مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند غیرعامل»
سال سوم، شماره۴، زمستان ۱۳۹۱؛ ص ۳۴۷-۳۳۹

تخمین پارامترهای عملیاتی رادار به کمک سیگنال‌های دریافتی در الینت

یاسر نوروزی[۱*]، الهام سادات کاشانی[۲]
۱- استادیار و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیر کبیر
(دریافت: ۱۳۹۱/۰۴/۲۱، پذیرش: ۰۹/ ۱۳۹۱/۱۲)

چکیده

اگر چه تاکنون تحقیقات متعددی در مورد پردازش سیگنال در سامانه الینت مطرح شده ولی کمتر به موضوع مهم استخراج پارامترهای عملیاتی رادار به کمک الینت اشاره شده است. در این مقاله با کمک مفروضات منطقی، الگوریتم‌هایی برای تعیین پارامترهای مختلف رادار، به کمک سیگنال دریافتی در الینت، ارائه شده است. پارامترهای تخمین زده شده شامل پهنای پرتو، بهره و ابعاد آنتن، قدرت تفکیک رادار در راستای فاصله و زاویه، میزان حذف کلاتر، کوچک‌ترین هدف قابل آشکارسازی، بیشترین برد رادار و توان تابشی و مصرفی رادار می‌باشد. سپس با بررسی در مورد چند رادار شناخته شده، نشان داده‌ایم که الگوریتم‌های ارائه شده تقریب به نسبت دقیقی از پارامترهای رادار ارائه می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: پارامترهای عملیاتی رادار، پردازش سیگنال در الینت، تخمین پارامتر.

Archive of SID

Radar Performance Estimation Using ELINT Gathered Data

Y. Norouzi[*], E. S. Kashani
Amirkabir University of Technology
(Received: 11/07/2012; Accepted: 27/02/2013)

Abstract

While many research papers exists about radar signal estimation using ELINT gathered data, no deep research exists about radar performance evaluation, using collected data. This important topic is regarded in this paper using some physical basic laws of radar and signal processing as well as some logical interpretations. Estimated parameters include antenna beamwidth, gain and physical dimension, range and angle resolution, clutter attenuation level, minimum detectable RCS, maximum detection range, transmitted and consumed power. Some estimation about radar performance parameters, real data about some well-known radar systems are presented and it is shown that, the proposed algorithms prepare almost accurate estimation of radar parameters.

Keywords: Radar Performance Parameters, ELINT Signal Processing, Parameter Estimation.

[*] Corresponding Author E-mail: y.norouzi@aut.ac.ir

www.SID.ir

۱. مقدمه

جنگ الکترونیک در نبردهای امروزی جایگاه بسیار ویژه‌ای دارد و به‌نظر نمی‌رسد که بتوان بدون برتری در این حوزه در یک جنگ واقعی به پیروزی دست یافت. مفهوم کلی جنگ الکترونیک به دست‌گیری کنترل طیف الکترومغناطیسی به جهت بهره‌برداری نیروهای خودی و جلوگیری بهره‌برداری دشمن از آن می‌باشد [۱].

جنگ الکترونیک به سه حوزه مهم پشتیبانی الکترونیک (ES[1])، حمله الکترونیک (EA[2]) و دفاع الکترونیک (EP[3]) تقسیم می‌شود. اولین مرحله هر پروسه جنگ الکترونیک با عملیات پشتیبانی الکترونیک آغاز می‌شود. پشتیبانی الکترونیک به معنی شناسایی توانمندی‌های الکترونیکی دشمن و تخمین مرتبه الکترونیکی صحنه نبرد (EOB[4]) می‌باشد [۲].

عملیات پشتیبانی الکترونیک معمولاً به کمک سامانه‌های الینت[5]، کامینت[6]، یا ESM[7] انجام می‌شود. با کمک این ابزارها سیگنال‌های مخابراتی و راداری دشمن دریافت و تحلیل می‌شود. بر اساس این تحلیل‌ها نوع سامانه مخابراتی و راداری و مکان آن استخراج می‌گردد [۳].

اغلب در سامانه‌های پشتیبانی الکترونیک سعی بر آن است که با مقایسه پارامترهای سیگنال‌های به‌دست آمده با یک بانک اطلاعاتی، نوع سامانه راداری تعیین گردد. این روش جستجو در سامانه‌های ESM که باید پاسخگویی تقریباً بلادرنگ داشته باشند، مناسب است ولی در سامانه‌های الینت این روش به تنهایی مناسب نیست. دلیل این امر آن است که هدف از همگی اقدامات پشتیبانی جنگ الکترونیک، پی بردن به توانمندی‌های الکترونیکی دشمن است. حال اگر به کمک این سامانه‌ها نوع رادار دشمن را تشخیص دهیم (مثلاً مشخص کنیم که این رادار یک رادار AN/APY-1 محصول ایالات متحده آمریکا است)، این اطلاعات به تنهایی از دید جنگ الکترونیک کمکی به ما نمی‌کند، بلکه ما باید بتوانیم مشخصات عملیاتی این رادار، نظیر برد، کوچک‌ترین هدف قابل آشکارسازی، سرعت و برد کور، میزان مقاومت در برابر خاشاک[8] و ... را تخمین بزنیم. این تخمین‌ها از این جهت لازم است که ما در مراحل بعدی جنگ الکترونیک خواهان اخلال بر روی این سامانه راداری و یا مصون ماندن از خطرات آن هستیم. این دو موضوع مهم بدون شناخت کافی از توانمندی‌های رادار ممکن نیست.

