator for a Projectile Platform

Reza Toreinia, PhD student<sup>1</sup>, Morteza Kazerooni, Associate professor<sup>2</sup>, Mohsen Fallah, Assistant professor<sup>3</sup>

1- Electrical and Electronic University Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, Email: reza\_toreinia@mut.ac.ir

2- Electrical and Electronic University Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, Email: kazerooni@mut.ac.ir

3- Electrical and Electronic University Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, Email: mohsen\_fallah@mut.ac.ir

**Abstract:** The design final step of a desired practical radar is analysis and evaluation of it in a closed-loop simulation loop. This analysis and evaluation from the error viewpoint is very important. The most important errors in monopulse radar systems are target angle measurement in azimuth and elevation directions for ground targets. In this article, in a closed-loop simulator, extraction, analysis and evaluation of these errors have been obtained. By software implementation of this radar system and extraction of target angles from this system, with regard to initial exact position of target, these errors have been achieved. In this way, three types of antennas have been considered for this purpose and also, radome effect has been considered in radar closed-loop simulation and extraction of errors. The antenna parameters are gain, beam squint and radiation pattern and the radome parameters are insertion loss and boresight error. Comparison of simulations results, achieve to this summary that the antenna beam squint can be compensated in monopulse computation unit but the boresight error of radome causes a non-compensable error in the target position measurement.

**Keywords:** Monopulse radar, antenna beam squint, antenna, radome, radar simulator, angle measurement error.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۲۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۶ و ۱۳۹۵/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۴

نام نویسنده مسئول: مرتضی کازرونی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - لویزان - خیابان شهید شعبانلو - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک

## ۱- مقدمه

برای ردگیری اهداف روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های پرتودهی متوالی<sup>۱</sup>، جاروب مخروطی<sup>۲</sup> و مونوپالس<sup>۳</sup> اشاره نمود. در میان این روش‌ها، روش مونوپالس از محبوبیت و کاربرد بیش‌تری برخوردار است. دلیل این محبوبیت داشتن مزایایی مانند سیگنال به نویز بیشتر، دقت بالاتر، کمینه تعداد پالس موردنیاز و مقاومت نسبت به جنگ الکترونیک است؛ البته عیب روش مونوپالس پیچیدگی و حجم زیاد سخت‌افزار موردنیاز آن است زیرا باید در دو یا سه کانال سیگنال دریافت شود و این کانال‌ها باهم هماهنگ باشند. البته این مشکل بیش‌تر در سامانه‌های لامپی که در گذشته استفاده می‌شد، مطرح است و امروزه با پیشرفت فناوری حالت جامد، قابل‌اعتنا نیست. در جاهایی که دقت بالا موردنیاز نباشد؛ از روش جاروب مخروطی استفاده می‌شود [۱]. در این مقاله هدف رسیدن به دقت بالا است پس از روش مونوپالس استفاده می‌شود.

از روش مونوپالس به‌طور گسترده در کاربردهای مختلف استفاده شده است. از آن جمله می‌توان به نشانه‌گیری هدف در یک رادار روزنه مصنوعی با نگاه به جلو [۲، ۳]، شناسایی اهداف متحرک [۴] و تعیین زاویه ارتفاع اهداف در تصاویر رادار روزنه مصنوعی [۵] اشاره نمود. در [۶] دقت تخمین زاویه هدف موردبررسی قرار گرفته و در [۷] دقت ردگیری مونوپالس در آرایه فازی بحث شده است. در [۸] اثر نویز و در [۹] اثر آنتن و دیگر پارامترهای سیستمی در مونوپالس دامنه تحلیل شده است. تحلیل‌هایی که در مراجع فوق انجام گرفته صرفاً شامل روابط تحلیلی هستند و شبیه‌سازی عملکرد رادار مونوپالس و بررسی نتایج در آن‌ها دیده نمی‌شود اما در این مقاله، ابتدا آنتن و ریدوم آن شبیه‌سازی می‌شود و سپس عملکرد آنتن و ریدوم در رادار مونوپالس مورد شبیه‌سازی و تحلیل قرار می‌گیرد.

در اغلب مقالات موجود به بررسی آنتن، ریدوم و واحد پردازش به‌طور جداگانه پرداخته شده است؛ اما شبیه‌سازی همه پارامترهای مهم آن‌ها در یک سامانه نرم‌افزار در حلقه کار جدیدی است که در هیچ‌یک از مقالات وجود ندارد. بنابراین، تحلیل نتایج آن می‌تواند به دید بهتری نسبت به طراحی و پیاده‌سازی سامانه رادار مونوپالس منجر شود. در این مقاله، با شبیه‌سازی سامانه مونوپالس مختصات هدف در دو جهت زاویه‌ای به‌دست می‌آید و از مجموع شبیه‌سازی‌ها دقت زاویه‌یابی سامانه راداری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی شامل بخش‌های مختلف می‌شود که از آن جمله می‌توان به شبیه‌سازی آنتن [۱۰، ۱۱]، ریدوم، نویزگیرنده و بخش پردازش و جمع‌پالس اشاره نمود که در بخش ۲ مقاله بیش‌تر معرفی می‌شود. پارامترهای مهم آنتن و ریدوم عبارتند از بهره آنتن، لوچی آنتن، خطای انحراف دید<sup>۴</sup> و تلف عبوری ریدوم [۱۲]. در بخش‌های بعدی مقاله، اثر این پارامترها بر روی قابلیت پیدا کردن زوایای هدف بررسی می‌شود. آنتن در نرم‌افزار تمام-موج<sup>۵</sup> CST شبیه‌سازی شده است و مشخصات آن شامل الگوی تشعشی و بهره در شبیه‌ساز وارد شده‌اند. ریدوم نیز در

همان نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و ویژگی‌های آن مانند تلف عبوری و خطای انحراف دید در شبیه‌سازی اعمال شده است. در بخش ۳ نتایج شبیه‌سازی حالت‌های مختلف برای سه آنتن در دو حالت وجود و عدم وجود ریدوم آمده است. در بخش ۴ نیز نتیجه‌گیری انجام شده است.

## ۲- معرفی بخش‌های مختلف سامانه مونوپالس

## ۱-۲- بخش پردازش

آنتن دارای ۳ کانال خروجی جمع، تفاضل سمت و تفاضل ارتفاع است. داده‌های راداری دریافتی از هر سه کانال به بخش پردازش می‌روند. برای هر سه کانال در بخش پردازش نیز ابتدا عملیات فشرده‌سازی پالس انجام می‌شود. سپس عملیات تجمیع پالس به‌صورت هم‌دوس صورت می‌پذیرد. بعد از آن، هدف که در سیگنال کانال جمع یک نقطه روشن در پس‌زمینه نویز با روشنایی کم‌تر است، شناسایی می‌شود. موقعیت هدف در سیگنال‌های تفاضل ارتفاع و تفاضل سمت برابر موقعیت آن در کانال جمع است. بنابراین، نسبت تفاضل به جمع موقعیت هدف برای جهت‌های سمت و ارتفاع محاسبه شده و به ترتیب با نسبت تفاضل به جمع الگوی تشعشی آنتن در جهت‌های سمت و ارتفاع مقایسه می‌شود که از روی این مقایسه، زاویه سمت و ارتفاع هدف نسبت به محور آنتن به‌دست می‌آید. برای انجام مقایسه بخش حقیقی نسبت تفاضل به جمع که خیلی بزرگ‌تر از مقدار موهومی آن است، استفاده می‌شود [۱۲].

مقدار خطای اندازه‌گیری زاویه از کم کردن زاویه اندازه‌گیری شده با رادار مونوپالس از مقدار زاویه ایده‌آل پیدا می‌شود. زاویه ایده‌آل با محاسبات هندسی در آخرین موقعیت رادار در طول بازه زمانی تجمیع پالس به‌دست می‌آید. بنابراین، حتی اگر منابع خطا مانند نویز وجود نداشته باشد، مقدار زاویه‌ای که رادار به‌دست می‌آورد با مقدار زاویه ایده‌آل متفاوت خواهد بود. زیرا رادار در طول زمان تجمیع پالس حرکت دارد. زاویه ایده‌آل آخرین زاویه هدف نسبت به محور آنتن در مسیر است. این نوع خطا را خطای ناشی از جابه‌جایی سکو یا خطای جابه‌جایی می‌نامیم. شکل ۱-الف هندسه مسأله و مسیر پرتابه‌ای سکوی راداری را نشان می‌دهد. در این شکل انحراف پرتو آنتن به‌وسیله ریدوم مشخص شده است. با محاسبه تفاضل زاویه خروج پرتو از ریدوم (زاویه  $\varphi$  در شکل ۱-الف) از زاویه پرتو خارج شده از آنتن (زاویه  $\theta$  در شکل ۱-الف) مقدار خطای انحراف دید ( $\delta$ ) ناشی از حضور ریدوم برای این زاویه ( $\theta$ ) به‌دست می‌آید. در عمل برای اندازه‌گیری این زوایا از پرتو تفاضل آنتن استفاده می‌شود زیرا محل نول در پرتو تفاضل به‌طور دقیق قابل اندازه‌گیری است. آنچه توضیح داده شد، مربوط به یک بازه زمانی شبیه‌سازی است و این شبیه‌سازی به‌طور پشت‌سرهم برای کل حرکت سکو در زمانی مثلاً ۳۳ ثانیه صورت می‌پذیرد که به‌اصطلاح حلقه شبیه‌سازی نامیده می‌شود. شکل ۱-ب بلوک دیاگرام حلقه شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. توضیح این نکته ضروری است که ابتدا آنتن و اثر ریدوم روی آنتن در نرم‌افزار تمام-موج شبیه‌سازی می‌شوند

