

بهبود دقت زاویه‌ای ردگیری در رادار آرایه فازی

احسان عسگری^(۱) - مؤده مهدوی^(۲) - روح اله حافظی فرد^(۳)

(۱) کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، شهر قدس، ایران

(۲) استادیار- دانشکده مهندسی برق، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، شهر قدس، ایران

(۳) استادیار- دانشکده مهندسی برق، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۲۷

خلاصه: مونوپالس، تکنیکی است که برای استخراج جهت تشعشع امواج به کار می‌رود. تشعشع، می‌تواند ناشی از منابع فعال همچون آنتن رادار، اختلال گر و ... یا منابع غیرفعال همچون صفحات بازتاب‌دهنده‌ی بدنه‌ی یک هواپیما باشد. در حال حاضر تکنیک مونوپالس در بسیاری از سامانه‌های مدرن راداری بکار گرفته شده است. در دقت ردگیری رادار، ملاک ارزیابی عملکرد زاویه‌یابی، شیب تفاضل است که نیاز به داشتن اطلاعاتی دقیق از ابعاد آنتن، طول موج و تابع روشن‌سازی است. در این مقاله برای ایجاد عدم وابستگی به دانستن اطلاعات دقیق از آنتن، مقدار شیب تفاضل، نرمالیزه شده است که آنرا می‌توان بدون اطلاع از شکل و ابعاد دریچه، طول موج و تابع روشن‌سازی و تنها با استفاده از الگوی تشعشعی اندازه‌گیری شده آنتن، بدست آورد. با انتخاب تغذیه‌های چهار شیپوری، بهینه‌سازی تغذیه بر اساس زاویه‌ی لوچ انجام می‌گیرد که در این روش نتایج حاصل بیانگر آن است که در تمامی محدوده عملکرد، زاویه لوچی بهینه، دارای کمترین خطای زاویه‌ای می‌باشد. شبیه‌سازی‌ها اطمینان ما را از برتری عملکرد رادار ردگیر با زاویه لوچی بهینه در تمامی زاویه‌های قرارگیری هدف در محدوده الگوی رادار مونو پالس دامنه، حاصل می‌نماید.

کلمات کلیدی: مونوپالس دامنه، دقت ردگیری، رادار آرایه فازی، زاویه لوچی، تغذیه‌های شیپوری

Improved Angular Tracking Accuracy in Phased Array Radar

Ehsan Asgari⁽¹⁾ - Mojdeh Mahdavi⁽²⁾ - Ruhollah Hafezifard⁽³⁾

(1) MSc.-Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Tehran, Iran
ehsanasgari218@gmail.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Tehran, Iran
m.mahdavi@qodsiau.ac.ir

(3) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Eslamshahr Branch, Tehran, Iran
hafezifard@gmail.com

Abstract

Monopulse is a technique which is used to detect radiation direction of waves. Radiation can be originated from active sources such as radar antennas, disturbances, etc., or passive sources, such as the reflector plates of an aircraft. Nowadays, monopulse technique is being used in many modern radar systems. In radar tracking accuracy, the criterion for evaluating the angulation function is the differential gradient. It needs to have accurate information about antenna dimensions and wavelengths. In this paper, the difference gradient value is normalized and can be completed with knowing the radiation pattern of the antenna without knowing wavelength and gate dimensions. Then, by choosing a four-horns feed, the feed is optimized based on the squint angle. The results indicate that in the whole functional range, the optimum squint angle has the least angular error. Simulations provide us with confidence in the superior performance of the radar tracker with an optimal squint angle for all target angles within the range of the pattern of monopulse radar.

Index Terms: Monopulse, Tracking Accuracy, Phased Array Radar, Squint Beams, Horn Feeds.

۱- مقدمه

طراحی و خوداتکایی در سیستم‌های راداری آرایه فازی چند عملیاتی، برای هر کشوری بسیار پراهمیت و از اهداف استراتژیک نظامی به شمار می‌رود. لذا برای کشور جمهوری اسلامی ایران که دشمنان زیادی چه در منطقه و چه در سطح فرا منطقه‌ای دارد پدافند عامل جزء پراهمیت‌ترین پارامترهای امنیتی کشور محسوب می‌گردد که رادار چند عملیاتی آرایه فازی^۱، اصلی‌ترین گزینه پدافند به شمار می‌رود.

وظیفه این نوع رادار مقابله و ردگیری همزمان با چندین هدف پروازی است که مستلزم استخراج مشخصاتی از قبیل سرعت، مکان، نوع اهداف و غیره است. یکی از مهمترین مشخصه رادار، دقت زاویه‌ای آن است که کارایی و سطح عملکرد رادار آرایه را تعیین می‌کند. در طراحی رادارهای آرایه فازی هدف اصلی رسیدن به بالاترین دقت اندازه‌گیری قابل دسترسی در کشف و ردگیری اهداف است. دقت ردگیری اهداف به دو بخش دقت ردگیری در برد و زاویه (سمت و ارتفاع) تقسیم‌بندی می‌شود که متغیرهای رسیدن به هر کدام از دقت‌های مذکور با یکدیگر متفاوت می‌باشد.

یکی از مسائل مهم سیستم‌های راداری، تخمین پارامترهای هدف شامل فاصله، زاویه سمت و ارتفاع (مکان هدف)، و همچنین سرعت آن است که در نهایت به ردگیری صحیح هدف منجر می‌شود. در طراحی رادارها با دو رویکرد مواجه هستیم. در دسته‌ای از رادارها (از جمله رادار S300 که یک نمونه موفق از یک سیستم سلاح جهت پدافند هوایی برد بلند می‌توان نام برد) مبنای رسیدن به دقت زاویه‌ای مبتنی بر ساختار پیچیده آنتن، در چینش عناصر تشعشعی و تخصیص منابع ثابت است، به عبارتی برای رسیدن به دقت‌های بالاتر از آنتن‌های پیچیده استفاده شده است و از پیچیدگی نرم‌افزار و سیگنال‌دهی جلوگیری نموده است [۳]-[۱]. ولی در دسته دیگری از رادارها (مانند سیستم‌های Arrow) برای رسیدن به دقت‌های زاویه‌ای بیشتر بر سیگنال‌دهی پیچیده، تخصیص منابع متناسب با برد اهداف و پردازش داده استفاده شده است [۴]. مشخصات سیستم‌های مذکور به صورت کامل در منابع نام برده شده بیان گردیده است ولی در طراحی رادارهای آرایه فازی برای بهبود دقت زاویه‌ای، به دلیل برخورداری از ویژگی‌های مهمی همچون شکل‌دهی پرتو و جاروب الکترونیکی، برای ردگیری هدف بسیار مناسب هستند.

رادار آرایه فازی یکی از پیشرفته‌ترین نوع رادار است که امکان تغییر جهت گلبرگ اصلی آنتن رادار هنگامی که آنتن قادر به حرکت مکانیکی نیست فراهم نموده و امکان جاروب محیط وسیعی را فراهم می‌سازد و قابلیت هدایت چندین موشک به سمت هدف را فراهم می‌کند. این رادارها قادرند پرتوهای انرژی رادار با پهنای متفاوت را در کسری از ثانیه در سطح بسیار وسیعی گسیل دهند. تئوری آرایه فازی به طور وسیعی در کاربردهای نظامی، پزشکی، ارتباطات و غیره بکارگرفته می‌شود [۵]. در کاربردهای نظامی این آنتن‌ها قادر به چرخش گلبرگ اصلی الگوی آنتن در زمان‌های بسیار کوتاه در حد چند نانو ثانیه بوده که امکان قفل بر روی تعداد بسیار زیادی از اهداف را فراهم می‌آورد [۶]. در رادارهای آرایه فازی می‌توان با تقسیم زمانی مناسب، چندین هدف را به صورت

همزمان ردگیری نمود [۷].

یکی از مسائلی که در سال‌های اخیر در این رادارها مورد بحث است تغییر شکل پرتو با حرکت پرتو از راستای عمود بر آنتن می‌باشد. در این تغییر شکل، پهنای باند نیم توان پرتو افزایش یافته و تقارن پرتو، از بین می‌رود و عدم تعادل دامنه و فاز بین پرتوهای منحرف شده به وجود می‌آید که باعث افزایش خطا در تشخیص زاویه می‌گردد [۸]. دسته وسیعی از تحقیقات اخیر در زمینه بهبود زاویه‌سنجی در این نوع رادارها است.