علی‌رغم اهمیت بسیار زیاد موضوع تخمین پارامترهای رادار، در اغلب کتب و مقالات موجود در این زمینه، این موضوع تا حد زیادی مهجور مانده است [۳-۷]. در بیشتر این مراجع به‌طور عمده به تخمین پارامترهای پالس‌ها، جداسازی پالس رادارهای مختلف و تخمین مکان هدف پرداخته‌اند [۸].

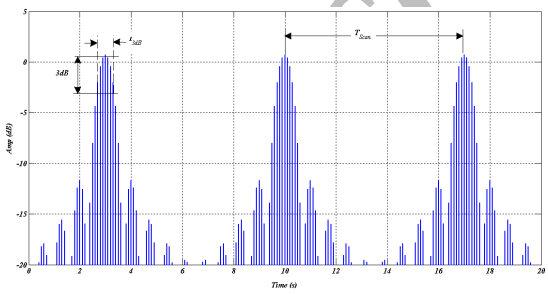
در این مقاله هدف ما تخمین پارامترهای عملیاتی رادارها به کمک سیگنال‌های دریافتی در رادار است. همان‌طور که خواهیم دید، این تخمین‌ها بر اساس یک سری واقعیت‌های فیزیکی و پیش فرض‌های منطقی انجام می‌شود. با توجه به اینکه این پیش فرض‌ها کاملاً دقیق نیستند، انتظار نداریم که نتایج نهایی هم کاملاً دقیق باشند. بر این اساس در هر بخش پس از ارائه تخمین، عوامل تأثیرگذار بر آن و دقت تخمین ارائه شده است. در پایان مقاله نیز با بررسی چند رادار نوعی، تخمین‌های ارائه شده در مقاله محک زده شده است.

۲. تخمین پارامترهای رادار

سیگنال‌های دریافتی از رادار در سامانه الینت، واقعیت‌های متعددی را در مورد رادار نشان می‌دهند. برخی از این ویژگی‌ها مثل پهنای اشعه آنتن رادار به آسانی قابل استنباط هستند. برخی دیگر مانند کوچک‌ترین هدف قابل آشکارسازی در رادار، رابطه پیچیده‌ای با چندین پارامتر از سیگنال‌های دریافتی دارند. بر این اساس ما در این بخش از بررسی موارد بدیهی‌تر شروع کرده و سپس به بررسی ویژگی‌هایی که کمتر ملموس هستند، خواهیم پرداخت.

۲-۱. پهنای اشعه رادار در امتداد سمت

برای محاسبه پهنای بیم آنتن در راستای سمت می‌توان از الگوی اسکن رادار استفاده نمود. در حالتی که نوع مرور آنتن دایره‌ای باشد، محاسبه این پارامتر ساده است. نمودار اسکن دایره‌ای در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱. اسکن دایره ای و محاسبه پهنای بیم آنتن به کمک آن

مطابق با این شکل چنانچه زمان عبور بیم ۳ dB پرتو از روی الینت را t_{3dB} و زمان یک اسکن کامل را T_{scan} بنامیم، آنگاه پهنای بیم آنتن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\theta_{3dB} = \frac{t_{3dB}}{T_{Scan}} \times 360 \ (Deg) \qquad (۱)$$

در واقع اگر ما مقدار دقیق t_{3dB} را بدانیم، عبارت بالا هیچ خطایی نخواهد داشت. ولی از آنجا که سیگنال دریافتی از نوع پالسی است، ممکن است نقطه ۳ dB در محل یک پالس واقع نشود. در واقع کاملاً

[1] Electronic Support
[2] Electronic Attack
[3] Electronic Protection
[4] Electronic Order of Battle
[5] Electronic Intelligence (ELINT)
[6] Communication Intelligence (COMINT)
[7] Electronic Support Measure (ESM)
[8] Chaff

Archive of SID

www.SID.ir

محتمل است که نقطه dB ۳ هم در آغاز و هم در پایان بین دو پالس متوالی واقع گردد. در این حالت اگر توزیع خطای ناشی از این عامل را یکنواخت فرض کنیم، در این صورت مقدار مؤثر خطا در تخمین پهنای بیم آنتن به‌صورت زیر است [۹]:

$$\delta\theta_{rms} = \frac{t_{3dB}}{T_{Scan}} \times \frac{360}{\sqrt{3}} = \frac{T_p}{T_{Scan}} \times 208(Deg) \qquad (۲)$$

در این رابطه مقادیر t_{3dB} و T_{Scan} مطابق مقادیر نشان داده شده در شکل (۱) می‌باشند. برای اغلب رادارها این تخمین از پهنای بیم، دقیق است. با این حال اگر به تخمین دقیق تری نیاز داشته باشیم می توانیم بین دو پالس متوالی که در دو طرف خط dB ۳ واقع هستند درون یابی[1] کنیم. در این صورت خطای تخمین می‌تواند به مراتب کمتر از مقدار قبل باشد. در واقع مقدار خطا در این حالت به نسبت سیگنال به نویز و نیز شیب پرتو آنتن در این قسمت نمودار پرتو بستگی دارد ولی همان‌طور که گفته شد، معمولاً این دقت برای کاربردهای الینتی مورد نیاز نیست.