هستند. برای ایجاد یک الگوی تشعشی با کمترین سطح گلبرگ فرعی، ابتدا یک عدد صحیح  $\bar{n}$  انتخاب می‌شود. صفرهای الگوی تشعشی که قدر مطلق آن‌ها بزرگ‌تر یا مساوی  $\bar{n}$  باشند؛ در همان محل عدد صحیح باقی می‌مانند. در مرحله بعد، صفرهای با قدر مطلق کوچک‌تر از  $\bar{n}$  به محل جدید  $u_n$  منتقل می‌شوند. انتقال به گونه‌ای است که فاصله صفرهایی که مجاور با گلبرگ‌های کناری هستند کاهش یافته و به همین دلیل اندازه گلبرگ کناری نیز کم می‌شود. از طرفی، فاصله زوج صفر گلبرگ اصلی افزایش یافته و در نتیجه، افزایش پهنای پرتو و کاهش جهت‌دهی رخ می‌دهد. با توجه به آنچه در بالا شرح داده شد، الگوی تشعشی جدید عبارت است از [۱۳]:

$$S(u) = \frac{\sin \pi u \prod_{n=1}^{\bar{n}-1} (1 - u^2/u_n^2)}{\pi u \prod_{n=1}^{\bar{n}-1} (1 - u^2/n^2)} \quad (3)$$

محل صفرهای جدید نیز از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$u_n = \bar{n} \left[ \frac{A^2 + \left(n - \frac{1}{2}\right)^2}{A^2 + \left(\bar{n} - \frac{1}{2}\right)^2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

که در این رابطه  $A$  برحسب سطح گلبرگ فرعی به صورت  $\cosh \pi A = b$  و داریم  $20 \log_{10} b = SLL$ .

آنچه توضیح داده شد، برای سنتز پترن عناصر خطی یک-بعدی بود و برای سنتز آرایه دو-بعدی می‌توان در هر دو راستای سمت و ارتفاع توزیع جریان را به دست آورد و با ضرب کردن مقادیر متناظر هر سطر و ستون، به یک ماتریس دو-بعدی که تعیین کننده توزیع جریان عناصر است، رسید. برای دهانه دایروی می‌توان عناصر کناری خارج از محدوده سطح دهانه را حذف کرد. به دلیل کوچک بودن اندازه جریان عناصر حذف شده، عدم وجود آن‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای در الگوی تشعشی به دست آمده ندارد و در این مقاله از این روش استفاده شده است. البته در [۱۳] روش مشابه دیگری نیز برای سنتز دهانه دایروی ارائه شده است. برای انجام شبیه‌سازی ابتدا از یک آنتن ایزوتروپیک که الگوی تشعشی آن با روش تیلور بهینه شده است، استفاده می‌شود. منظور از آنتن ایزوتروپیک، یعنی الگوی تشعشی آن در پهنای باند مورد نظر دارای بهره، لوچی و سطح گلبرگ فرعی مشخصی است که از رابطه تیلور به دست می‌آید و عناصر آن ایزوتروپیک هستند. آوردن آنتن ایزوتروپیک برای مقایسه با آنتن‌های طراحی شده با قابلیت پیاده‌سازی فیزیکی است. در شکل ۲ الگوی تشعشی این آنتن آورده شده است. از این پس، در طول مقاله به آن آنتن شماره ۱ گفته می‌شود؛ اما پس از طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک آنتن آرایه‌ای مونوپالس مشخصات آنتن واقعی جایگزین آنتن ایده‌آل می‌شود. آنتن نهایی ساخته شده از [۱۴، ۱۵] الهام گرفته شده است.

که در این مرحله حرکت سکو در نظر گرفته نمی‌شود و در مرحله بعد نتایج حل مسئله آنتن و اثر ریدوم وارد حلقه شبیه‌سازی راداری می‌شود. حرکت رادار در این مرحله اعمال شده است.

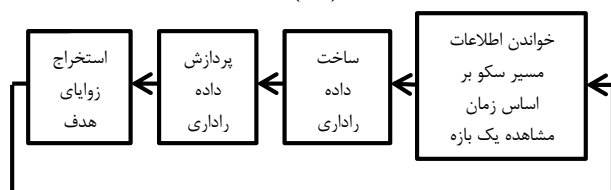
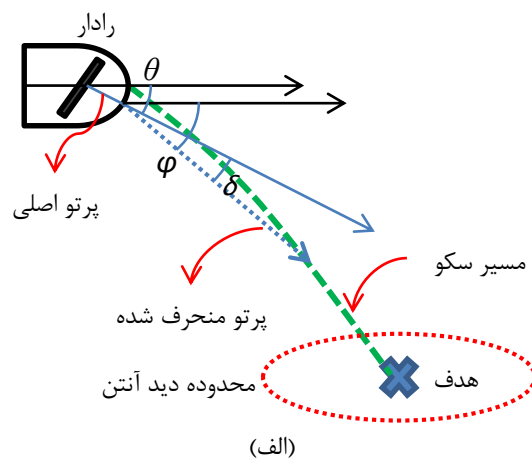
## ۲-۲ طراحی و شبیه‌سازی آنتن

### ۱-۲-۲ روش تیلور برای کم کردن سطح گلبرگ فرعی

از روش تیلور  $\bar{n}$  برای تنظیم سطح گلبرگ فرعی الگوی تشعشی جمع استفاده می‌شود. در [۱۳]، رابطه شدت تشعشع در یک آنتن خطی با طول  $2a$  به دست آمده که شامل دو بخش ضریب عنصر و ضریب آرایه است. ضریب آرایه از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$S(\theta) = \int_{-a}^a g(\zeta) e^{jk\zeta \cos \theta} d\zeta \quad (1)$$

که در آن  $g(\zeta)$  توزیع جریان در طول خط آنتن و  $k$  ثابت انتشار فضای آزاد است. بنابراین، مسئله سنتز پیدا کردن توزیع جریانی است که الگوی تشعشی  $S(\theta)$  را بدهد. اگر توزیع جریان در همه جای سیم مقدار ثابت  $K$  باشد آنگاه الگوی تشعشی برابر است با [۱۳]:



(ب)

شکل ۱- الف) مسیر پرتابه‌های سکوی راداری و پرتو آنتن (ب) بلوک دیاگرام حلقه شبیه‌سازی

$$S(u) = 2Ka \frac{\sin[\pi u]}{\pi u} \quad (2)$$

که در آن  $u = \frac{2a}{\lambda} \cos \theta$ . الگوی تشعشی رابطه (۲) دارای سطح گلبرگ فرعی  $-13/5 \text{ dB}$  است. صفرهای رابطه (۲) در محل اعداد صحیح برای  $u$  رخ می‌دهند (به جز  $u=0$ ). صفرها به صورت زوج متقارن

### ۲-۲-۲- طراحی جزئی آنتن واقعی

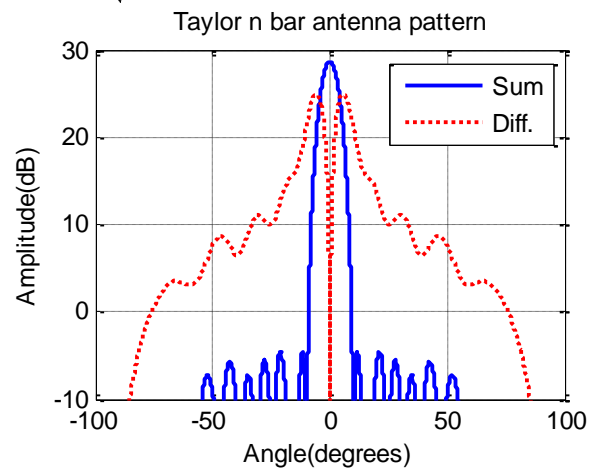
آنتن شامل تعداد ۶۴ عنصر میکرواستریپ است که در چهار زیرآرایه قرار دارند. هر زیرآرایه شامل تعدادی مقسم توان است که توان را بین عناصر زیرآرایه به طور مساوی تقسیم می‌کند. به منظور ایجاد الگوهای جمع، تفاضل سمت و تفاضل ارتفاع که در رادار مونوپالس باید به طور هم‌زمان موجود باشند از ۴ هیبرید و ۴ خط تأخیر پیچ و خم‌دار در مرکز آنتن استفاده شده است. پورت ۱ مربوط به سیگنال جمع، پورت ۲ مربوط به سیگنال تفاضل سمت، پورت ۳ مربوط به سیگنال تفاضل ارتفاع و پورت ۴ مربوط به سیگنال تفاضل قطری است که این پورت آخر در پردازش مونوپالس کاربردی ندارد و به بار تطبیق متصل می‌شود.