از آنجا که رادارهای آرایه فازی می‌توانند به صورت الکترونیکی چندین پرتو تشکیل دهند، نیاز به سخت‌افزار خاصی برای استفاده از پردازش ندارند. برای تخمین زاویه هدف در سیستم‌های راداری، روش‌های متفاوتی وجود دارد که به عنوان نمونه می‌توان به روش‌های جاروب مخروطی، پرتو متوالی و تخمین زاویه مونوپالس^۲ اشاره کرد. از آنجا که در روش پردازشی مونوپالس، بین دو یا چند سیگنال که به طور همزمان در چند پرتو ظاهر می‌شوند، مقایسه صورت می‌گیرد، دقت اندازه‌گیری زاویه تحت تاثیر نوسانات دامنه هدف نیست. همچنین، چون پرتوی حاصل جمع در ارسال و دریافت به سمت هدف نشانه‌گیری شده است، نسبت سیگنال به نویز در روش مونوپالس بیشتر از سایر روش‌ها است. لذا روش مونوپالس روش بهتری برای تخمین زاویه هدف، در مقایسه با دو روش دیگر، محسوب می‌شود. دلایل دیگری نیز برای ارجحیت روش مونوپالس وجود دارند که برای آشنائی با آن‌ها می‌توان به مرجع [۱] مراجعه کرد.

رادار ردگیر به راداری گفته می‌شود که به صورت خودکار پرتو خود را روی هدف دلخواه در حال مانور نگاه داشته و به ردگیری آن بپردازد اما در حال حاضر در رادارهای آرایه فازی مدرن عمل ردگیری با سنجش‌های متوالی زاویه‌ای حضور هدف و به کمک تکنیک‌های پردازش داده انجام می‌شود [۱]. چنین رادارهایی برای اندازه‌گیری دقیق زاویه‌ای اهداف از پرتوهای بسیار باریک حدوداً یک درجه‌ای استفاده می‌کنند و می‌توانند به دقت زاویه‌یابی تا ۰/۰۵ درجه نیز دست یابند [۹]. یکی از پارامترهای مهمی که رادار، در کنار اندازه‌گیری برد هدف ارائه می‌دهد زاویه‌ی فضایی حضور هدف است که استخراج آن در رادارهای ردگیر ضروری است. می‌دانیم دقت اندازه‌گیری زاویه حضور اهداف به اندازه‌ی پهنای پرتو وابسته است چرا که سیگنال ارسالی به سمت هدف از زمان شروع قرارگیری پرتو بر روی هدف به سمت رادار بازتاب داده می‌شود، این بازتاب تا زمان عبور پرتو از روی هدف ادامه می‌یابد فلذا هرچه پرتو باریک‌تر باشد با دقت بیشتری می‌توان زاویه‌ی حضور هدف را تخمین زد. اما پرتو رادار در زوایای مختلف متفاوت است و دامنه سیگنال دریافتی از هدف با عبور یکنواخت پرتو از روی آن به صورت متقارن تغییر پیدا می‌کند، بنابراین با دقت در این نکته می‌توان به روش‌هایی جهت سنجش دقیق‌تر زاویه که دستیابی به آن در برخی کاربردها الزامی است نیز دست یافت. در واقع در رادارهای ردگیر زاویه‌ای هرگونه مانور هدف و تلاش آن جهت خروج از پرتو رادار منجر به تولید یک سیگنال، تحت عنوان سیگنال تصحیح می‌شود. در یک رادار ردگیر زاویه‌ای برای هر جهت ردگیری (زاویه عمودی و افقی) یک

ردگیری نمود ولی به دلیل محدودیت در پیاده‌سازی تعداد حالات پرتو، امکان چرخش کامل پرتو وجود ندارد و به ناچار باید پرتو را به صورت گسسته چرخاند. در این مقاله برای یک رادار آرایه فازی ضمن شبیه‌سازی پرتوهای مجموع و تفاضل، مقدار خطای زاویه برحسب زاویه هدف از مرکز پرتو با شبیه‌سازی به دست آمده و براساس حداقل زاویه چرخش گسسته پرتو، نسبت سیگنال به نویز مقایسه شده است که تاکنون شبیه‌سازی کاملی در این زمینه صورت نگرفته است.

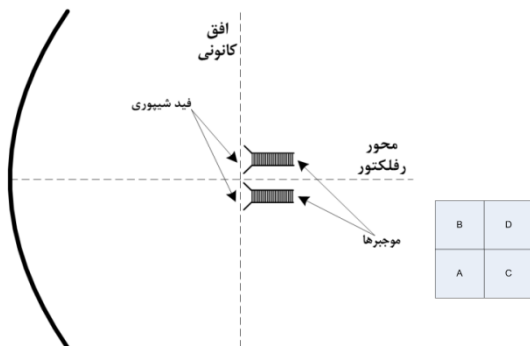
مطالب به این صورت مرتب شده است که در بخش دوم مقدمات روش پیشنهادی براساس ردگیری مونوپالس و روش بهینه‌سازی زاویه لوچ^۳ بیان می‌شود. در بخش سوم، بهینه‌سازی زاویه لوچ براساس پارامترهای مورد نیاز مطرح شده و در بخش چهارم تحلیل و شبیه‌سازی روش پیشنهادی با نرم افزار، نمایش داده شده و در نهایت نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- معرفی روش پیشنهادی

۲-۱- ردگیری مونوپالس

خصیصه‌ی مشترک رادارهای مونوپالس که به این نوع رادار، مقایسه گلبرگ همزمان^۴ نیز گفته می‌شود، ایجاد همزمان چهار پرتو در دریافت است. از آنجا که هر چهار پرتو دریافت همزمان ایجاد می‌شوند رادار مونوپالس دارای نرخ داده دریافتی بالاتری نسبت به سایر انواع رادارهای نوسانات هدف دچار خطا نمی‌شود چرا که ایجاد همزمان پرتوهای دریافتی مانع از تاثیرگذاری نوسانات بر روی ردگیری می‌شود [۱۱].

در شکل (۱) آنتن رادار مورد بحث، در شکل (۲) پرتوهای تولیدی و در شکل (۳) نمای سخت افزاری رادار مونوپالس، آمده است. فرض می‌کنیم نمادهای A, B, C و D بیانگر سطح ولتاژ سیگنال دریافتی از هر یک از پرتوها باشد. در دید صرفاً نظری هر یک از چهار پرتو را می‌توان به چهار گیرنده متصل کرد و مقایسه دامنه را انجام داد. اما در عمل حتی اگر فاز و دامنه گیرنده‌ها انطباق داده شده باشند، میزان آنها با تغییرات فرکانس، سطح سیگنال، زمان و شرایط محیطی تغییر خواهد کرد. این مشکل در رادارهای مونوپالس اولیه به وفور دیده می‌شد و منجر به ایجاد خطاهایی قابل توجه در اندازه‌گیری زاویه‌ی هدف می‌شد.



شکل (۱): آنتن رادار مونوپالس مورد بحث از بغل (سمت چپ) و ترتیب قرارگیری فیدها از روبرو (سمت راست)

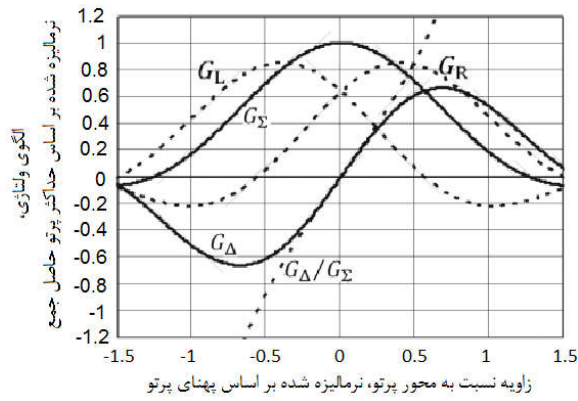
Fig. (1): The side view of the monopulse antenna (left one) and the front view of constraints arrangement (right one)

سیگنال تصحیح مجزا تولید می‌شود که بیانگر حرکت هدف به سمت‌های چپ، راست، بالا و یا پایین است. از این سیگنال خطا جهت کنترل جهت قرارگیری پرتو رادار و ردگیری هدف استفاده می‌شود [۱۰]. روش تغییر گلبرگ در واقع نخستین روش ردگیری زاویه‌ای راداری محسوب می‌شود. در این روش پرتو یا گلبرگ آنتن به جای قرارگیری مستقیم بر روی هدف با سرعتی بالا به دو سمت خط دید آنتن تغییر جهت داده می‌شود. مرور مخروطی روشی مشابه تغییر گلبرگ است. کلیدزنی پرتو یا کلیدزنی گلبرگ را می‌توان به صورت مکانیکی یا الکترونیکی انجام داد، در صورتی که به جای تغییر گلبرگ چهار پله‌ای گسسته‌ی ذکر شده پرتو را به صورتی پیوسته حول محور دید بچرخانیم نتیجه یک رادار ردگیر جاروب مخروطی خواهد بود. در واقع در این نوع رادارها اگر هدف دقیقاً در محور دید رادار قرار نگیرد اکو بازگشتی از آن دارای دامنه‌ی متغیر و مدوله شده خواهد بود، با مشاهده این تغییرات می‌توان یک سیگنال خطا تولید کرد و زاویه‌ی تصحیح جهت نشانه‌روی صحیح پرتو به سمت هدف را به دست آورد. روش جاروب مخروطی به عنوان روشی موفقیت‌آمیز از زمان جنگ جهانی دوم و در مواردی که حداکثر دقت مورد نیاز نیست مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰].