در حالتی که مرور از نوع قطاعی باشد، برای محاسبه θ°_{3dB} باید زاویه قطاعی که رادار می‌پیماید، را بدانیم. در این حالت اگر زمان یک پرتو اسکن (زمان بین سه بار متوالی مشاهده نقطه پیک پرتو) را T_{scan} و قطای اسکن را θ_{scan} بنامیم، مقدار پهنای بیم از رابطه زیر به‌دست خواهد آمد:

$$\theta_{3dB} = \frac{t_{3dB}}{T_{Scan}} \times 2 \times \theta_{scan}\ (Deg) \qquad (۳)$$

در واقع ما اغلب مقدار θ_{scan} را نمی‌دانیم. ولی برای اغلب رادارها این مقدار بین ۶۰ تا ۱۲۰ درجه است. در این صورت اگر مقدار θ_{scan} را برابر با میانگین هندسی این دو عدد (یعنی ۸۴) قرار دهیم، مقدار خطای تخمین بین ۴۰٪- تا ۴۰٪+ خواهد بود. این خطا به مراتب بیش از خطای محاسبه پرتو در حالت اسکن دایره‌ای است ولی در هر صورت نمی‌توان از تخمین بهتری استفاده نمود.

برای محاسبه پرتو بیم در سایر انواع اسکن باید آن‌ها را به‌صورت ترکیبی از اسکن‌های دایره‌ای و قطاعی فرض کرد و سپس شرایط را تحلیل نمود. برای مثال اسکن فنری[2] را می‌توان ترکیب اسکن دایره‌ای در سمت و اسکن قطاعی در ارتفاع دانست [۳].

۲-۲. بهره آنتن

در قسمت قبل پهنای اشعه آنتن را در راستای افقی به‌دست آوردیم. برای به‌دست آوردن بهره آنتن، باید پهنای اشعه در راستای عمودی را هم بدانیم. برای محاسبه این پارامتر باید به این نکته توجه کرد که آنتن ها معمولاً از نوع بادبزنی یا نوک مدادی هستند. در واقع اگر اسکن رادار از نوع راه راه[3] یا فنری یا مارپیچ[4] باشد، می‌توان فرض کرد که آنتن از نوع نوک مدادی است. در این حالت اغلب پهنای بیم در راستای سمت و ارتفاع با هم برابر است. ولی اگر الگوی اسکن دایره‌ای یا قطاعی باشد، بیم از نوع بادبزنی محتمل‌تر است. در این حالت برای محاسبه پهنای بیم آنتن باید به این نکته توجه کنیم که رادارها معمولاً برای مشاهده اهدافی تا ارتفاع ۳۰ هزار پا طرح می‌شوند. بنابراین هواپیما باید هدفی در این سقف پروازی را در بیشترین برد خود ببیند. بنابراین اگر بیشترین ارتفاع هدف را برابر با h_{max} و بیشترین برد رادار را برابر با R_{max} بگیریم، زاویه دید این هدف برابر خواهد بود با:

$$\theta = tan^{-1}\frac{h_{Max}}{R_{Max}} \qquad (۴)$$

در رادارهایی که از بیم بادبزنی استفاده می‌کنند، اغلب شکل بیم از نوع CSC^2 است و برای این پرتوها پهنای اشعه dB ۳ برابر است با [۵]:

$$\phi_{3dB} = 2tan^{-1}\frac{h_{Max}}{R_{Max}} \qquad (۵)$$

در مورد نحوه محاسبه R_{max} در ادامه بحث خواهیم کرد. در هر صورت چنانچه پهنای بیم آنتن در هر دو راستای افقی و عمودی مشخص باشد، مطابق با [۵] بهره آنتن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$G \approx \frac{26600}{\theta_{3dB}\phi_{3dB}} \qquad (۶)$$

در رابطه فوق هر دو زاویه بر حسب درجه هستند. رابطه فوق در صورت صحیح بودن هر دو زاویه خطایی در حد $\pm 1dB$ خواهد داشت.

۲-۳. ابعاد آنتن

یکی از مواردی که می‌تواند در مورد سکوی حامل رادار تصور مناسبی ایجاد کند، ابعاد آنتن است. در واقع آنتن‌های با ابعاد چند متر فقط برای کاربردهای استقراری یا دریایی مناسب است. در حالی که ابعاد کوچک‌تر می‌تواند تاکتیکی و قابل حمل باشد. برای به‌دست آوردن تخمینی از ابعاد آنتن باید از رابطه زیر استفاده کنیم [۹]:

$$D = \frac{65}{\theta_{3dB}}\lambda \qquad (۷)$$

در این رابطه θ_{3dB} بر حسب درجه است. این رابطه می‌تواند حدود ۱۰٪± خطا داشته باشد.

۲-۴. برد رادار

برای محاسبه برد رادار باید از توالی ارسال پالس‌ها استفاده نمود. در این وضعیت باید حالت‌های مختلفی را در نظر گرفت. در حالتی که رادار از نرخ ارسال پالس ساده، استگر[5] یا جیتر[6] استفاده می‌کند، معمولاً هدف آن است که رادار همه اهداف را در فاصله بدون ابهام خود ببیند. در این حالت اگر کمترین فاصله بین دو پالس متوالی رادار برابر با PRI_{min} باشد، برد بدون ابهام رادار برابر با مقدار زیر خواهد بود:

[1] Interpolation
[2] Helical
[3] Raster
[4] Spiral
[5] Stagger PRI
[6] Jitter PRI