مرحله اول در طراحی آنتن، طراحی یک عنصر است. اگر فرکانس تشدید آنتن برابر  $f_r$ ، سرعت انتشار موج در فضای آزاد برابر  $c$  و ضریب دی‌الکتریک زیرآرایه برابر  $\epsilon_r$  باشد، عرض عنصر آنتن برابر است با [۱۶]:

$$W = \frac{c}{2f_r} \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad (5)$$

طول عنصر نیز از رابطه زیر حساب می‌شود [۱۶]:

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta l \quad (6)$$



شکل ۲- الگوی تشعشعی جمع و تفاضل آنتن شماره ۱

که در آن گسترش طولی  $\Delta l$  از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$\frac{\Delta l}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_e + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_e - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad (7)$$

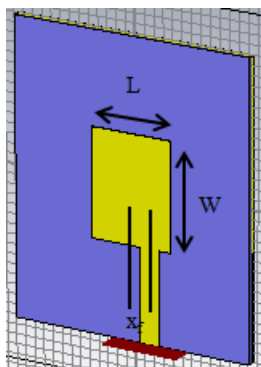
در رابطه بالا  $h$  ارتفاع پیچ است و ضریب دی‌الکتریک مؤثر  $\epsilon_e$  برابر است با [۱۴]:

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left( 1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} \quad (8)$$

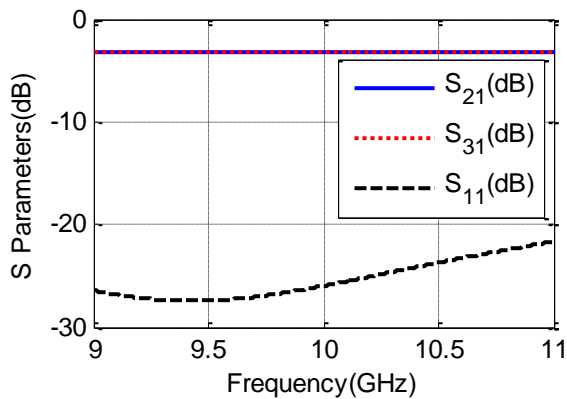
در این جا از یک زیرآرایه با ارتفاع  $0.762 \text{ mm}$  و ضریب دی‌الکتریک  $2/45$  استفاده شده است. با این مشخصات طول و عرض عنصر پیچ به ترتیب برابر  $8/54 \text{ mm}$  و  $11 \text{ mm}$  می‌شود. طراحی خط میکرواستریپ با یک امپدانس مشخصه داده شده نیز در [۱۶] آمده است. برای اینکه توان از خط به عنصر تشعشعی منتقل شود، امپدانس ورودی آنتن در محل اتصال باید با امپدانس ویژه خط میکرواستریپ برابر باشد. با تغییر محل تغذیه عنصر پیچ در لبه غیرتشعشعی عنصر، امپدانس ورودی آن نیز عوض می‌شود. با نزدیک شدن به سمت گوشه‌ها، امپدانس ورودی عنصر بیشتر می‌شود و در مرکز لبه غیرتشعشعی امپدانس ورودی عنصر، صفر است. شکل ۳-الف یک عنصر تشعشعی را به همراه خط تغذیه کننده آن نشان می‌دهد. تلف بازگشتی این عنصر در شکل ۳-ب آمده است. همان‌طور که در شکل ۳-ب دیده می‌شود، پهنای بانده بازگشت کمتر از  $-10 \text{ dB}$ ، آن،  $410 \text{ MHz}$  است.

مرحله بعدی، طراحی تقسیم/ترکیب کننده توان است. ترکیب کننده توان مورد استفاده، برگرفته از ترکیب کننده توان ویلکینسون در [۱۷] است با این تفاوت که مقاومت  $100 \Omega$  بین دو بازو حذف می‌شود. با حذف مقاومت میانی، تطبیق امپدانس در ورودی پورت‌های ۲ و ۳ برای مد فرد از بین می‌رود ولی برای مد زوج همچنان برقرار است. با توجه به اینکه توان رسیده به عناصر آنتن از روبروی صفحه آنتن است، بنابراین، توان رسیده به عناصر باهم برابر و تطبیق برقرار است ولی بافاصله گرفتن از محور عمود بر صفحه آنتن تطبیق کاهش یافته و موجب کاهش بهره آنتن در زوایای دیگر می‌شود. شکل ۴-الف مقسم/ترکیب کننده توان را نشان می‌دهد. پارامترهای پراکندگی این ترکیب کننده توان در شکل ۴-ب آمده است.

با استفاده از عنصر تشعشعی و مقسم توان می‌توان زیرآرایه‌های  $2 \times 2$  و  $4 \times 4$  را تشکیل داد. در آنتن‌های آرایه‌ای بدون جاروب برای کاهش اثر تزویج متقابل بین عناصر فاصله بین عناصر باید تا حد امکان افزایش یابد ولی در فاصله برابر طول موج فضای آزاد گلبرگ ناخواسته ظاهر می‌شود. معمولاً در آرایه‌های بدون جاروب فاصله بین عناصر را  $0.8$  طول موج فضای آزاد در نظر می‌گیرند [۱۴] که در این مقاله هم از این مقدار استفاده شده است. شکل ۵-الف زیرآرایه  $4 \times 4$  را نشان می‌دهد.

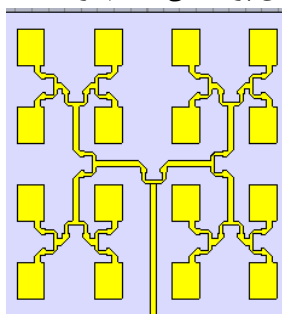


(الف)

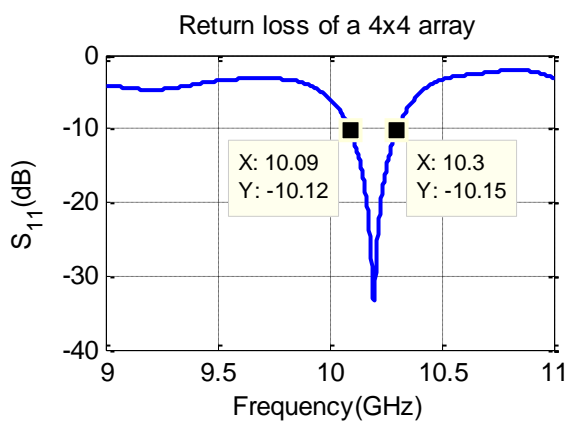


(ب)

شکل ۴- الف) تقسیم/ترکیب کننده توان مورد استفاده. ب) پارامترهای پراکندگی مقسم/ترکیب کننده توان



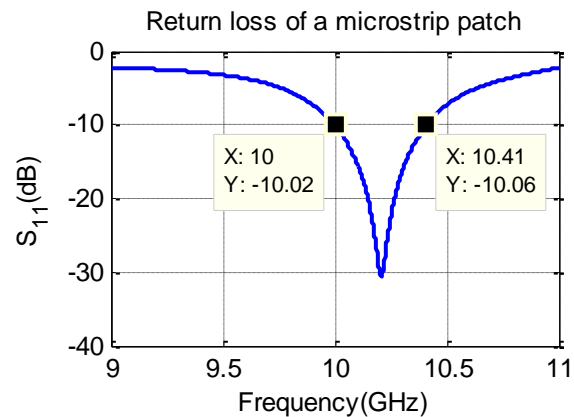
(الف)



(ب)

شکل ۵- الف) یک زیرآرایه ۴×۴. ب) تلف بازگشتی زیرآرایه ۴×۴

لازم به ذکر است مقدار لوچی پرتو آنتن عبارت است از مقدار انحراف صفر الگوی تشعشعی تفاضل هر راستا نسبت به محور عمود بر صفحه آنتن. همان طور در شکل ۷ نشان داده شده است مدار تغذیه به چند عنصر تشعشعی آنتن در سمت راست آرایه نزدیک شده است. از آن جاکه میدان الکتریکی در لبه های تشعشعی عنصر آنتن میکرواستریپ بیشینه است [۱۶]، می تواند موجب ایجاد عیب در عملکرد آنتن شود که در این جا تا حدودی پهنای باند را کاهش می دهد.



(ب)

شکل ۳- الف) یک عنصر تشعشعی به همراه خط تغذیه. ب) تلف بازگشتی عنصر تکی

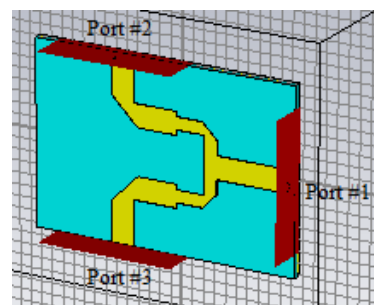
تلف بازگشتی زیرآرایه ۴×۴ در شکل ۵-ب آمده است. همان طور که در این شکل مشخص است با تشکیل زیرآرایه پهنای باند به ۲۱۰ MHz کاهش می یابد.

آنتن کامل از چهار زیرآرایه ۴×۴ تشکیل شده که از طریق یک شبکه مقایسه گر سه خروجی جمع، تفاضل سمت و تفاضل ارتفاع که مورد نیاز رادار مونوپالس است، به وجود می آید.

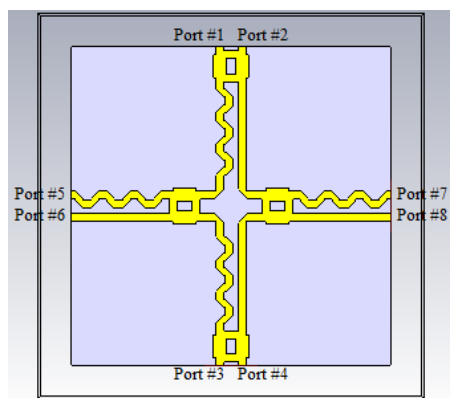
بلوک دیاگرام یک شبکه مقایسه گر نوعی در شکل ۶-الف نشان داده شده است. عناصر اصلی این شبکه هیبرید و تغییردهنده فاز ۹۰ درجه هستند. تغییردهنده فاز ۹۰ درجه با استفاده از خط تأخیر پیچ و خم دار طراحی می شود و روال طراحی هیبرید ۹۰ درجه در [۱۷] آمده است. شکل ۶-ب نیز شبکه مقایسه گر را در نمایش می دهد.

چهار زیرآرایه ۴×۴ به خروجی های ۵ تا ۸ شبکه مقایسه گر متصل می شود تا آرایه کامل شکل بگیرد. در شکل ۷ نمای آنتن واقعی شبیه سازی شده آمده که طرح آن مانند طرح [۱۵] است. به این آنتن از این پس با نام آنتن شماره ۲ ارجاع می شود.