منبع اصلی بروز خطا در دو روش ذکر شده نوساناتی است که در دامنه اکوی بازگشتی اکثر اهداف در هر جاروب وجود دارد. این نوسانات دارای طیف فرکانسی گسترده‌ای در نزدیکی فرکانس تغییر گلبرگ یا جاروب بوده و خطاهای قابل توجهی را در اندازه‌گیری زاویه هدف بوجود می‌آورند. در واقع به زبان ساده‌تر رادار قادر نیست تغییرات پالس به پالس دامنه اکو هدف که ناشی از انحراف هدف از محور دید یا نوسانات آن است را تشخیص دهد.

محدودیت دیگر، در نرخ داده مورد نیاز رادار است چرا که برای تخمین زاویه حضور هدف در هر سمت نیاز به دریافت حداقل چهار اکو خواهیم داشت. این امر در مواجهه با اهداف دارای شتاب زاویه‌ای بالا به محدودیتی اساسی مبدل خواهد شد. علاوه بر این در رادارهای مرور مخروطی مشکل دیگری نیز وجود دارد و آن ارتعاشات مکانیکی است که مانع از هم‌تراز نگه داشتن محور دید می‌شود، منجر به ایجاد خطا می‌شود [۱۰]. یک نوع رادار مونوپالس که از آن تحت عنوان مونوپالس مقایسه دامنه یاد می‌شود جهت تعیین زاویه، همه گلبرگ‌ها را همزمان ایجاد کرده و با مقایسه اکوهای دریافتی از هر گلبرگ زاویه را محاسبه می‌کند. البته برای ارسال امواج تنها یک پرتو که سایر پرتوها را در بر بگیرد کفایت خواهد کرد. خصیصه‌ی مشترک رادارهای مونوپالس ایجاد همزمان چهار پرتو در دریافت است. از آنجا که هر چهار پرتو دریافت همزمان ایجاد می‌شوند رادار مونوپالس دارای نرخ داده دریافتی بالاتری نسبت به سایر انواع رادارهای ردگیر است [۱۱].

در رادارهای مونوپالس، چهار پرتو دلخواه توسط آرایه آنتن‌ها ایجاد شده و با استفاده از سیگنال دریافتی از این چهار پرتو، سیگنال‌های مورد نیاز (مجموع و تفاضل) ساخته می‌شوند. این آنتن‌ها متناسب با خطای ایجاد شده با روش مونوپالس، هدف را دنبال می‌کند. در رادارهای مورد بحث می‌توان با تقسیم زمانی مناسب، چندین هدف را به صورت همزمان



شکل (۴): الگوهای تشعشعی آنتن مونوپالس مقایسه دامنه
Fig. (4): The radiation pattern of amplitude comparison monopulse antenna

۲-۲- مونوپالس بهینه

در آنالیزهای اولیه طراحی آنتن مونوپالس، تئوری آنتن مونوپالس بهینه که براساس آن بالاترین دقت ممکن، در محیطی که تنها عامل تولید خطا نویز گرمایی باشد، ارائه می‌شود. در ابتدا روشی را که طی آنها می‌توان الگوی تشعشعی زوج (حاصل جمع) و فرد (تفاضل) را ایجاد و از آن برای اندازه‌گیری زاویه هدف استفاده کرد، بیان نموده [۱۵][۱۳]. سپس در ادامه براساس نتایج به دست آمده بیشینه ضریب تقویت G_0 (که می‌توان از یک ناحیه دهانه آنتن به دست آورد) از طریق روشن‌سازی یکنواخت ناحیه مذکور به دست می‌آوریم. رابطه (۴) بیانگر بیشینه ضریب تقویت است که از دهانه آنتن به دست می‌آید.

$$g_0(x, y) = 1 \quad |x| \leq \frac{w}{2} \quad |y| \leq \frac{h}{2} \quad (4)$$

که در آن w و h به ترتیب عرض و ارتفاع دهانه و x و y بیانگر ابعاد متناسب هستند. این انتخاب ضریب تقویت توان حاصل جمع بهینه‌ی بیان شده در معادلات (۵) و (۶) به ترتیب برای دهانه‌ی مستطیلی و دایروی را ارائه می‌دهد:

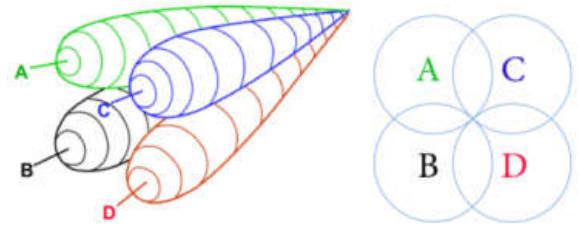
$$G_0 = \frac{4\pi wh}{\lambda^2} \quad (5)$$

$$G_0 = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \quad (6)$$

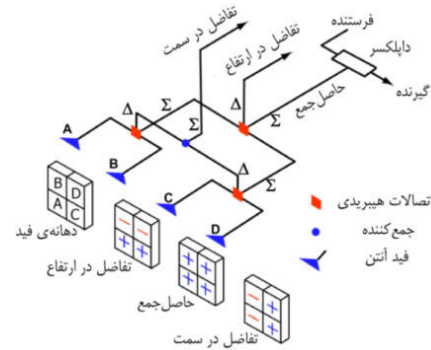
که در آن λ طول موج و D قطر دهانه‌ی دایروی است. برای دهانه‌ی بیضوی کافی است مضرب W/h مربوط به دو محور را با D^2 جایگزین کنیم. در ابتدا شیب ولتاژ الگوی تشعشعی فرد در میدان دور را به عنوان ملاکی از توانایی زاویه‌یابی آنتن انتخاب کردیم. در این صورت تابع روشن‌سازی تفاضلی نرمالیزه در افق به صورت معادله (۷) قابل بیان خواهد بود [۱۵]:

$$g_{d0}(x) = 2\sqrt{3}x \quad |x| \leq \frac{w}{2} \quad g_{d0}(y) = 1 \quad |y| \leq \frac{h}{2} \quad (7)$$

که در آن ثابت موجود در تابع $g_{d0}(x)$ سبب توزیع یکنواخت توان روشن‌سازی در دهانه می‌شود. در صفحه‌ی عمودی لازم است h و y جایگزین w و x به کار رفته در معادله (۷) شود. الگوی ولتاژی متناسب با روشن‌سازی یکنواخت g_{d0} را می‌توان به دست آورد. الگوی حاصل جمع در افق به صورت معادله (۸) قابل محاسبه است:



شکل (۲): پرتوهای تولیدی در رادار مونوپالس مقایسه دامنه
Fig. (2): The generated beams of amplitude comparison monopulse radar



شکل (۳): نمای سخت‌افزاری از نحوه‌ی تولید پرتوهای حاصل جمع، تفاضل در سمت و تفاضل در ارتفاع

Fig. (3): The hardware view of the production manner of addition beams, subtraction in azimuth beams, and subtraction in altitude beams

پرتو حاصل جمع به صورت رابطه (۱) و پرتوهای تفاضل سمت و ارتفاع را به صورت روابط (۲) و (۳) می‌توان بیان کرد:

$$G_{\Sigma} = \frac{1}{2} (A + B + C + D) \quad (1)$$

$$G_{\Delta\theta} = \frac{1}{2} [(C + D) - (A + B)] \quad (2)$$

$$G_{\Delta\phi} = \frac{1}{2} [(A + C) - (B + D)] \quad (3)$$

الگوی تشعشعی حاصل جمع الگویی است که بیشینه آن در محور مونوپالس قرار دارد. البته در عمل به دلیل تقارن غیردقیق بیشینه پرتو حاصل جمع در محل پرتوهای تفاضلی قرار نمی‌گیرد.