Archive of SID

www.SID.ir

$$R_{un} = \frac{1}{2} c \times PRI_{Min} \quad (۸)$$

معمولاً رادارها برای آشکارسازی هدف به نسبت سیگنال به نویز بین ۱۳ dB تا ۱۶ dB نیاز دارند. در ضمن مقدار فاصله بدون ابهام به‌صورتی انتخاب می‌گردد که هدفی که در این برد قرار گرفت، به‌همین اندازه از دورترین هدفی که رادار قادر به تشخیص آن است، ضعیف‌تر باشد، بر این اساس در این حالت‌ها برد رادار از رابطه زیر به‌دست خواهد آمد:

$$R_{Max} = 10^{-\frac{K}{40}} \times R_{un} = (0.4 \sim 0.47) \times R_{un} \quad (۹)$$
$$K = 13 \sim 16$$

توضیح این رابطه به این صورت است که طراح رادار معمولاً سامانه را به‌صورتی طراحی می‌کند که اهداف در فاصله ابهام و دورتر از آن توانی در حد نویز داشته و آشکارسازی نگردند. از آنجا که برای اغلب Pd و Pfa های عملی SNR مورد نیاز عددی بین ۱۳ تا ۱۶ dB است، هدف در فاصله بدون ابهام هم باید به‌همین میزان از هدف در بیشترین فاصله ضعیف‌تر باشد. البته در رادارهای برد متوسط و بلند، معمولاً رعایت محدودیت فوق باعث می‌گردد که تعداد پالس‌های دریافتی از هدف به شدت کم شود. به‌همین دلیل در این رادارها معمولاً R_{un} طوری انتخاب می‌گردد که هدفی که در این فاصله است حدود ۴ تا ۶ dB از دورترین هدف در برد رادار ضعیف‌تر باشد. در این صورت برای رادارهای برد متوسط و بلند رابطه زیر را داریم:

$$R_{Max} = (0.71 \sim 0.79) \times R_{un} \quad (۱۰)$$

حالت دیگری که برای برد رادارها باید در نظر گرفت، حالت استفاده از نوع ارسال پالس Dwell & Switch است. در این حالت به ازای هر یک از PRIهای رادار یک R_{un} داریم و در واقع R_{un} کلی رادار در تئوری برابر با کوچک‌ترین مضرب مشترک همه این R_{un} ها است. اما همان‌طور که در توضیح داده شده، در واقع اگر مقدار متوسط همه این R_{un}ها را با R_{avg} نشان دهیم و نیز در مجموع رادار از N دنباله مختلف استفاده کند، برد رادار برابر با مقدار زیر خواهد بود:

$$R_{Max} = N \times R_{avg} \quad (۱۱)$$

حالت دیگری که باید در مورد رادارها در نظر بگیریم رادارهای موج پیوسته یا شبه موج پیوسته[1] یا پالس داپلر است. به‌نظر نمی‌رسد در هیچ یک از این موارد بتوان با استفاده از مشخصات سیگنال دریافتی از رادار برد عملیاتی آن را تخمین زد.

۲-۵. قدرت تفکیک در فاصله

حد تفکیک یا قدرت تفکیک پارامتر مهمی در تعیین نوع عملیات مورد نظر رادار است. معمولاً برای کاربردهای جستجوی برد بلند، حد تفکیک تا چند صد متر هم مناسب است. برای کاربردهایی چون کنترل آتش، حد تفکیک باید در حد چند ده متر باشد و برای کاربردهایی مانند ردگیری کروز یا نفرباب یا ... به دقت چند متر نیاز داریم. اگر رادار از نوع پالسی ساده باشد آنگاه قدرت تفکیک در فاصله برابر مقدار زیر است:

$$\Delta R(m) = 150 \times \tau(\mu sec) \quad (۱۲)$$

در اینجا τ عرض پالس رادار برحسب میکروثانیه است. با این وجود اغلب رادارهای مدرن امروزی به جای استفاده از پالس کوتاه، از پالس‌های دارای مدولاسیون برای دسترسی به رزولوشن مورد نظر استفاده می‌کنند. همان‌طور که در نشان داده شده است، اگر پهنای باند ۳ dB طیف سیگنال یک رادار برابر با BW باشد، آنگاه مقدار حد تفکیک این رادار در برد برابر با مقدار زیر خواهد بود [۱۰]:

$$\Delta R(m) = \frac{150}{BW\ (MHz)} \quad (۱۳)$$

این مقدار می تواند ۳۰٪± خطا داشته باشد.

۲-۶. حداقل سطح مقطع هدف قابل کشف

می‌دانیم که اگر رادار در ارتفاع h از سطح زمین قرار داشته باشد، آنگاه فاصله افق دید آن برابر رابطه زیر خواهد بود [۱۱].

$$l = \sqrt{\frac{8}{3} R_e h} \quad \rightarrow \quad l(km) = 4.12\sqrt{h(m)} \quad (۱۴)$$

در این رابطه R_e شعاع متوسط کره زمین و برابر با ۶۳۷۸ کیلومتر است. اگر کلاتر غالب در رادار کلاتر سطحی باشد، آنگاه بزرگ‌ترین سطح کلاتر در فاصله افق از رادار دیده می‌شود. اگر پهنای اشعه رادار در راستای افقی برابر با θ_{Az} و حد تفکیک مکانی آن ΔR باشد آنگاه مساحت بزرگ‌ترین سلول کلاتر برابر با مقدار زیر خواهد بود:

$$S_c = l(m) \times \Delta R(m) \times \theta_{Az}(rad) \quad (۱۵)$$

حال اگر سطح مقطع واحد سطح کلاتر برابر با σ_0 باشد، آنگاه سطح مقطع راداری کلاتری که با هدف در رقابت است برابر با مقدار زیر خواهد بود:

$$\sigma_c = S_c \times \sigma_0 \quad (۱۶)$$

سوالی که در اینجا وجود دارد آن است که مقدار σ_0 چگونه به‌دست می‌آید. در واقع همان‌طور که به شکل مفصلی در توضیح داده شده است، مقدار σ_0 وابستگی به نوع پوشش منطقه (دریا، کوه، جنگل، دشت و ...)، فرکانس کاری رادار و نیز زاویه دید آن دارد. در این مرجع مقدار σ_0 برای پوشش‌های مختلف و در فرکانس‌ها و زوایای دید مختلف ذکر شده است. حال اگر ناحیه کار رادار و پوشش منطقه را بدانیم، می‌توانیم با مراجعه به جداول این مرجع مقدار کلاتر واحد سطح و درنتیجه کلاتری که با هدف رقابت می‌کند را تعیین نماییم. برای مثال در جدول (۱) مقدار سطح مقطع واحد سطح دریا برای فرکانس و شرایط مختلف از همین مرجع آورده شده است.

پس از اینکه سطح مقطع راداری کلاتر تعیین گردید، باید این مسئله تعیین شود که رادار تا چه میزان می‌تواند کلاتر را حذف کند. میزان حذف کلاتر در رادار به نوع پردازش رادار و نیز پهنای باند

[1] Interrupted Continuous Wave (ICW)

Archive of SID

www.SID.ir

سیگنال راداری بستگی دارد. هر دوی این موارد در مراجع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال در یکی از مراجع میزان پهنای باند کلاتر دریا در شرایط مختلف دریا مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲]. نمونه‌ای از شکل‌های مرجع در شکل (۲) نشان داده شده است.

میزان حذف کلاتر برای پردازش‌های مختلف در یکی از مراجع مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳]. برای مثال میزان حذف کلاتر برای حذف کننده سه پالسی به همراه پردازش فوریه با هشت نقطه در شکل (۳) نشان داده شده است. سوالی که می توان مطرح کرد این است که چگونه می‌توان نوع پردازش رادار را تعیین نمود؟ پاسخ این سوال را می‌توان با شمارش تعداد پالس‌های موجود در یک زمان پردازش همدوس[1] رادار مشخص نمود.

در هر صورت اگر سطح مقطع راداری کلاتر برابر با σ_c و میزان حذف کلاتر در رادار برابر با I_{MTI} باشد، حداقل سطح مقطع راداری هدفی که برای رادار قابل تشخیص است از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۱۲]:

$$\sigma_{Min}(dBsm) = \sigma_c(dBsm) - I_{MTI}(dB) + SNR_{Min}(dB) \quad (۱۷)$$

در این رابطه SNR_{Min} حداقل سطح سیگنال به نویز مورد نیاز رادار است. مقدار این پارامتر تابع P_{fa} و P_d رادار است ولی معمولاً مقداری بین ۱۳ dB تا ۱۶dB برای آن مناسب است [۱۴].

۲-۷. توان ارسالی رادار

در قسمت قبل کوچک‌ترین سطح مقطع راداری قابل آشکارسازی برای رادار تعیین گردید. برای شناسایی این هدف سیگنال اکوی بازتابی از آن باید هم بر کلاتر و هم بر نویز غلبه کند. در واقع اگر توان دریافتی از هدف برابر با P_r، توان نویز ورودی برابر با P_n، و بهره پردازشی رادار برابر با G_P باشد، شرط لازم برای شناسایی هدف در میان نویز به‌صورت زیر است:

$$P_r(dBm) \geq P_n(dBm) - G_p(dB) + SNR_{Min}(dB) \quad (۱۸)$$

در این رابطه SNR_{Min} مطابق با توضیحات قبل مقداری بین ۱۳ تا ۱۶ dB است.

همچنین G_P بهره پردازش از روی رابطه زیر به‌دست می‌آید [۱۴ و ۹]:

$$G_p(dB) = 10\alpha \times \log N \quad (۱۹)$$

در این رابطه N تعداد پالس‌های دریافتی در یک بازه پردازش همدوس و α عددی بین ۰/۵ تا ۱ است.

برای محاسبه مقدار توان معادل نویز ورودی رادار باید به این نکته توجه کنیم که رادار برای حصول به بیشترین SNR ممکن از فیلتر منطبق (یا فیلتری که تاحد زیادی مشابه با فیلتر منطبق است) برای دریافت سیگنال‌ها استفاده می‌کند. در این صورت توان معادل نویز دریافتی در رادار برابر با مقدار زیر خواهد بود [۱۵]:

$$P_n = \frac{kT_0F_n}{\tau} \quad (۲۰)$$

در این رابطه k ثابت بولتزمان و برابر 1.38×10^{-23} است. همچنین T_0 دمای محیط و برابر با ۲۹۰ درجه کلوین است. پارامتر τ عرض پالس رادار و F_n عدد نویز گیرنده رادار است. مقدار پارامتر عدد نویز بر اساس تکنولوژی ساخت و فرکانس کار رادار تعیین می‌گردد [۱۶]. برای مثال با تکنولوژی‌های فعلی برای گیرنده‌های راداری باند X عدد نویزی بین ۵ dB تا ۷ dB متصور است. همین مقدار برای رادارهای باند L بین ۱ dB تا ۳ dB است [۱۷]. با توجه به فرمول‌هایی که تا اینجا ارائه گردید می‌توان حداقل توان مورد نیاز برای آشکارسازی هدف را تعیین نمود. این توان باید از هدفی با کوچک‌ترین سطح مقطع راداری و در دورترین برد رادار به‌دست آید. در قسمت‌های قبل هم کوچک‌ترین سطح مقطع راداری قابل دید توسط رادار و هم برد رادار تعیین گردید. با استفاده از این پارامترها و نیز معادله رادار می‌توانیم توان ارسالی رادار را به‌صورت زیر به‌دست آوریم:

$$P_T = \frac{P_r(4\pi)^3 R_{Max}^4 L}{G^2\lambda^2\sigma_{Min}} \quad (۲۱)$$

در رابطه فوق L میزان تلفات در رادار است معمولاً عددی بین ۱۵ تا ۲۰ dB خواهد بود.