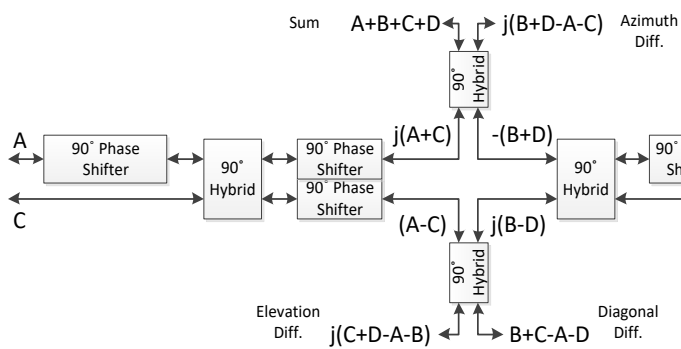
شکل ۸-الف نیز الگوی تشعشعی جمع و تفاضل جهت سمت آرایه را نشان می دهد. شکل ۸-ب نمایشگر الگوی تشعشعی جهت ارتفاع آنتن شماره ۲ است. بهره الگوی تشعشعی جمع این آنتن ۲۴/۵ dB و مقدار لوچی الگوی تشعشعی تفاضل آن در هر دو جهت سمت و ارتفاع ۰/۱ درجه است.



(الف)



(ب)



(الف)

شکل ۶- الف) بلوک دیاگرام شبکه مقایسه‌گر. ب) شبکه مقایسه‌گر.

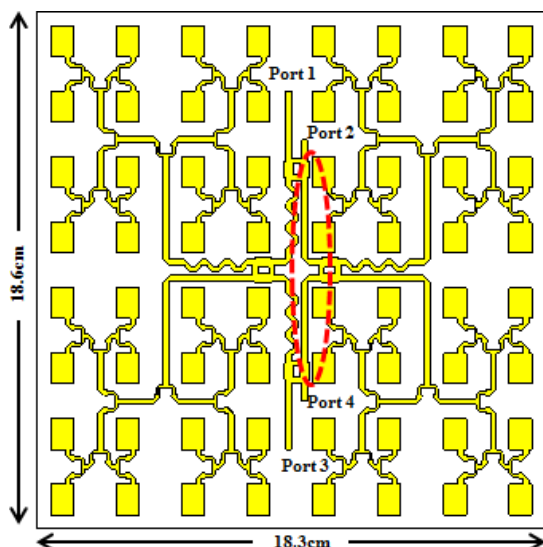
آن می‌تواند خطای اندازه‌گیری باشد. در الگوی تشعشی تفاضل سمت شکل ۱۱-الف نیز حداکثر ۲dB اختلاف دیده می‌شود که مربوط به گلبرگ‌های فرعی آنتن است. از آن‌جا که سطح گلبرگ فرعی حدود ۱۵dB پایین‌تر از پرتو اصلی است، مقدار اختلاف نتایج اندازه‌گیری با شبیه‌سازی شدید نیست. الگوی تشعشی ارتفاع در شکل ۱۱-ب تطابق خوبی با نتایج اندازه‌گیری دارد. بهره الگوی تشعشی جمع برابر ۲۳/۵dB و مقدار لوچی پرتو جهت تفاضل سمت برابر ۲/۵۶ درجه و جهت تفاضل ارتفاع برابر ۰/۰۷- است.

یکی از پارامترهای مهم آنتن مونوپالس نسبت تفاضل به جمع است. از آنجا که بخش حقیقی نسبت تفاضل به جمع برای زاویه‌یابی هدف مورد استفاده واقع می‌شود؛ مقدار اختلاف فاز الگوی تشعشی تفاضل نسبت به فاز الگوی تشعشی جمع نیز مهم است. در حالت ایده‌آل

شکل ۹-الف پارامتر پراکندگی تلف بازتابی را برای آنتن شماره ۲ نشان می‌دهد. در این‌جا پهنای باند مورد نیاز حداقل ۲۰۰MHz به ازای بازتاب ۱۰dB است؛ یعنی در این پهنای باند همه بازتاب از همه پورت‌های ۱ تا ۳ باید کمتر از ۱۰dB باشد؛ اما در آنتن شماره ۲ پهنای باند ۱۰dB برابر ۱۷۰MHz است. برای رفع این مشکل مدار تغذیه در وسط برد چاپی آنتن قرار داده و اختلاف طول مورد نیاز به وسیله خطوط پیچ و خم‌دار جبران می‌شود. این آنتن جدید از این‌پس آنتن شماره ۳ نامیده می‌شود. شکل ۹-ب پارامترهای پراکندگی تلف بازتابی را برای آنتن شماره ۳ نمایش می‌دهد. پهنای باند به ازای بازتاب کمتر از ۱۰dB برابر ۴۲۵MHz است. آنتن شماره ۳ پهنای باندی بیش از دو برابر پهنای باند آنتن شماره ۲ دارد. نمای ظاهری آنتن آرایه‌ای شماره ۳ در شکل ۱۰-الف آمده است. شکل ۱۰-ب نیز آنتن ساخته شده بر اساس طرح جدید را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل‌های ۷ و ۱۰ پیداست مسیر سیگنال همه کانال‌ها با هم برابر نیستند مثلاً طول مسیر کانال تفاضل سمت که ورودی آن در شکل‌های ۷ و ۱۰ با پورت ۲ نشان داده شده، کوتاه‌تر از مسیر کانال جمع است. بنابراین از آن‌جا که فاز الگوی تشعشی نیز برای محاسبه نسبت تفاضل به جمع مهم است، اختلاف مسیر باید یا در بخش پردازش یا در بخش‌های RF و IF جبران شود.

در شکل ۱۱-الف نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری الگوهای تشعشی نرمالیزه جمع و تفاضل سمت آنتن شماره ۳ در فرکانس ۱۰/۲GHz به نمایش درآمده است. در الگوی تفاضل این آنتن یک عدم تقارن به‌طور آشکار دیده می‌شود که علت آن می‌تواند انجام تشعش از خطوط پیچ و خم‌دار اضافه شده در یک سمت طرح جدید باشد. الگوهای تشعشی نرمالیزه جمع و تفاضل ارتفاع فرکانس ۱۰/۲GHz نیز در شکل ۱۱-ب به نمایش درآمده‌اند. در شکل ۱۱-الف الگوی جمع شبیه‌سازی شده دارای ۱/۶ درجه لوچی است. باین وجود، الگوی تشعشی جمع اندازه‌گیری شده بدون لوچی به نظر می‌رسد که دلیل



شکل ۷- نمای آنتن شماره ۲ [۱۳]

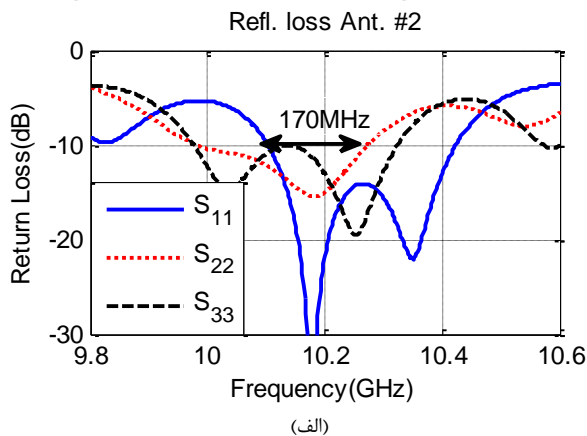
### ۲-۳- تحلیل آنتن با حضور ریدوم

#### ۲-۳-۱- طراحی ریدوم

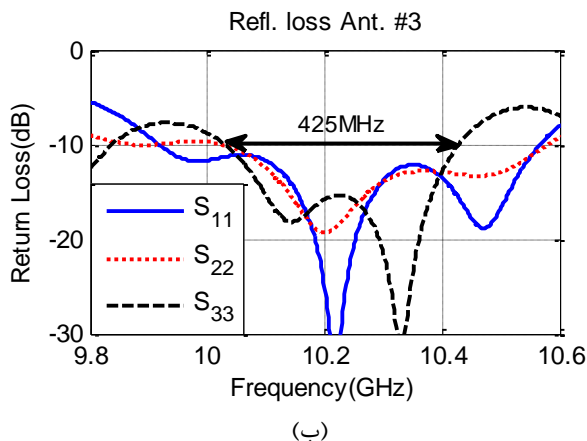
قوس تانژانتی<sup>۶</sup> یکی از پرکاربردترین انواع ریدوم است [۱۸] که در این مقاله از آن استفاده می‌شود. شکل ۱۴-الف نمای ریدوم قوس تانژانتی را نشان می‌دهد. در این شکل  $L_o$  و  $L_i$  به ترتیب طول ریدوم تا سطح داخلی و خارجی،  $D_o$  و  $D_i$  به ترتیب قطر داخلی و خارجی ریدوم هستند. همچنین، شعاع انحنا  $R$  شعاع انحنا سطح خارجی و  $B$  فاصله مرکز انحنا سطح داخلی و خارجی از محور ریدوم است. محور ریدوم در جهت  $X$  و مرکز انحنا سطح داخلی و خارجی ریدوم در نقطه مشترک  $P$  قرار دارد. هر نقطه روی سطح قوس تانژانتی با رابطه (۹) توصیف می‌شود:

$$(r_p + B)^2 + X_p^2 = R^2 \quad (9)$$

که در آن  $r_p$  فاصله هر نقطه نسبت به محور ریدوم و  $X_p$  فاصله آن نقطه از مبدأ مختصات در جهت محور  $X$  است. مقادیر  $R$  و  $B$  برحسب طول و قطر قوس تانژانتی از دو رابطه (۱۰) و (۱۱) به دست می‌آیند:



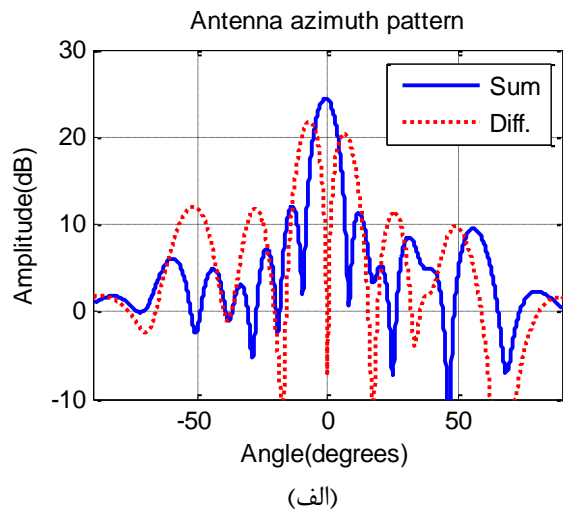
(الف)



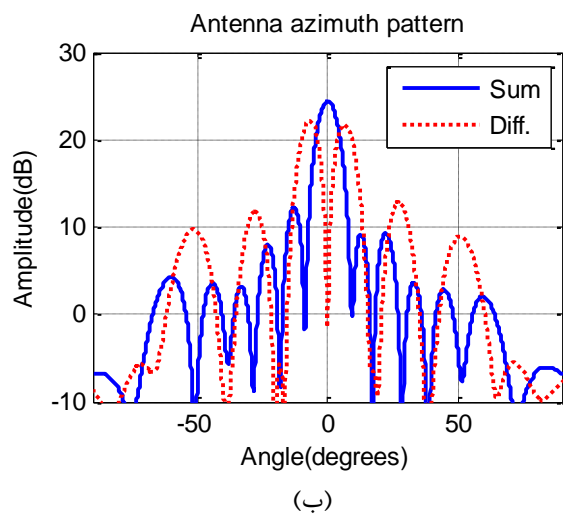
(ب)

شکل ۹- الف) تلف بازگشتی پورت‌های مختلف برای آنتن شماره ۲.