معمولاً پهنای پرتو آنتن نیز مانند تقویت‌کننده‌ها، به صورت یک طرفه و نصف توان تعیین می‌شود؛ یعنی در جایی که مقدار ولتاژ $1/\sqrt{2}$ برابر مقدار ماکزیمم ولتاژ است [۱۲][۱۳].

اطلاعات زاویه به فرم نسبت به دست می‌آیند. نسبت در سمت مثبت محور، قرینه نسبت در سمت چپ است. تابع نسبت مونوپالس، تابعی فرد و حقیقی از زاویه ورود اکو است. در شکل (۴) الگوی تشعشعی آنتن مونوپالس به نمایش آمده است.

$$K_m = \frac{\theta_{bw}}{\sqrt{G_m}} \frac{d}{d\theta'} d(\theta')|_{\theta=0} = \frac{\theta_{bw}}{\sqrt{\eta_a}} K \quad (15)$$

که در آن η_a راندمان دریچه و $\theta' = \theta/\theta_3$ زاویه‌ی پهنای پرتو اندازه‌گیری شده با واحد W/λ است.

شیب مونوپالس نرمالیزه‌ی K_m را می‌توان بدون اطلاع داشتن از شکل و ابعاد دریچه، طول موج و تابع روشن‌سازی و تنها با استفاده از الگوی تشعشی اندازه‌گیری‌شده‌ی آنتن نیز به دست آورد.

۲-۳- بهینه‌سازی تغذیه بر اساس زاویه لوچ

در مورد الگوی حاصل جمع، برای الگوی مجموع هدف بیشینه‌کردن بهره‌روی محور و در الگوهای تشعشی تفاضلی هدف دست‌یابی به شیب بالاتر است؛ ضمن آنکه ملاحظات سطح گلب‌رگ‌های فرعی نیز مد نظر قرار می‌گیرند. در ادامه توجه ویژه‌ای به تغذیه‌های چهار شیپوری^۵ خواهیم داشت؛ چرا که این ساختار بیش از سایر ساختارها در رادارهای آرایه فازی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴][۱۷]. موضوعات این بخش بر اساس آرایه آنتن‌های تغذیه فضایی بیان خواهند شد که رادار آرایه فازی غیرفعال نوعی که از این تغذیه استفاده نموده و سعی می‌گردد به بالاترین دقت ردگیری زاویه‌ای دست پیدا کند. ابتدا یک آنتن که تنها الگوی حاصل جمع را تولید و از یک تک تغذیه استفاده می‌کند را در نظر بگیریم. هرچه دهانه‌ی تغذیه کوچکتر باشد الگوی تشعشی آن به سمت رفلکتور، عریض‌تر می‌شود؛ این امر ممکن است موجب ایجاد سرریز در لبه‌های دهانه‌ی آنتن شود و بهره را کاهش دهد. در مقابل هرچه دهانه‌ی تغذیه کوچکتر باشد، الگوی تشعشی آن باریکتر خواهد شد. باریک‌تر شدن الگوی تشعشی تغذیه منجر به کاهش سرریز می‌شود، اما در صورت زیاده‌روی در باریک کردن الگو، ممکن است با عدم روشن‌سازی تمام دهانه‌ی آنتن و نتیجتاً کاهش بهره آنتن روبرو شویم. موضوع دیگری که باید مدنظر قرار گیرد، وجود تغذیه در روبروی آنتن است؛ در واقع هرچه تغذیه بزرگتر باشد، مساحت بیشتری از فضای روبروی آنتن را اشغال خواهد کرد و این امر به افزایش میزان انسداد و کاهش بهره آنتن خواهد انجامید. با در نظر گرفتن تمامی این موارد می‌توان به مصالحه‌هایی جهت دستیابی به بیشینه‌ی بهره و اندازه‌ی تغذیه رسید. با این حال بیشینه بهره به بهای افزایش سطح گلب‌رگ‌های فرعی به دست خواهد آمد. سطح گلب‌رگ‌های فرعی را می‌توان با قربانی کردن اندازه بهره کاهش داد. این امر از طریق افزایش اندازه تغذیه به بیش از آنچه جهت دستیابی به بهره بیشینه مورد نیاز است قابل دستیابی است. این فرآیند تا آنجایی ادامه پیدا می‌کند که کاهش گلب‌رگ‌های فرعی و مقدار سرریز، به اندازه‌ای باشد که انسداد دهانه آنتن ایجاد شده و سطح گلب‌رگ‌های فرعی مجدداً افزایش یابد. با متعادل‌سازی این پارامترها می‌توان دریافت که در اکثر موارد اندازه‌ی تغذیه به نحوی طراحی می‌شود تا تفاوت روشن‌سازی بین مرکز دریچه‌ی آنتن تا لبه‌ها مقدار ۱۰ یا ۱۱ دسی بلی داشته باشد؛ این مقدار در مواردی که کاهش بیش از حد معمول سطح گلب‌رگ‌های فرعی مورد نیاز است، مقدار بیشتری خواهد داشت.

$$s(u) = \int_{-0.5}^{0.5} g_0(x) \exp(j2\pi xu) dx \quad (8)$$

که در آن زاویه‌ی $u = (w/h) \sin \theta$ و θ زاویه‌ی افقی نسبت به محور است. در ارتفاع نیز از معادله‌ای مشابه که در آن h و y جایگزین w و x می‌شود استفاده می‌کنیم که در آن θ بیانگر زاویه‌ی عمودی خواهد بود. الگوی نزدیک این الگو به صورت معادله (۹) قابل بیان است:

$$s(u) = \sin c(u) = \frac{\sin u}{u} \quad (9)$$

الگوی تفاضلی بهینه‌ی $d(u)$ را می‌توان با جایگزینی $g_0(x)$ با $g_{d0}(x)$ در (۸)، معادله (۱۰) را به دست آورد:

$$d(u) = \int_{-0.5}^{0.5} g_{d0}(x) e^{j2\pi xu} dx \quad (10)$$

$$\rightarrow d(u) = \sqrt{3} \left(\frac{\sin u - u \cos u}{u^2} \right)$$

گفتنی است که به جای تابع روشن‌سازی مورد استفاده، از توابع فرد دیگر نیز تبدیل فوریه گرفتیم که در نزدیکی محور، تعریف نشده و دارای ناپیوستگی می‌شد. شیب را با ولتاژ حاصل جمع نرمالیزه کرده و شیب تفاضل نسبی را به صورت معادله (۱۱) تعریف می‌نماییم:

$$K = \frac{1}{\sqrt{G_0}} \frac{d}{du} d(u)|_{u=0} \quad (11)$$

واحد K در این معادله ولتاژ نرمالیزه در $\text{RAD} \times (w/h)$ است. معمولاً از K جهت بیان خطاهای ردگیری استفاده می‌شود [۱۵][۱۶]. در این معادله الگوی تشعشی تفاضلی با $d(u)$ نمایش داده می‌شود. شیب نسبی K یک معیار کامل جهت سنجش میزان حساسیت رادار مونوپالس در برابر انحراف هدف از پرتو رادار است و به دست آوردن آن نیاز به داشتن اطلاعاتی دقیق از ابعاد دهانه آنتن، طول موج و تابع روشن‌سازی یا الگوی تشعشی دارد. برای روشن‌سازی بهینه با تابع $g_{d0}(x)$ در صفحه‌ی افقی شیب تفاضلی نسبی به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) برای دهانه‌ی مستطیلی و دایروی قابل محاسبه است:

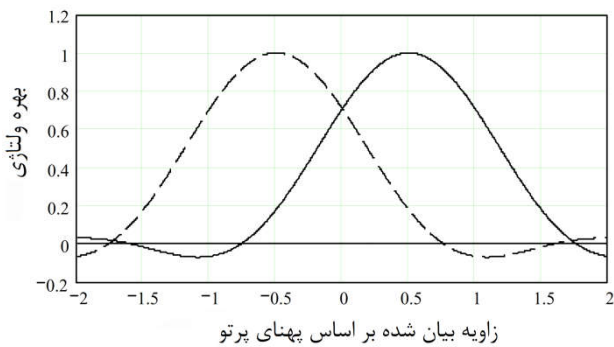
$$K_0 = \frac{\pi w}{\sqrt{3}\lambda} = 1.814 \frac{w}{\lambda} \quad (12)$$

$$K_0 = \frac{\pi D}{2\lambda} = 1.571 \frac{D}{\lambda} \quad (13)$$

برای انجام محاسبات برای دهانه‌ی بیضوی کافی است در معادله‌ی (۱۲) محور افقی w را با D جایگزین کنیم. برای بازنویسی معادله (۱۲) برای صفحه‌ی عمودی در صفحه‌ی عمودی ارتفاع دریچه یعنی h را با w جایگزین می‌کنیم. نسبت شیب تفاضلی بیانگر عملکرد آنتن در برابر آنتن بهینه با همان ابعاد است و به صورت معادله (۱۴) تعریف می‌شود:

$$K_r \equiv \frac{K}{K_0} \quad (14)$$

نرمالیزاسیون دیگری بر اساس پهنای پرتو عملی کانال حاصل جمع θ_3 و بهره آن G_m انجام می‌دهیم و شیب نرمالیزه مونوپالس را نتیجه می‌دهد و به صورت معادله (۱۵) قابل محاسبه است:



شکل (۵): الگوی تشعشعی پرتوهای لوچ V_1 (منحنی ممتد) و V_2 (منحنی خط چین) تولید شده توسط تغذیه با تابع کسینوسی و با زاویه‌ی لوچ 0.5 برابر پهناى پرتو

Fig. (5): The radiation pattern of squint beams v_1 (continuous curve) and v_2 (dotted curve) produced by feed with cosine function and squint angle of 0.5 times of beam width

الگوهای تشعشعی حاصل جمع و تفاضل به صورت روابط (۱۸) و (۱۹) بیان می‌شوند:

$$s = (v_1 + v_2) / \sqrt{2} \quad (18)$$

$$d = (v_1 - v_2) / \sqrt{2} \quad (19)$$

ضریب $1/\sqrt{2}$ به این دلیل قرار گرفته است که لازم است جمع توان خروجی ادوات غیرفعال هیبریدی (با فرض عدم وجود اتلاف و تطبیق امپدانسى بودن کلیه‌ی ورودی خروجی‌ها) با جمع توان ورودی یکسان باشد. شکل (۶) نمودار حاصل جمع و تفاضل برای مقادیر مختلف زاویه‌ی لوچ را نمایش می‌دهد. این نمودار را بر مبنای بیشینه‌ی پرتوهای لوچ نرمالیزه نموده‌ایم.

بنابر آنچه در شکل (۶) نمایش داده می‌شود، کاملاً مشخص می‌گردد که بیشینه ولتاژ پرتو حاصل جمع روی محور با افزایش زاویه‌ی لوچی، کاهش پیدا می‌کند. زمانی که θ_{sq} مقدار 0.5 دارد، بیشینه‌ی پرتوهای حاصل جمع با بیشینه‌ی هر یک از پرتوهای لوچ برابر است. شکل (۶) همچنین نشان می‌دهد پهناى پرتو حاصل جمع با افزایش زاویه‌ی لوچ افزایش پیدا می‌کند. بنابراین برای بیشینه‌کردن بهره الگوی حاصل جمع و دستیابی به تفکیک زاویه‌ای بالا لازم است زاویه‌ی لوچ حتی‌الامکان کوچک در نظر گرفته شود.

همانطور که در شکل (۷) دیده می‌شود به ازای مقادیر $\theta_{sq} > 0.68$ ولتاژ روی محور از مقدار بیشینه به مقدار کمینه‌ی بین دو نقطه بحرانی تغییر می‌کند که مقدار بیشینه به صورت مضاعف کاهش پیدا می‌کند. از سوی دیگر الگوی تفاضل در مقادیر کوچک زاویه‌ی لوچ، شیب روی محور کمی دارد و این امر به معنای حساسیت ضعیف خواهد بود. مقدار شیب تفاضل با افزایش زاویه‌ی لوچ افزایش پیدا می‌کند؛ تا آنجا که مقدار θ_{sq} برابر 0.68 می‌شود. (مقدار برابر با نقطه‌ای که در آن حاصل جمع از بیشینه به کمینه تغییر وضعیت می‌دهد). این موضوع نشان می‌دهد که زاویه‌ی لوچی‌های بزرگ (مثلاً 0.7) برای دستیابی الگوی تفاضلی خوب، تنها برای اهداف حداقل روی محور یا نزدیک به آن، بهینه است.

در یک رادار مونوپالس موضوع روشن‌سازی مقداری پیچیده‌تر خواهد بود؛ چراکه علاوه بر الگوی حاصل جمع، لازم است دو الگوی تفاضلی نیز مد نظر قرار گیرد. در مورد الگوی حاصل جمع، برای الگوی مجموع هدف بیشینه کردن بهره‌روی محور البته با در نظر گرفتن نیازهای گلبرگ فرعی است. در الگوهای تشعشعی تفاضلی هدف دستیابی به شیب بالاتر است؛ ضمن آنکه ملاحظات سطح گلبرگ‌های فرعی نیز مد نظر قرار می‌گیرند. بحث بهینه‌سازی تغذیه را بر اساس زاویه‌ی لوچ پرتوهای شکل‌دهنده مطرح خواهیم کرد، نه بر اساس اندازه‌ی تغذیه. هرچند هر دو روش یاد شده معادل یکدیگر هستند؛ اما روش زاویه‌ی لوچ امکان بکارگیری مدل ساده و تقریبی را فراهم می‌آورد؛ که کارکردن با آن از دید ریاضیاتی ساده‌تر است و ممکن است در دید فیزیکی نیز درک آن آسان‌تر باشد. نشان داده خواهد شد که پارامترهای بهینه شده‌ی این مدل با آنچه به صورتی گسترده در رادارهای مونوپالس دقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد، مطابقت دارد.

۴-۲- تأثیرات زاویه‌ی لوچ در تغذیه چهار شیپوری

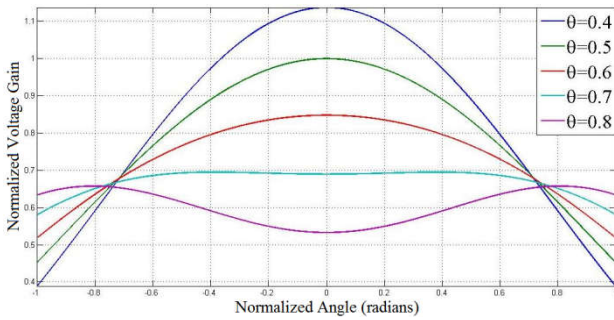
در تغذیه چهار شیپوری متداول در رادارهای مونوپالس، دو جفت شیپور مورد استفاده قرار می‌گیرد که هر جفت برای یک بعد زاویه‌ای کاربرد دارد. رادارهای دارای تغذیه چهار شیپوری به طور گسترده‌ای مورد استفاده واقع شده‌اند و کارایی مناسبی از خود ارائه کرده‌اند. متغیری که جهت بهینه‌سازی مورد توجه قرار می‌گیرد، زاویه‌ی لوچ است که تابعی از فاصله‌ی مرکز شیپوری‌ها از یکدیگر است. با این حال در زوایای لوچ نزدیک به مقدار بهینه یا بزرگتر از آن، کوپلینگ ضعیف است. هدف ما در اینجا تنها نمایش موضوع مصالحه‌های بهینه‌سازی جهت دستیابی به صرفاً مقادیر عددی است [۱۵][۱۷][۱۸]. شکل (۵) الگوی تشعشعی پرتوهای لوچ را نمایش می‌دهد. فرض می‌کنیم V_1 و V_2 ولتاژهای حاصل از دو جفت شیپوری تولیدکننده پرتوهای لوچ است که به کمک آنها حاصل جمع و تفاضل موردنیاز هر بعد زاویه‌ای تولید می‌شود پرتوهای لوچ دارای مدلی به صورت معادلات (۱۶) و (۱۷) هستند:

$$V_1 = \frac{\cos[\pi k_\theta (\theta - \theta_{sq})]}{1 - 2k_\theta (\theta - \theta_{sq})} \quad (16)$$

$$V_2 = \frac{\cos[\pi k_\theta (\theta + \theta_{sq})]}{1 - 2k_\theta (\theta + \theta_{sq})} \quad (17)$$

که در آن θ انحراف زاویه‌ی هدف از محور در یک بعد زاویه‌ای، θ_{sq} زاویه‌ی لوچ در همان بعد و $k_\theta = 1.19$ ثابت پهناى پرتو در روشن‌سازی کسینوسی است.