جدول ۱. سطح مقطع راداری واحد سطح دریا (برحسب $dBsm/m^2$) برای حالت‌های مختلف دریا و زاویه دید ۰/۱ درجه [۱۲]

حالت دریا	قطبش	P	L	S	C	X	Ku	Ka
		۰/۵	۱/۲۵	۳	۵/۶	۹/۳	۱۷	۳۶
۰	عمود							
	افقی			-۹۰*	-۸۷*			
۱	عمود			-۸۰*	-۷۲*	-۶۵*		
	افقی			-۸۰	-۷۵	-۷۱*		
۲	عمود	-۹۰†	-۸۷*	-۷۵*	-۶۷	-۵۶		
	افقی	-۹۵†	-۹۰*	-۷۵*	-۶۷*	-۵۹*	-۴۸*	
۳	عمود	-۸۸†	-۸۲*	-۷۵*	-۶۰*	-۵۱		-۴۷*
	افقی	-۹۰†	-۸۲*	-۶۸*	-۶۹*	-۵۳*		
۴	عمود	-۸۵†	-۷۸*	-۶۷*	-۵۸*	-۴۸		-۴۵*
	افقی		-۷۴*	-۶۳*	-۶۰	-۴۸		
۵	عمود	-۸۰†	-۷۰*	-۶۳*	-۵۵*	-۴۴		-۴۲*
	افقی		-۷۰†	-۶۳*	-۵۸*	-۴۲*		
۶	عمود			-۵۶				
	افقی							

*ممکن است تا 5dBتغییرات داشته باشد.

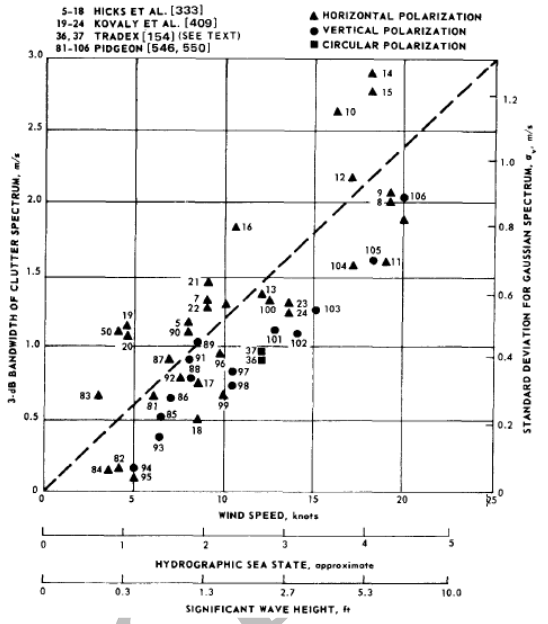
†ممکن است تا 8dB تغییرات داشته باشد.

توجه: این نتایج مربوط به رادار تک- پایا با عرض پالس ۰.۵ تا ۱۰ میکروثانیه می باشد.

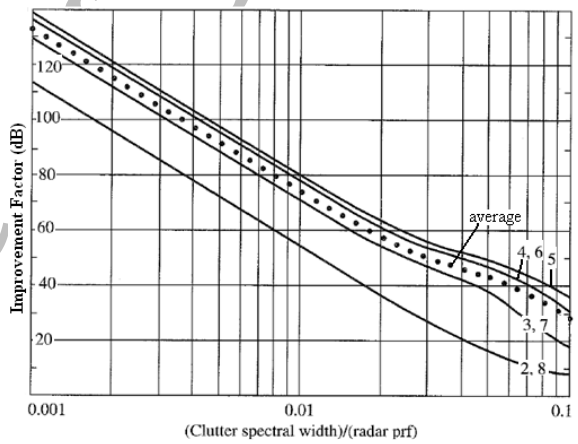
[1] Coherent Processing Interval (CPI)

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲. پهنای باند کلاتر دریا برای حالت‌های مختلف دریا [۱۳]



شکل ۳. میزان حذف کلاتر به کمک یک حذف کننده ۳ پالسی و یک پردازش فوریه با ۸ نمونه [۱۰]

۲-۸. تخمین فاصله رادار از الینت

در قسمت‌های قبل تخمینی از توان ارسالی رادار به‌دست آوردیم، اگر توان ارسالی رادار برابر P_T، بهره آنتن برابر G_T ، سطح مقطع مؤثر الینت برابر A_e و توان دریافتی از لوب اصلی رادار در الینت برابر Pr باشد، آنگاه فاصله رادار تا الینت از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$R = \sqrt{\frac{P_T G_T A_e}{4\pi P_r L_P}} \qquad (۲۲)$$

که در اینجا L_P میزان تضعیف انتشار است. که مقدار آن در زمان‌های مختلف به علت محو شدگی[1] و چند مسیرگی[2] می‌تواند در یک بازه ۱۰dB تغییر کند [۲۰-۱۸]. همچنین دیدیم که در تخمین G_T لااقل ۳dB و در تخمین P_T لااقل ۵dB خطا داریم. بنابراین در مجموع در تخمین پارامترهای زیر رادیکال ۱۸dB خطا داشته باشیم. این مقدار خطا باعث خواهد شد که مقدار فاصله تخمین زده شده برای رادار بین ۰/۳۵ تا ۰/۲۸ مقدار واقعی فاصله باشد. به‌همین دلیل استفاده از این روش برای تخمین فاصله دقت بسیار پایینی دارد و فقط به‌عنوان یک تخمین کاملاً اولیه مناسب است. به‌همین دلیل بسیار مناسب است که برای تخمین فاصله هدف از سایر روش‌ها مانند روش مثلث‌گیری یا روش اختلاف زمان ورود که عموماً به بیش از یک گیرنده الینت احتیاج دارند استفاده شود.