ب) تلف بازگشتی پورت‌های مختلف برای آنتن شماره ۳.



(الف)



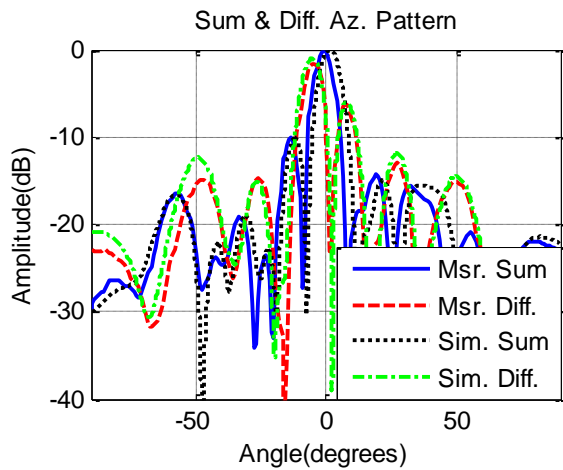
(ب)

شکل ۸- الف) الگوی تشعشعی جهت سمت آنتن شماره ۲. ب) الگوی تشعشعی جهت ارتفاع آنتن شماره ۲.

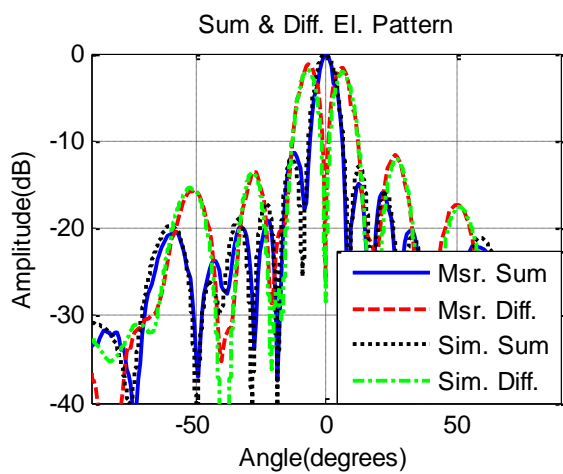
این اختلاف فاز باید ۰ یا ۱۸۰ درجه باشد که در این صورت اندازه بخش حقیقی نسبت تفاضل به جمع، برابر نسبت اندازه الگوی تشعشعی تفاضل به اندازه الگوی تشعشعی جمع می‌شود.

شکل ۱۲ نسبت بخش حقیقی تفاضل به جمع را نسبت به کل آن برای دو جهت سمت و ارتفاع آنتن ۳ نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۱۲ دیده می‌شود، این نسبت به جز در ناحیه گذار که شامل مرکز پرتو آنتن و دو انتهای پرتو اصلی می‌شود، بیشتر از ۰/۹ است.

تزیج بین پورت‌های مختلف آنتن در شکل ۱۳ آمده است. مطابق این شکل کمترین ایزولاسیون بین پورت‌های ۱ و ۲ دیده می‌شود. اگر گیرنده‌ها تطبیق باشند، تزیج بین پورت‌ها خطایی ایجاد نمی‌کند؛ اما در صورت عدم تطبیق کامل، با توجه به مقدار برگشتی از گیرنده و مقدار تزیج پورت‌ها می‌توان مقدار خطای ایجاد شده را تخمین زد.

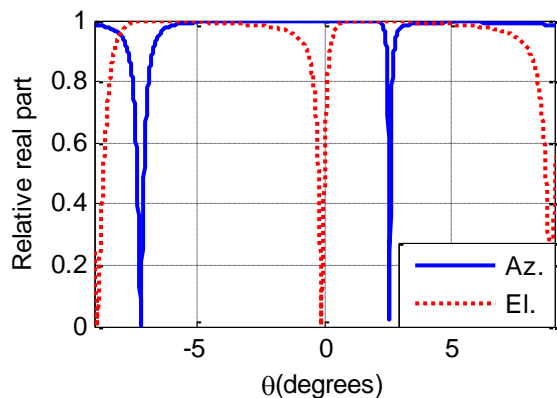


(الف)



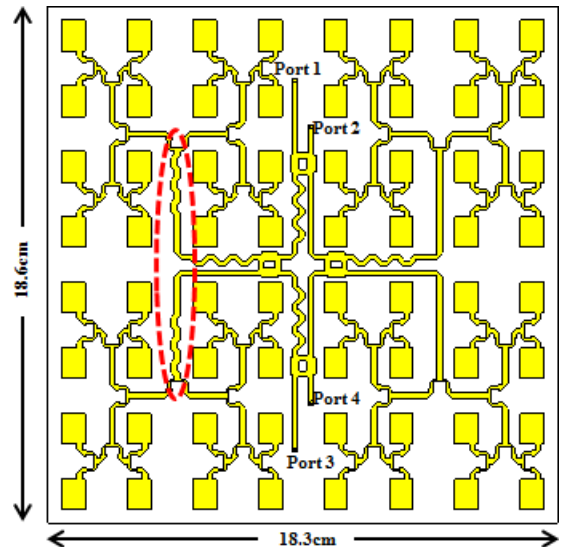
(ب)

شکل ۱۱- الگوی تشعشعی جمع و تفاضل آنتن شماره ۳ (الف) جهت سمت (ب) جهت ارتفاع.

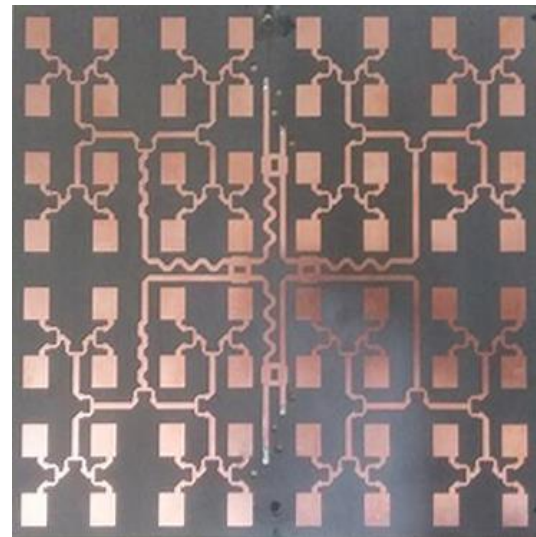


شکل ۱۲- نسبت بخش حقیقی به کل تفاضل به جمع

۰/۰۰۰۵ و لایه بیرونی از تفلون با ضریب دی‌الکتریک ۲/۱ و تانژانت تلفات ۰/۰۰۰۲ تشکیل شده است. شکل ۱۴-پ نمای دوبعدی ریدوم به همراه مشخصات هندسی آن را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

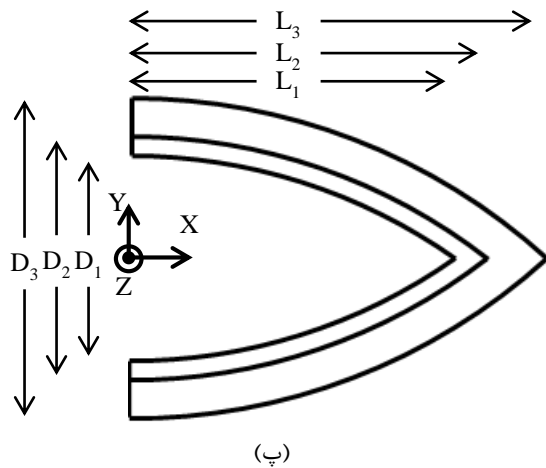
شکل ۱۰-الف) نمای کلی آرایه جدید پیشنهادی با اضافه کردن خطوط پیچ و خم دار و انتقال مدار مقایسه‌گر مونوپالس به وسط آنتن. (ب) تصویر آنتن ساخته شده شماره ۳.

$$B = \frac{4L_o^2 - D_o^2}{4D_o} \quad (10)$$

$$R = \frac{4L_o^2 + D_o^2}{4D_o} \quad (11)$$

اگر تصویر دوبعدی شکل ۱۴-الف در نظر گرفته شود، ریدوم سه-بعدی از دوران این منحنی حول محور X به وجود می‌آید. شکل ۱۴-ب ریدوم سه‌بعدی را جلوی آنتن آرایه‌ای در نرم‌افزار CST نشان می‌دهد. ریدوم شامل دو لایه می‌شود. لایه داخلی از یک نوع سرامیک به نام سیلیکای گذاشته شده با ضریب دی‌الکتریک ۳/۶ و تانژانت تلفات

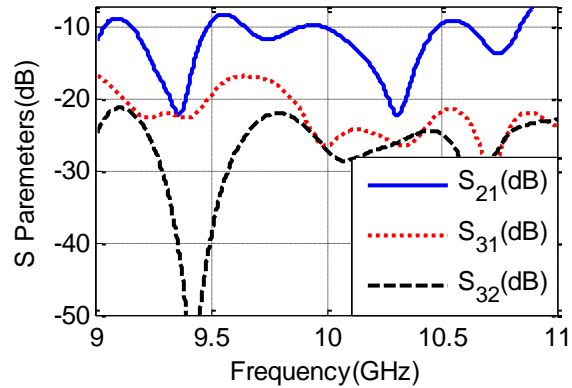




(ب)

شکل ۱۴- الف) نمای ریدوم قوس تاثراتی [۱۸]. ب) آنتن به همراه ریدوم در جلوی آن. پ) نمای هندسی و مشخصات ریدوم.