لازم به ذکر است در این معادلات مقادیر θ و θ_{sq} بر اساس پهناى نیم‌توان پرتوهای لوچ بیان شده نه پهناى پرتو حاصل جمع. مقادیر درون پرانتزها دارای واحد رادیان هستند. ثابت پهناى پرتو به گونه‌ای انتخاب شده که در $\theta - \theta_{sq}$ و $\theta + \theta_{sq}$ برابر 0.5 ، V_1 و V_2 یکسان و مقدار 0.707 (پهناى پرتو سه دسی‌بل) داشته باشند.



شکل (۷): تغییر مقدار بیشینه به کمینه بین دو نقطه بحرانی

Fig. (7): The change from maximum to minimum between two extremums

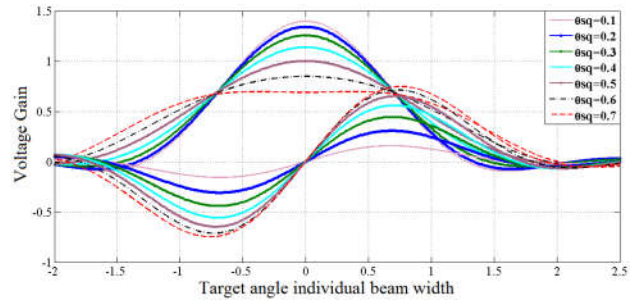
پهنای پرتو حاصل جمع عریض تر از پهنای پرتو لوچ است؛ فلذا مقدار θ_{bw} بزرگتر از یک به دست می آید. فرض می کنیم S_0 ولتاژ حاصل جمع روی محور و k_d شیب تفاضل باشد که بر اساس مقدار بیشینه ی پرتوهای لوچ نرمالیزه شده است. شیب مونوپالس نرمالیزه ی k_m برابر نسبت k_d به بیشینه ی ولتاژ حاصل جمع S_0 است، و بر مبنای پهنای پرتو نیم توان حاصل جمع بیان شده و به صورت معادله (۲۱) است:

$$K_m = \frac{K_d \theta_{bw}}{S_0} \quad (21)$$

برای آنکه مقدار خطای σ_θ حاصل از معادله ی ۲۰ حداقل شود باید مقدار \sqrt{S}/θ_{bw} را k_m به بیشینه برسانیم. توان حاصل جمع روی محور یا همان S در صورت استفاده از الگوی حاصل جمع در دریافت و ارسال همانند سایر رادارها با مقدار S_0^4 متناسب است. بنابراین مقدار ارائه دهنده ی بیشینه طبق رابطه (۲۲) عبارت است از:

$$\frac{K_d \theta_{bw}}{S_0} \frac{S_0^2}{\theta_{bw}} = K_d S_0 \quad (22)$$

که در واقع برابر حاصل ضرب شیب تفاضل K_d در ولتاژ حاصل جمع (هر دو روی محور) است. شکل (۸) نمودار منحنی تغییرات $K_d S_0$ را به صورت تابعی از زاویه ی لوچی نمایش می دهد. مقدار بیشینه در جایی که زاویه ی لوچی دارای مقدار 0.453 برابر پهنای پرتو لوچ است، رخ می دهد. با این زاویه ی لوچی مقادیر S_0 برابر $1/0.67$ ، K_d برابر $1/32$ ، θ_{bw} برابر $1/263$ برابر پهنای پرتو لوچ و نقطه تقاطع $2/44$ دسی بل پایین تر بیشینه ی هر پرتو لوچ بدست می آید. زاویه لوچی را همچنین می توان به صورت $1/263$ ، 0.453 یا 0.358 برابر پهنای حاصل جمع نیز بیان کرد. شیب نرمالیزه ی مونوپالس، K_m ، در اینجا مقداری برابر $1/635$ اختیار خواهد کرد.



شکل (۶): الگوهای تشعشی حاصل جمع و تفاضل حاصل از پرتوهای لوچ $\sin x/x$. خطوط ممتد و خط چین به ترتیب بیانگر پرتوهای حاصل جمع و تفاضل هستند. θ_{sq} بیانگر زاویه ی لوچ است و بر مبنای پهنای پرتوهای لوچ نرمالیزه شده است.

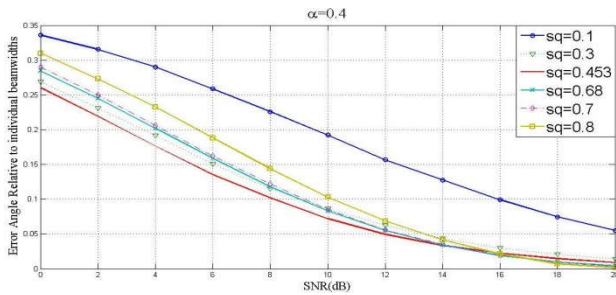
Fig. (6): The radiation pattern of addition and subtraction of squint beams $(\sin x)/x$. The continuous and dotted curves are presenting the addition and subtraction beams respectively. θ_{sq} is the squint angle and is normalized based on squint beams.

۳- بهینه سازی زاویه ی لوچ

ملاک بهینه سازی وابسته به نوع کاربردی که رادار باید برای آن بهینه سازی شود، تعیین می شود. در صورتی که کشف هدف دارای اولویتی بالاتر نسبت به دقت زاویه ای باشد، لازم است زاویه ی لوچی حتی الامکان کوچک در نظر گرفته شود. (در صورتی که اندازه گیری زاویه مورد نیاز نباشد، دو شیپوری با یکدیگر ترکیب شده و یک شیپوری را تشکیل می دهند. در این حالت زاویه ی لوچی برابر صفر خواهد شد.) در اینجا فرض می کنیم لازم است دقت زاویه ای برای اهداف روی محور یا نزدیک به آن، فارغ از بحث حساسیت آشکارسازی، بهینه شود. ابتدا فرض بر این است که تنها از پرتو حاصل جمع برای ارسال و دریافت امواج استفاده می شود [۱۶][۱۹]. هرچند مطابق آنچه در بخش دوم بیان شد، زاویه ی لوچ 0.68 شیب تفاضل را به بیشینه می رساند؛ اما خواهیم دید این عدد مقدار بهینه ای نیست. در واقع مقدار بهینه ی زاویه ی لوچی برابر مقداری است که حاصل ضرب شیب تفاضل روی محور، در ولتاژ روی محور حاصل جمع را بیشینه کند. فرمول خطای زاویه ای در رابطه (۲۰) مطرح شده است و مقدار خطای حاصل از نویز گرمایی برای یک تک پالس در حالتی که هدف ثابت است، را ارائه می دهد:

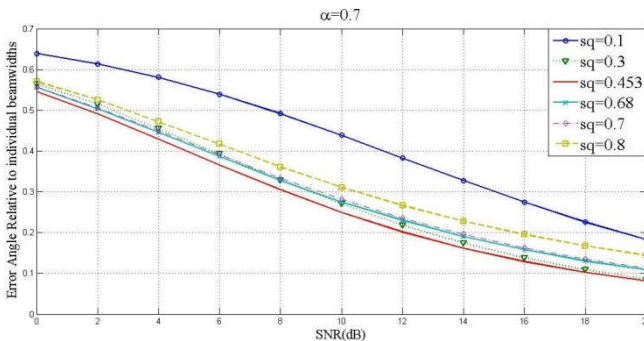
$$\sigma_\theta = \frac{\theta_{bw}}{k_m \sqrt{2S/N_d}} \quad (20)$$

که در آن σ_θ ، انحراف استاندارد خطای زاویه ای است، θ_{bw} ، پهنای سه دسی بل الگوی حاصل جمع، k_m ، شیب مونوپالس نرمالیزه، S ، توان سیگنال حاصل جمع و N_d ، میانگین توان نویز در کانال تفاضل هستند. از آنجا که واحد مورد استفاده برای بیان اندازه ی زوایای θ_{sq} و θ در بخش های پیشین پهنای پرتوی لوچ بود در اینجا نیز از همان واحد برای بیان θ_{bw} و σ_θ استفاده می کنیم.