۲-۹. توان مصرفی رادار

توان مصرفی رادار اغلب تابع توان متوسط ارسالی آن است. توان متوسط ارسالی از ضرب توان پیک (که در بخش قبل محاسبه گردید) در ضریب روشن بودن رادار (نسبت عرض پالس به PRI) به‌دست می‌آید:

$$P_{Avg} = P_{pk} \times \frac{PW}{PRI} \qquad (۲۳)$$

باید توجه داشت که چنانچه رادار چند عرض پالس مختلف و یا چندین PRI مختلف دارد، برای محاسبه P_{Avg} مناسب است مقادیری که منجر به بزرگ‌ترین مقدار P_{Avg} می شوند را در نظر بگیریم. در صورت در اختیار داشتن توان متوسط رادار می‌توان توان مصرفی را با ضرب این عدد در مقداری بین ۳ تا ۵ به‌دست آورد. این مسئله به این دلیل است که معمولاً توان عمده مصرفی در رادار در فرستنده مصرف می‌شود و اغلب فرستنده‌ها هم بازدهی بین ۲۰ تا ۳۰٪ دارند.

$$P_s = kP_{Avg}, \qquad k = 3\sim5 \qquad (۲۴)$$

باید توجه داشت که این رابطه یک رابطه تجربی و وابسته به تکنولوژی روز است و ممکن است در آینده با تغییر تکنولوژی ضریب k تا حد زیادی به ۱ نزدیک گردد. محاسبه توان مصرفی از این جهت اهمیت دارد که نوع منبع تغذیه و در نتیجه میزان قابلیت تحرک رادار را مشخص می‌کند. برای مثال اگر توان مصرفی در حد توان تولیدی باطری ها باشد، می توان فرض کرد که رادار از یک باطری تغذیه می کند. چنین راداری احتمالاً قابل حمل توسط نفر است و می‌توان به سرعت آن را جمع آوری کرده و به مکان دیگری منتقل نمود. همچنین اگر توان مصرفی در حد یک ژنراتور کوچک باشد، در این صورت می‌توان فرض کرد که رادار و منبع تغذیه آن بر روی یک سکو قرار دارند و درنتیجه قابلیت تحرک رادار بالا است. اما چنانچه رادار به یک ژنراتور بزرگ احتیاج داشته باشد، اغلب لازم است که این ژنراتور بر روی یک سکوی دیگر نصب گردد. چنین راداری نسبت به دو رادار قبل، قابلیت تحرک و چابکی کمتری دارد.

۳. بررسی چند رادار نوعی

در بخش قبل روابط مختلفی برای تخمین پارامترهای رادار ارائه گردید. در این بخش قصد داریم با بررسی پارامترهای چند رادار نوعی، میزان دقت روابط ارائه شده در بخش قبل را مورد ارزیابی قرار

[1] Fading
[2] Multi-Path

Archive of SID

www.SID.ir

دهیم. درتحلیل‌هایی که در این قسمت ارائه می‌گردد باید به این نکته توجه کرد که در برگه‌های داده رادارهای مختلف، همه پارامترهای رادار آورده نشده اند. به‌همین دلیل ما فقط می‌توانیم در حدی که این داده ها موجود هستند به بررسی بپردازیم.

ابتدا دو رادار فرودگاهی ASR-9 و ASR-10SS را بررسی می‌کنیم [۲۱]. رادارهای فرودگاهی همان‌طور که از نامشان پیداست، در نزدیکی فرودگاه‌ها نصب شده و برای کنترل نشست و برخاست هواپیماها استفاده می‌شوند. این رادارها عموماً برد متوسط بین ۶۰ تا ۹۰ مایل دارند. رادار ASR-9 محصول دهه ۸۰ شرکت آمریکایی وستینگهاوس[1] بوده و بر مبنای تکنولوژی لامپی می‌باشد. رادار ASR-10SS محصول دهه ۹۰ شرکت آمریکایی ریتیون[2] بوده و با تکنولوژی حالت جامد ساخته شده است. سایر مشخصات این دو رادار در جدول (۲) آمده است.

اولین نکته در مورد این رادارها فاصله بدون ابهام آن‌ها است. با کمک مقدار PRF می‌توان تعیین کرد که فاصله بدون ابهام رادار ASR-9 برابر با ۱۲۵ کیلومتر و برای رادار ASR-10SS برابر ۱۸۲ کیلومتر است. نسبت برد رادار (ستون آخر جدول) به فاصله بدون ابهام برای رادار ASR-9 برابر با ۸۰٪ و برای رادار ASR-10SS بین ۶۹٪ تا ۸۲٪ است. حد بالای این عدد کمی بیش از حد بالای مطرح شده برای رادارهای برد متوسط و بلند (یعنی مقدار ۷۹٪) است.