برای به دست آوردن خطاهای ناشی از حضور ریدوم در جلوی آنتن، به ازای زوایای مختلف جاروب مقدار خطای انحراف دید و تلف عبوری با شبیه سازی کردن آنتن و ریدوم در نرم افزار تمام-موج به دست می آید.

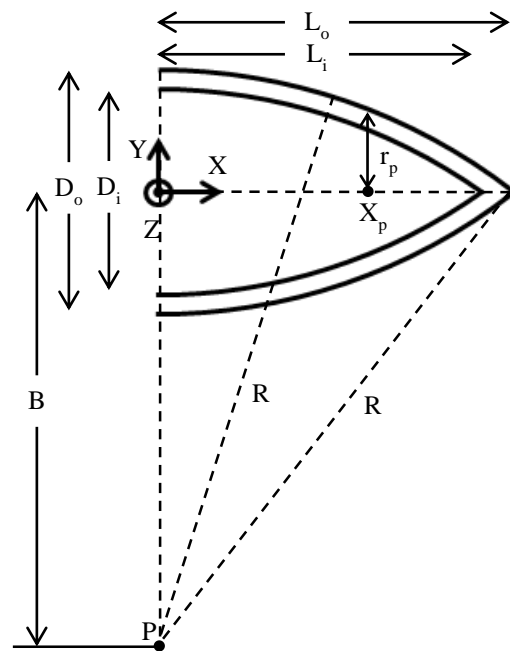


شکل ۱۳- تزویج بین پورت های مختلف آنتن

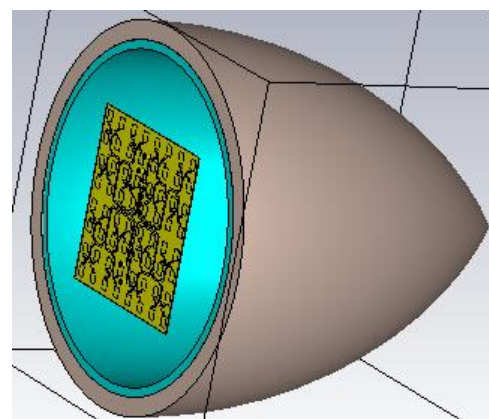
### ۲-۳-۲- شبیه سازی ریدوم

شبیه سازی هر زاویه با یک رایانه دارای پردازنده Core i7 و ۱۲GB حافظه حدود ۳ شبانه روز به طول می انجامد. بنابراین شبیه سازی ها به ازای پله های زاویه ای به اندازه ۲/۵ درجه در دو محور سمت و ارتفاع انجام می شود. برای زوایای میانی مقادیر از روش درون یابی محاسبه شده است. در شکل ۱۵-الف مقادیر خطای انحراف دید و تلف عبوری ناشی از حضور ریدوم برای جاروب در راستای سمت مشاهده می شود. شکل ۱۵-ب نیز این مقادیر را برای جاروب در راستای ارتفاع نشان می دهد. منظور از خطای انحراف دید ریدوم، انحراف مکان صفر الگوی تشعشعی تفاضل در حالت وجود ریدوم نسبت به حالت عدم وجود ریدوم است. در شکل ۱۵ نقاط گسسته به فاصله ۲/۵ درجه که با دایره و ستاره مشخص شده اند، از شبیه سازی با نرم افزار تمام-موج به دست آمده است. برای اعمال خطای ریدوم در شبیه سازی رادار لازم است که نتایج خطای ریدوم به ازای تمام زوایای سمت و ارتفاع معلوم شود. طبق نتایج شکل ۱۵، مقدار انحراف و تلفات برای دو جهت جاروب سمت و ارتفاع متفاوت است و زمانی که جاروب در هر دو راستای سمت و ارتفاع انجام شود، مقدار انحراف را باید از یک شبیه سازی جداگانه به دست آورد که به دلیل تعداد بسیار زیاد شبیه سازی ها، زمان زیادی را صرف می کند. بنابراین فرض می شود که برای هر زاویه جاروب، مقدار انحراف از جهت پرتو اصلی در راستای زاویه انحراف از محور z و برابر یکی از نمودارهای شکل ۱۵ است. نتایج این مقاله با به کار بردن مقادیر شکل ۱۵-ب که برای جاروب راستای ارتفاع و دارای مقادیر بیش تری تلف عبوری است، به دست آمده است. از طرفی، شبیه سازی دقیق زمان بر است و برای مقابله با این مشکل به خطاهای شبیه سازی در نقاط گسسته اکتفا و برای بقیه نقاط از درون یابی استفاده می شود.

مقدار انحراف معیار خطای زاویه ای رادار از رابطه (۱۲) به دست می



(الف)



(ب)

باند کاری رادار،  $k_B$  ثابت بولتزمن برابر  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ،  $F$  عدد نویز،  $BW$  پهنای باند چیرپ،  $T_{\text{chirp}}$  طول چیرپ و  $n$  تعداد پالس‌ها در بازه زمانی تجمیع پالس است. مشخص است که بهره آنتن موجب بالا رفتن سیگنال به نویز و تلف عبوری ریدوم موجب کاهش سیگنال به نویز می‌شود ولی خطای انحراف دید ریدوم و لوجی پرتو آنتن اثر مستقیم در سیگنال به نویز ندارند. بنابراین، انتظار این است که بر انحراف معیار خطای زاویه‌ای هم اثر محسوسی نداشته باشند. لازم به ذکر است که خطای انحراف دید ریدوم می‌تواند از طریق افزایش پهنای پرتو آنتن موجب کاهش بهره شود که اثری غیرمستقیم است.

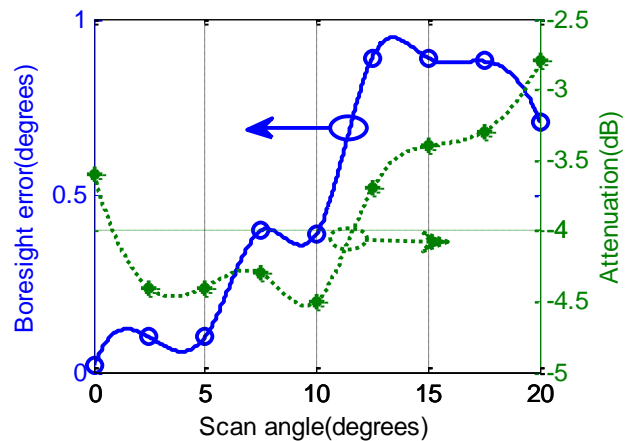
### ۳- استخراج خطای زاویه‌یابی و تحلیل نتایج

شبیه‌سازی عملکرد رادار برای ۳ آنتن مختلف به همراه ریدوم و بدون ریدوم (ریدوم ایده‌آل) در ادامه می‌آید. برای محاسبه خطای زاویه‌یابی باید دو مقدار میانگین و انحراف معیار خطای زاویه‌یابی محاسبه شوند. چراکه انحراف معیار نشان‌دهنده پخش‌شدگی زاویه به‌دست‌آمده از هدف و مقدار خطای تصادفی ناشی از وجود نویز و میانگین خطا نشان‌دهنده بخش غیرتصادفی خطا است که می‌تواند از خطاهای ایجادکننده آفست ناشی شود.

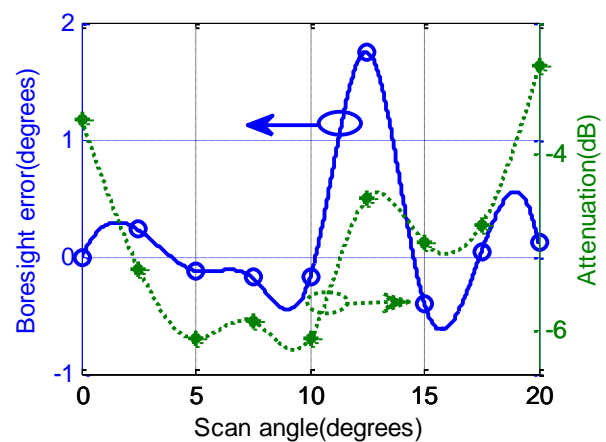
برای محاسبه میانگین و انحراف معیار خطا لازم است تا تعداد زیادی شبیه‌سازی انجام شود. دقت محاسبه برابر انحراف معیار واقعی متغیر تصادفی تقسیم بر مجذور تعداد نمونه‌ها است (رابطه ۱۴):