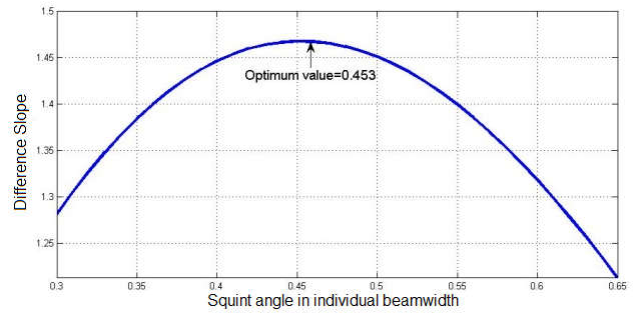
شکل (۱۰): نمودار خطای زاویه‌ای رادار ردگیر با زوایای لوچی متفاوت در SNRهای مختلف برای هدف $\alpha=0.4$
 Fig. (10): The error diagram of tracker radar with various squint angles in different SNRs for target of $\alpha=0.4$

در این قسمت به تحلیل عملکرد رادار ردگیر مونوپالس دامنه با حضور هدف در زاویه $\alpha=0.7$ می‌پردازیم نمودار متوسط خطای رادار ردگیر به ازای زوایای لوچی گوناگون در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): نمودار خطای زاویه‌ای رادار ردگیر با زوایای لوچی متفاوت در SNRهای مختلف برای هدف $\alpha=0.7$
 Fig. (11): The error diagram of tracker radar with various squint angles in different SNRs for target of $\alpha=0.7$

به خوبی دیده می‌شود که در تمامی محدوده SNR زاویه لوچی بهینه دارای کمترین خطای زاویه‌ای می‌باشد. در ادامه شبیه‌سازی‌های این بخش حضور هدف را در $\alpha=1$ تحلیل و بررسی می‌نماییم. شکل (۱۲) اطمینان ما را از برتری عملکرد رادار ردگیر با زاویه لوچی بهینه (sq=0.453) در تمامی زاویه‌های قرارگیری هدف در محدوده الگوی رادار مونوپالس دامنه حاصل می‌نماید. در ردگیری مونوپالس سیگنال به نویز در دسترس مقدار بالاتری دارد، چراکه رادار مونوپالس هدف را در بیشینه پرتو حاصل جمع تحت ردگیری قرار می‌دهد. در حالی که در دو روش دیگر اینگونه نیست. لذا در ردگیری مونوپالس سیگنال به نویز بالاتر یعنی چیزی در حدود ۲ تا ۴ دسی بل بیشتر در دسترس قرار دارد. این امر به افزایش احتمال آشکارسازی خواهد انجامید. صحت این موضوع به کمک نتایج حاصل از اندازه‌گیری با تجهیزات ساده‌ی آزمایشگاهی قابل اثبات است. از مقایسه‌ی نتایج عددی حاصل از مدل ساده‌سازی شده با نتایج اندازه‌گیری الگوی تشعشعی یک رادار مونوپالس عملیاتی، می‌توان به نتایج جالبی دست یافت [۲۴][۲۰].

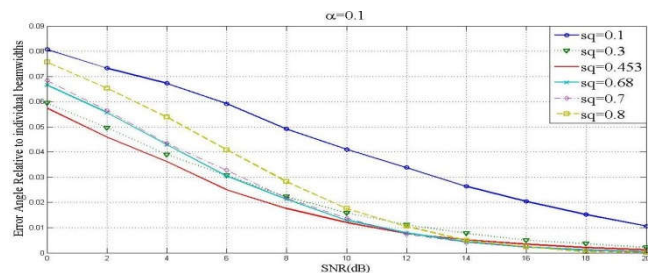


شکل (۸): عملکرد دقت زاویه‌ای با شاخص $K_d S_0$ و به صورت تابعی از زاویه‌ی لوچی θ_{sq}

Fig. (8): The angular accuracy with $K_d S_0$ index as a function of squint angle θ_{sq}

۴- تحلیل و شبیه‌سازی خطای زاویه‌ای رادار ردگیر

در این بخش جهت شبیه‌سازی خطای رادار ردگیر مونوپالس دامنه، ابتدا سیگنال اکوی هدف را به صورت مختلط شبیه‌سازی و پس از اضافه‌نمودن نویز به آن الگوهای جزئی را تولید می‌کنیم، سپس زوایای لوچی متفاوت جهت مقایسه خطای زاویه‌ای ردگیری اعمال می‌شود. در این بخش محور افقی مقدار سیگنال به نویز بر حسب dB و محور عمودی متوسط خطای زاویه‌ای ردگیری بر حسب پهنا‌ی پرتو جزئی می‌باشد. شبیه‌سازی‌ها با نرم‌افزار Matlab انجام شده است.



شکل (۹): نمودار خطای رادار ردگیر با زوایای لوچی متفاوت در SNRهای مختلف برای هدف $\alpha=0.1$

Fig. (9): The error diagram of tracker radar with various squint angles in different SNRs for target of $\alpha=0.1$

در شکل (۹) هدف در $\alpha=0.1$ شبیه‌سازی شده یعنی حضور هدف بسیار به محور ردگیری نزدیک در نظر گرفته شده که به ازای SNRهای پایین یعنی کمتر از ۱۲dB نیز کمترین خطای ردگیری مربوط به زاویه لوچی sq=0.453 می‌باشد. این بدین معنی است که حتی زمانی که زاویه حضور هدف بسیار به محور نزدیک باشد نیز زاویه لوچی sq=0.453 کمترین خطای ردگیری را نتیجه می‌دهد. در شکل (۱۰) زاویه قرارگیری هدف $\alpha=0.4$ در نظر گرفته شده است. نمودارهای رسم شده در شکل به خوبی گویای خطای زاویه‌ای پایین‌تر رادار مونوپالس بهینه (sq=0.453) است. در SNRهای بالاتر از ۱۷ dB با فاصله بسیار کمی زوایای لوچی 0.68، 0.7 و 0.8 خطای کمتری دارند که در رادارهای ردگیر عملیاتی مقدار SNR پایین‌تر از ۱۸ dB می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله جهت رسیدن به بالاترین کیفیت و بهبود دقت ردگیری در رادار آرایه فازی، روش مونوپالس بهینه را مورد بررسی قرار دادیم. بطور کلی می توان گفت که برای رسیدن به بیشینه ضریب بهره آنتن، روشن سازی یکنواخت، بهترین انتخاب است. همچنین برای بهبود عملکرد سیستم، بهینه سازی تغذیه را بر اساس زاویه ی لوچ پرتوهای شکل دهنده بررسی نموده و با شبیه سازی الگوهای جزئی و اعمال زاویه لوچی به آنها، پرتوهای مجموع و تفاضل را ایجاد نمودیم و به ازای زوایای لوچی متفاوت، نتایج را با یکدیگر مقایسه کردیم.

Table (1): Comparison between characteristics of radiation patterns

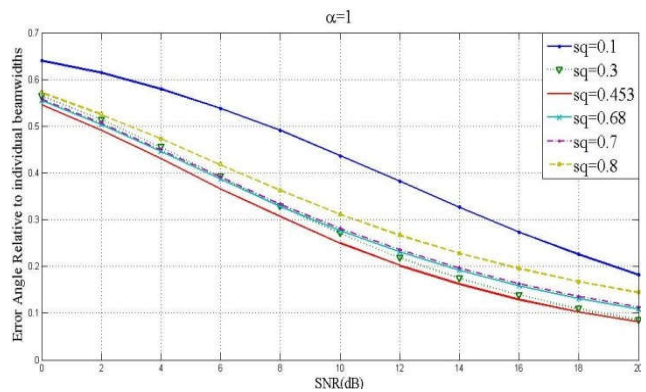
جدول (۱): مقایسه مشخصات الگوی تشعشی

مشخصه مرجع	مدل دارای پرتو لوچ	رادار مدل ANFPS16	مونوپالس روشن سازی کسینوسی
پهنای پرتو لوچ	۱/۲۶	۱/۱۴	-
پهنای پرتو حاصل جمع	۰/۳۵۸	۰/۴۱۸	-
بیشینه پرتو لوچ	۱/۰۶۷	۱/۰۳۵	-
نقطه اشتراک	۲/۴۴	۲/۷	-
سطح گلبه های فرعی حاصل جمع	-۳۴/۵	نامشخص	-۲۳
بازده دهانه	۰/۵۴	۰/۵	۰/۶۵۷
شیب مونوپالس	۱/۶۳۵	۱/۶۱۸	۱/۹۶
شیب تفاضلی	۰/۹۵۲	۱/۱۴۴	۱/۳۳۴
نسبت شیب تفاضلی	۰/۵۲۵	۰/۶۳۴	۰/۷۳۶