$$\sigma_{\text{error}} = \frac{\sigma_{\text{real}}}{\sqrt{N}} \quad (14)$$

که  $\sigma_{\text{real}}$  مقدار انحراف معیار واقعی متغیر تصادفی،  $\sigma_{\text{error}}$  انحراف معیار انحراف معیار واقعی و  $N$  تعداد نمونه‌ها است. بنابراین، افزایش تعداد نمونه‌ها تخمین دقیق‌تری از مقدار انحراف معیار متغیر تصادفی به دست می‌دهد. برای مثال با ۱۰۰ بار شبیه‌سازی دقت محاسبه میانگین و انحراف معیار به ۱۰ درصد واقعی می‌رسد. برای کاهش زمان موردنیاز، شبیه‌سازی ۳۰ بار انجام می‌شود که دقت محاسبه میانگین و انحراف معیار به ۱۸ درصد مقدار واقعی می‌رسد و این تعداد می‌تواند برای کاهش بودجه زمانی پردازش سریع، مناسب باشد. این مسیر ثابت شامل بازه‌های زمانی کوچک‌تری است که به هرکدام زمان تجمیع پالس گفته می‌شود. سپس مقادیر انحراف معیار و میانگین خطای اندازه‌گیری زاویه هدف نسبت به محور آنتن برای این ۳۰ بار برای همه زمان‌های تجمیع مسیر محاسبه می‌شود. مقدار خطای اندازه‌گیری زاویه هدف نیز از کم‌کردن مقدار ایده‌آل از مقدار به‌دست آمده از شبیه‌سازی به‌دست می‌آید. مقدار ایده‌آل در زمان انتهایی بازه تجمیع پالس قرار دارد زیرا رادار باید بداند که هدف در لحظه جاری در چه زاویه‌ای قرار دارد. شکل ۱۶ مقادیر انحراف معیار و میانگین خطای جهت‌های ارتفاع و سمت را برای ۳ آنتن در حالت بدون ریدوم نشان می‌دهد. مقدار انحراف معیار وابسته به مقدار سیگنال به نویز و مقدار میانگین تابع خطاهای جابه‌جایی سکو و خطای انحراف دید ریدوم



(الف)



(ب)

شکل ۱۵- خطای انحراف از محور و مقدار تلفات ناشی از حضور ریدوم به ازای جاروب در راستای الف) سمت. ب) ارتفاع

آید [۱]:

$$\delta\theta \approx \frac{k \theta_{\text{beam}}}{\sqrt{SNR}} \quad (12)$$

که  $\delta\theta$  مقدار انحراف معیار خطای زاویه‌ای،  $\theta_{\text{beam}}$  پهنای پرتو آنتن و  $k$  یک ثابت است. همان‌طور که از رابطه (۱۲) مشخص است با افزایش سیگنال به نویز مقدار انحراف معیار خطای زاویه‌ای کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، در بررسی پارامترهای بخش بینایی باید به این نکته توجه داشت که پارامترها چه تأثیری بر سیگنال به نویز دارند. رابطه (۱۳) ارتباط نسبت سیگنال به نویز با پارامترهای اجزای مختلف رادار را نشان می‌دهد. مقدار سیگنال به نویز برای یک هدف با سطح مقطع راداری  $\sigma_r$  در هر بازه زمانی عبارت است از:

$$SNR = \frac{P_r G^2 \lambda_0^2 \sigma_r}{(4\pi)^3 R^4 k_B T B F} BW T_{\text{chirp}} n \quad (13)$$

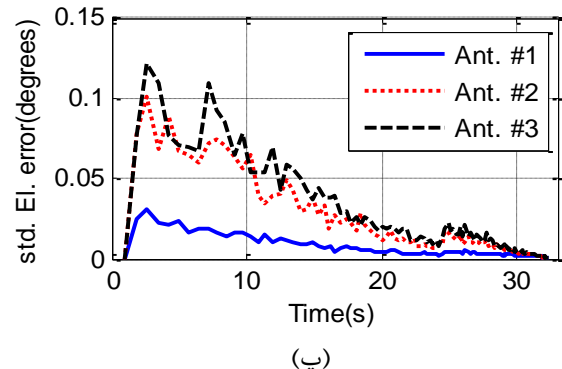
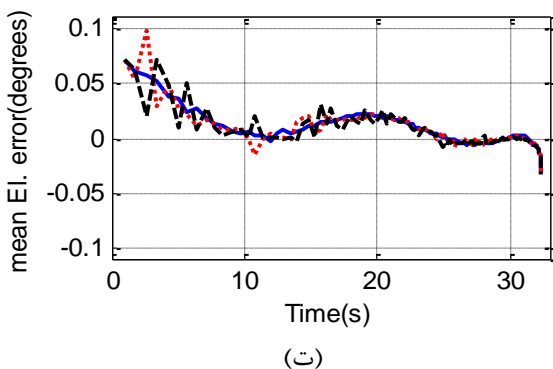
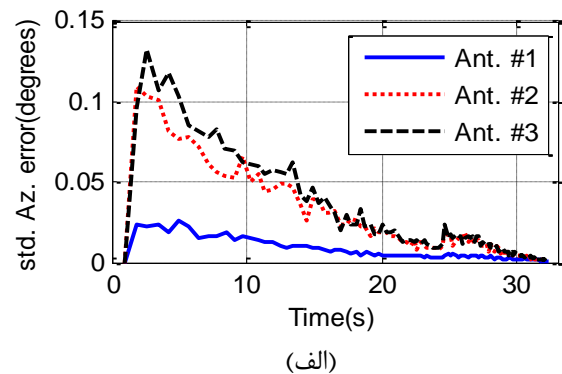
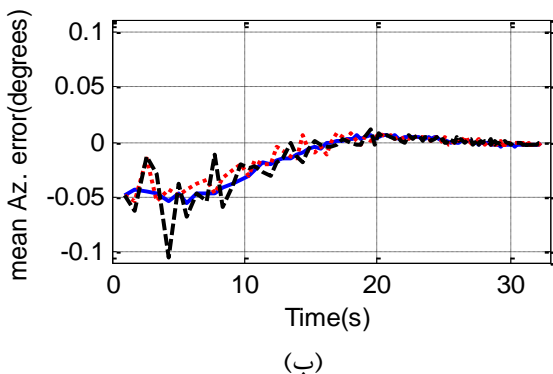
که در آن  $P_r$  توان ارسالی،  $G$  بهره آنتن،  $\lambda_0$  طول موج رادار در فرکانس مرکزی،  $R$  فاصله رادار تا هدف،  $T$  دمای نویز گیرنده،  $B$  پهنای

انحراف دید ریدوم زیاد می‌شود. در حالت وجود ریدوم نیز طبق شکل ۱۷ با کاهش بهره آنتن مقدار انحراف معیار خطا افزایش پیدا می‌کند و مقدار میانگین خطا برای هر دو آنتن شماره ۲ و شماره ۳ از یک پوش تبعیت می‌کند که نشان می‌دهد مقدار لوچی قابل ملاحظه ۲/۵۶ درجه برای آنتن ساخته شده اگر در بخش محاسبات مونوپالس برای پیدا کردن زاویه هدف در نظر گرفته شود، تأثیر چندانی بر عملکرد رادار ندارد. دلیل اختلاف میانگین خطا در حالت وجود ریدوم بین آنتن ۱ با دو آنتن دیگر می‌تواند لوچی پرتو دو آنتن شماره ۲ و ۳ باشد که موجب می‌شود مقدار انحراف ناشی از وجود ریدوم برای آن‌ها متفاوت شود.

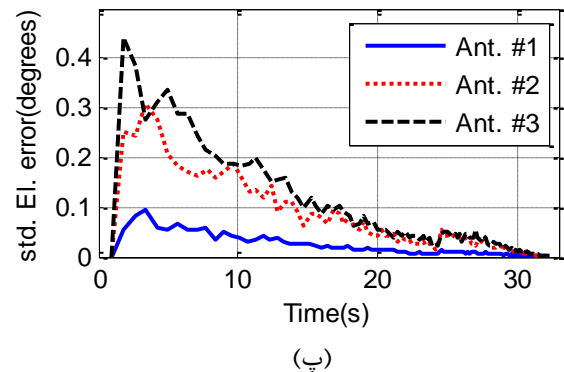
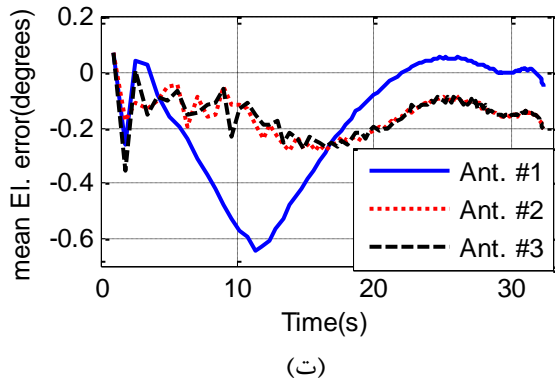
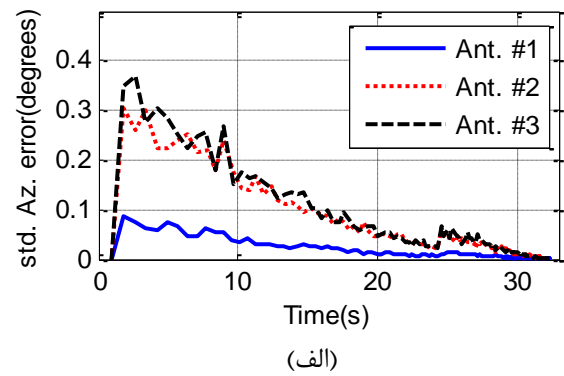
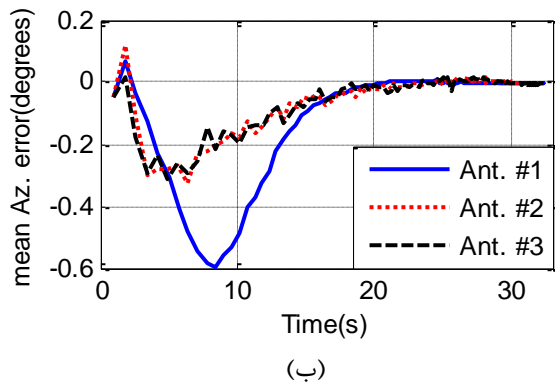
برای بررسی اثر لوچی قابل ملاحظه آنتن شماره ۳ نسبت به آنتن شماره ۲، انحراف معیار خطای زاویه سمت برای این دو آنتن در حالت عدم وجود ریدوم، برحسب سیگنال به نویز رسم می‌شود. محاسبه سیگنال به نویز از رابطه (۱۴) انجام می‌شود. بنابراین، اثر بهره آنتن در مقدار انحراف معیار خطا کنار می‌رود و می‌توان اثر لوچی پرتو آنتن را به‌تنهایی بررسی کرد. شکل ۱۸ انحراف معیار خطای سمت را برحسب سیگنال به نویز برای دو آنتن شماره ۲ و ۳ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۸ دیده می‌شود، تنها اختلاف دو نمودار، حضور نمودار آنتن شماره ۳ در سیگنال به نویزهای پایین‌تر است که دلیل آن می‌تواند بهره کمتر آن باشد؛ اما در بخش مشترک نمودار، بین نمودارهای خطای این دو آنتن نمی‌توان تفکیک قائل شد. بنابراین، اثر لوچی آنتن در آنتن در پردازش کاملاً جبران شده است.

است. طبق شکل ۱۶ کم‌ترین مقدار انحراف معیار به ترتیب مربوط به آنتن‌های شماره ۱، ۲ و ۳ است پس هر چه مقدار بهره آنتن بیش‌تر باشد مقدار انحراف معیار کم‌تر می‌شود. همچنین باگذشت زمان مقدار انحراف معیار به‌طور پیوسته کاهش پیدا می‌کند که به دلیل کاهش فاصله و در نتیجه افزایش مقدار سیگنال به نویز است. همچنین همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، مقدار میانگین خطا برای همه آنتن‌ها در هر دو جهت سمت و ارتفاع بسیار به هم نزدیک است و میانگین خطای هر ۳ آنتن یک پوش را دنبال می‌نماید که نشان می‌دهد لوچی پرتو آنتن‌ها اثری در میانگین خطا ندارد. مقدار میانگین ۴ انحراف معیار اول بازه زمانی برای جهت سمت برای آنتن‌های شماره ۱ تا ۳ به ترتیب برابر ۰/۰۲۲۲۵، ۰/۰۹۸۸ و ۰/۱۱۳۶ و برای جهت ارتفاع برابر ۰/۰۲۴۶، ۰/۰۸۳۹ و ۰/۰۹۶۲ در حالت بدون وجود ریدوم است.

شکل ۱۷ نیز مقادیر انحراف معیار و میانگین خطای جهت‌های ارتفاع و سمت را برای ۳ آنتن در حالت وجود ریدوم نشان می‌دهد. مقدار میانگین ۴ انحراف معیار اول بازه زمانی برای جهت سمت برای آنتن‌های شماره ۱ تا ۳ به ترتیب برابر ۰/۰۷۱۰، ۰/۲۷۲۲ و ۰/۳۲۵ و برای جهت ارتفاع برابر ۰/۰۷۲۰، ۰/۲۶۹۵ و ۰/۳۵۴ در حالت وجود ریدوم است. از مقایسه دو شکل ۱۶ و ۱۷ معلوم می‌شود در حالت وجود ریدوم مقدار انحراف معیار و میانگین خطا در هر دو جهت سمت و ارتفاع، بیش‌تر از حالت بدون ریدوم است. دلیل افزایش مقدار انحراف معیار، تلف عبوری ناشی از حضور ریدوم و در نتیجه کاهش مقدار سیگنال به نویز است. مقدار میانگین خطا نیز به دلیل وجود خطای



شکل ۱۶- انحراف معیار و میانگین خطای زاویه‌یابی برای آنتن‌های شماره (۱) توپر، (۲) نقطه‌چین و (۳) خط‌چین بدون ریدوم. الف) انحراف معیار سمت. ب) میانگین سمت. پ) انحراف معیار ارتفاع. ت) میانگین ارتفاع.

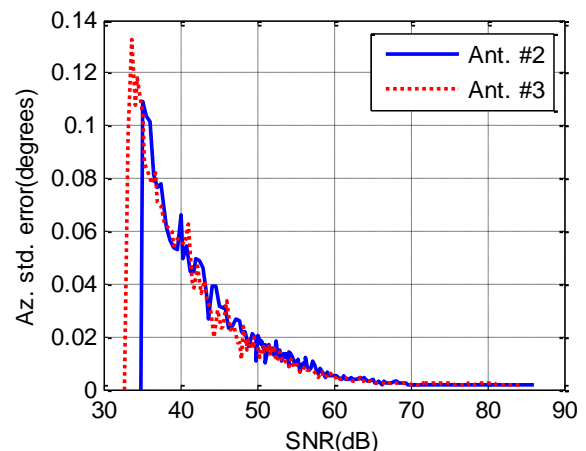


شکل ۱۷- انحراف معیار و میانگین خطای زاویه یابی برای آنتن‌های شماره (توپر)، شماره ۲ (نقطه چین) و شماره ۳ (خط چین) با حضور ریدوم. الف) انحراف معیار سمت. ب) میانگین سمت. پ) انحراف معیار ارتفاع. ت) میانگین ارتفاع.

با در نظر گرفتن این لوچی در بخش محاسبات مونوپالس، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد رادار نخواهد گذاشت.

### مراجع

- [1] M. L. Skolnik, *Introduction to RADAR Systems*, 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw Hill, 2001.
- [2] J. H. Hughen, A. B. Baker and D. J. Sullivan, "Demonstration of a SAR mode for a lightweight 35 GHz MMW radar," Record of the 1994 IEEE National Radar Conference, pp. 23-28, Atlanta, 1994.
- [3] T. J. Peregrin, F. A. Okurowski and A. H. Long, "Synthetic aperture radar guidance system and method of operating same", US patent 5,430,445 A, 1995.
- [4] M. Ruegg, E. Meier and D. Nuesch, "Capabilities of dual-frequency millimeter wave SAR with monopulse processing for ground moving target indication," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 45, no. 3, pp. 539-553, Mar. 2007.
- [5] A. Freeman and M. Zink, "An application of the monopulse principle to determining elevation angles in SAR images," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 32, no. 3, pp. 616-625, May 1994.
- [6] S. Sharensen, "Angle Estimation Accuracy with a Monopulse Radar in the Search Mode," IRE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics, vol. ANE-9, no. 3, pp. 175-179, Sept. 1962.
- [7] W. Nester, "A study of tracking accuracy in monopulse phased arrays," IRE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 10, no. 3, pp. 237-246, May 1962.
- [8] J. W. McGinn, "Thermal Noise in Amplitude Comparison Monopulse Systems," IEEE Transactions on Aerospace



شکل ۱۸- انحراف معیار خطای سمت برای دو آنتن شماره ۲ و ۳

### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله در ابتدا اجزای یک سامانه راداری مونوپالس با حرکت پرتابه‌ای شامل آنتن، ریدوم و واحد پردازش معرفی شدند. در ادامه سه نوع آنتن با بهره‌ها و مقدار لوچی‌های متفاوت معرفی و در حلقه شبیه‌ساز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. از نتایج شبیه‌سازی این استنباط به دست آمد که با افزایش مقدار بهره آنتن انحراف معیار خطای زاویه‌ای کاهش پیدا می‌کند و حضور ریدوم که موجب کاهش سیگنال به نویز می‌شود، مقدار انحراف معیار خطا را نیز افزایش می‌دهد. همچنین نشان داده شد، اگر آنتن مورد استفاده دارای لوچی قابل ملاحظه‌ای باشد

- [13] R. S. Elliot, *Antenna Theory and Design*, Revised Edition, Wiley-InterScience, 2003.
- [14] H. Wang, D. G. Fang and X. G. Chen, "A compact single-layer monopulse microstrip antenna array," *IEEE Trans. Ant. & Propag.*, vol. 54, no. 2, pp. 503-509, Feb. 2006.
- [۱۵] سید اکبر ترابی، طراحی و ساخت آنتن مونوپالس میکرواستریپی باند X، کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، صفحات ۲۸-۷۷، ۱۳۹۲.
- [16] I. J. Bahl and P. Bhartia, *Microstrip Antennas*, Artech House, USA, 1980.
- [17] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley & Sons, 2005.
- [18] D. J. Kozakoff, *Analysis of Radome-Enclosed Antennas*, 2<sup>nd</sup> Edition, Artech House, 2010.
- [۱۹] مسعود نیکوکار، بهمن عربزاده، آمار و احتمالات کاربردی، تهران، نشر آزاده، ۱۳۸۳.
- and Electronic Systems, vol. AES-2, no. 5, pp. 550-556, Sept. 1966.
- [9] R. S. Andrews, "Antenna and other systematic effects on amplitude comparison monopulse systems," *IEE Journal on Electronic Circuits and Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 103-108, May 1979.
- [۱۰] زهرا حبیبی، مرتضی کازرونی، سید حسین محسنی ارمکی و عماد حمیدی، «ارائه یک روش کاربردی جهت کالیبراسیون آنتن‌های آرایه فازی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۵، شماره ۴، صفحه ۷۹-۸۴، ۱۳۹۴.
- [۱۱] فرهاد خسروی افسوی، محمدنقی آذرمنش و جواد نوری‌نیا، «به‌کارگیری ساختارهای EBG به منظور افزایش پهنای باند و دایرکتیویته‌ی آنتن میکرواستریپ»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۳، شماره ۲، صفحه ۱-۸، ۱۳۹۲.
- [12] S. M. Sherman and D. K. Barton, *Monopulse Principles and Techniques*, 2<sup>nd</sup> Edition, Artech House, 2011.

## زیرنویس‌ها

- <sup>1</sup> Sequential lobing
- <sup>2</sup> Conical scan
- <sup>3</sup> Monopulse
- <sup>4</sup> Boresight error(BSE)
- <sup>5</sup> Full-wave
- <sup>6</sup> Tangent ogive