جهت شبیه سازی خطای رادار ردگیر مونوپالس دامنه، ابتدا سیگنال اکوی هدف را به صورت مختلط شبیه سازی و پس از اضافه نمودن نویز به آن، الگوهای جزئی را تولید نمودیم. سپس زوایای لوچی متفاوت جهت مقایسه خطای زاویه ای ردگیری را مورد بررسی قرار دادیم. نتایج حاصل، بیانگر آن است که در تمامی محدوده عملکرد، زاویه لوچی بهینه دارای کمترین خطای زاویه ای می باشد. از مقایسه ی نتایج عددی حاصل از مدل ساده شده با نتایج اندازه گیری الگوی تشعشی یک رادار مونوپالس عملیاتی، به نتایج جالبی دست یافتیم که نشان دهنده عملکرد بهتر در بهبود دقت زاویه ای مورد نظر می باشد.

پی نوشت:

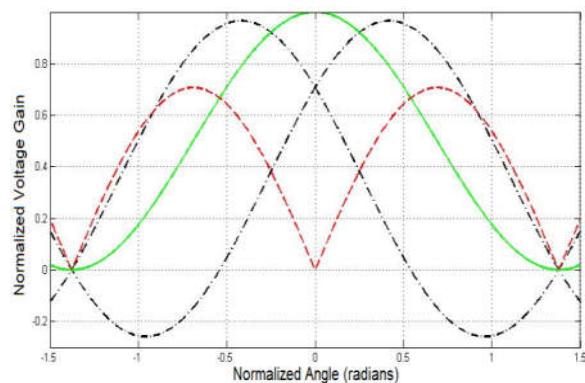
1. Phased Array
2. Monopulse
3. Squint Beams
4. Simultaneous lobe comparison
5. Horn Feeds



شکل (۱۲): نمودار خطای زاویه ای رادار ردگیر با زوایای لوچی متفاوت در

SNRهای مختلف برای هدف $\alpha=1$

Fig.(12): The error diagram of tracker radar with various squint angles in different SNRs for target of $\alpha=1$



شکل (۱۳): الگوهای تشعشی حاصل جمع (خط ممتد)، تفاضل (خط فاصله) و پرتوهای لوچ (خط فاصله-نقطه) رادار مورد نظر

Fig.(13): The radiation pattern of addition (continuous curve), subtraction (dashed curve) and squint beams (dash-dotted curve) of mentioned radar

راداری که برای انجام این مهم مد نظر قرار گرفته، رادار AN/FPS-16 است. در شکل (۱۳) الگوی تشعشی رادار مورد نظر به نمایش گذاشته شده است.

جدول (۱) مقایسه ی مشخصات رادار AN/FPS-16 را با نتایج حاصل از مدل تحلیلی بهینه شده، نمایش می دهد. تطابق بسیار نزدیک پرتوهای لوچ در دو مدل رادار عملیاتی و مدل تحلیلی بهینه شده، تاییدکننده این موضوع است که طراحی تغذیه رادار AN/FPS-16 به تغذیه چهار شیپوری بهینه، بسیار نزدیک است.

References

- [1] I. S. Merrill, "Introduction to radar systems", 3rd.ed., Vol.1, Mc Grow-Hill, pp.14-21, 2001.
- [2] W.D. Wirth, "Radar Techniques using array antennas", 2nd.ed., Vol.1, IEE Publishers, London, pp.251-258, 2001.
- [3] A.J. Fenn, DH. Temme, W.P. Delaney, W.E. Courtney, "The development of phased-array radar technology", Lincoln Laboratory Journal, Vol. 12, No. 2, pp.321-340, 2000.
- [4] M. Aumann, A.J. Fenn, F.G. Willwerth, "Phase array antenna calibration and pattern prediction using mutual coupling measurements", IEEE. Trans. Propagation, Vol. 37, No. 7, pp. 844-850, 1989.
- [5] C. Fulton, M. Yeary, D. Thompson, J. Lake, A. Mitcheell, " Digital phase array: challenges and opportunities", IEEE. Trans. Radar, Vol. 104, Vol. 3, pp. 487-503, 2016.
- [6] S.H. Talisa, T.M. Comberiate, D. Sharp, O.F. Somerlock "Benefits of digital phase array radars", IEEE. Trans. Radar, Vol. 1, No. 7, pp. 1-14, 2016.
- [7] M. Meller, "Radar time budget optimization subject to angle accuracy constraint via cognitive approach", Proceeding of the IEEE/IRS, pp. 1–10, Prague, Czech Republic, June 2017.
- [8] Q. Wu, Y. Cheng, X. Li, H.Wang, Y. Qin, "Beam synthesis and target detection based on aperture coding metasurface", Proceeding of the IEEE/PIERS - FALL, pp. 2290–2298, Singapore, Nov. 2017.
- [9] S.M. Sherman, D.K. Barton, "Monopulse principles and techniques", 2nd.ed., Vol.1, Artech House, pp.53-71, 2011.
- [10] S. Blackman, R. Popoli, "Design and Analysis of Modern Tracking Systems", 1nd.ed., Vol.1, Artech House, Norwood, MA, pp.161-170, 1999.
- [11] G.W. Stimson, "Introduction to airborne radar". 3nd.ed., Vol.1, SciTech Pub., pp.82-95, 1998.
- [12] Christian Wolff, "The Conical Scan," 2001. [Online]. Available: http://www.radartutorial.eu/06.antennas/Conical_Scan.en.html.
- [13] G.M. Kirkpatrick, "Development of a monopulse radar system", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 45, No. 2, pp. 807–818, Apr. 2009.
- [14] B. Kulke, B. Rubinger, G.G. Haroules, "Monopulse azimuth measurement in the ATC radar beacon system", 1nd.ed., Vol.1, Artech House, pp.102-110, 1971.
- [15] B. Liu, W. Chang, X. Li, "Design and implementation of a monopulse radar signal processor", Proceeding of the IEEE/ MIXDES, pp. 484–488, Warsaw, Poland, May 2012.
- [16] V. Cojocar, H. Kurata, D. Humphrey, B. Clarke, T. Yokoyama, V. Napijalo, T. Young, T. Adachi, "A 24GHz low-cost, long-range, narrow-band, monopulse radar front end system for automotive ACC applications", Proceeding of the IEEE/MTT-S, pp. 1327–1330, Honolulu, HI, USA, June 2007.
- [17] D. Bonefacic, J. Jancula, "Laboratory model of a monopulse radar tracking system", Proceeding of the IEEE/ELMAR, pp. 227–230, Zadar, Croatia, June 2006.
- [18] L. Haibo, Y. Xiaoqian, J. Han, S. Mengmeng, "The study of mono-pulse angle measurement based on digital array radar", Proceeding of the IET/RC, pp. 1–5, Xi'an, China, April 2013.
- [19] L. Pang, M. Zhao, Y. Luo, "A high performance system-on-chip architecture for digital wideband radar receiver", Proceeding of the IEEE/ICSP, pp. 2106–2109, Hangzhou, China, Oct. 2014.
- [20] W.D. Wirth, "Radar techniques using array antennas", 2nd.ed., Vol.1, IET, pp.201-208, 2013.
- [21] W.P. du Plessis, "Modelling monopulse antenna patterns", Proceeding of the IEEE/ SIEPCPC, pp. 1–5, Fira, Greece April 2013.
- [22] B.R. Mahafza, "Radar systems analysis and design using MATLAB", 3nd.ed., Vol.1, CRC Press, 2013.
- [23] D.J. van Rensburg, P. Betjes, "The measurement of monopulse tracking nulls in a planar near-field antenna range", Proceeding of the IEEE/ANTEM-AMEREM, pp. 1–4, Ottawa, ON, Canada 2010.
- [24] G.M. Kirkpatrick, "Development of a monopulse radar system", EEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 45, No. 2, pp. 807-818, Apr. 2009.