توان پیک رادار ASR-9 برابر با ۱۳۰۰ کیلووات است، همچنین نسبت PRI به عرض پالس رادار برابر ۸۳۳ است. به این ترتیب توان متوسط این رادار برابر با ۱/۵۶ کیلووات به‌دست می‌آید که با عدد عنوان شده در جدول (۱/۶کیلووات) مطابقت خوبی دارد. همین مسئله برای رادار ASR-10SS نیز صادق است.

جدول۲. مشخصات رادارهای فرودگاهی ASR-9 و ASR-10SS

پارامتر	واحد	ASR-9	ASR-10SS
باند فرکانسی		S	S
توان بیشینه	kW	۱۳۰۰	۱۵ [۱] ۳۰ [۲]
نرخ تکرار پالس	Hz	۱۲۰۰	۸۲۵ [۳]
عرض پالس	us	۱	۱, ۱۰۰
توان متوسط	kW	۱/۶	۱/۳ [۱] ۲/۶ [۲]
بهره آنتن	dB	۳۳/۵	۳۴/۵
پهنای پرتو افقی	deg	۱/۳	۱/۴
پهنای پرتو عمودی (۳)	deg	۴/۸ - ۳۰ csc^2	۵ - ۴۰ csc^2
نرخ مرور	rpm	۱۲/۵	۱۵ [۲]
عدد نویز گیرنده	dB	۴/۵	۳/۳
روش کاهش کلاتر		MTD, STC	MTD, Pulse Compression and STC
برد آشکارسازی (۴)	km	۱۰۰	۱۲۵ [۱] ۱۵۰ [۲]

توضیحات: ۱) فرستنده با ۸ بلوک ۲) ۱۶ بلوک

۳) رفتار متوسط تا برد ۱۰۰ کیلومتر ۴) هدف ۱ متر مربع و احتمال ۸۰٪

[1] Westing-House
[2] Raytheon

در مورد آنتن باید گفت که با توجه به برد رادارها و فرض سقف پروازی ۱۰ کیلومتر برای هواپیماها، زاویه ارتفاع پرتو آنتن دو رادار ASR-9 و ASR-10SS به‌ترتیب ۱۱/۴درجه و ۹/۲ درجه به دست می‌آید که مطابقت خوبی با مشخصات آنتن‌های CSC2 با مقادیر عنوان شده در جدول دارد. به‌همین ترتیب با توجه به پهنای بیم آنتن‌ها در راستای سمت، بهره آنتن این دو رادار به‌ترتیب ۳۲/۴ و ۳۳ dBi به دست می آید که به‌ترتیب ۱ و ۱/۵ dB کمتر از مقادیر جدول فوق است.

با توجه به نرخ چرخش آنتن، پهنای بیم آنتن و نرخ ارسال پالس، تعداد پالس‌های دریافتی در دو رادار ASR-9 و ASR-10SS به‌ترتیب برابر با ۲۱ و ۱۳ پالس است. به این ترتیب می‌توان حدس زد که این رادارها از یک حذف کننده ساده، دو یا سه پالسه و یک فیلتر بانک با ۸ یا ۱۶ فیلتر استفاده می‌کنند. همچنین بهره پردازشی آن‌ها نیز بر اساس معادلات بخش قبل بین ۱۱ تا ۱۳ dB است. البته رادار ASR-10SS به علت استفاده از فشرده سازی عرض پالس ۱۰۰ میکروثانیه به ۱۰ میکروثانیه، یک بهره پردازشی ۲۰ dB نیز دارد.

با توجه به عرض پالس ۱ میکروثانیه، پهنای باند رادار ASR-9 برابر یک مگاهرتز است. با توجه به این عدد و عدد نویز گیرنده، توان نویز معادل رادار برابر با ۱۰۹/۵ dBm- است. به همین ترتیب میزان توان دریافتی از هدف یک متر مربعی در فاصله ۱۰۰ کیلومتر برابر با ۹۵ dBm- است. بنابراین مقدار SNR بدون محاسبه بهره پردازشی برابر ۱۴/۵ dB است، با اضافه کردن ۱۲ dB بهره پردازشی به این مقدار، مقدار SNR کلی برابر با ۲۶/۵ dB می شود که خیلی بیش از حد لازم برای شناسایی با احتمال ۸۰٪ است. در واقع برای این آشکارسازی به SNR حدود ۱۳ dB نیاز داریم. بنابراین به‌نظر می‌رسد که طراح سیستم برای سیستم تلفات ۱۳/۵ dB در نظر گرفته که این مقدار، عدد منطقی به نظر می‌رسد. محاسبات مشابهی را می‌توان برای رادار ASR-10SS انجام داد.

مثال بعد، رادار AN/PPS-5 محصول سال ۲۰۰۲ شرکت تلفونیکس کشور آمریکا می‌باشد [۲۲]. این رادار یک رادار مراقبت زمینی برای شناسایی افراد و خودروها در فاصله ۵ تا ۱۰ کیلومتر می‌باشد. مشخصات این رادار در جدول (۳) و تصویری از آن در شکل (۱) نشان داده شده است.

اولین نکته در مورد این رادار رابطه برد و PRF آن است. بر اساس PRF برابر با ۴۰۰۰ هرتز ، فاصله بدون ابهام رادار ۳۷/۵ کیلومتر به‌دست می‌آید. نسبت بیشترین برد (۱۰ کیلومتر) به برد بدون ابهام برابر ۲۷٪ است که کمتر از مقدار پیش‌بینی شده ۴۰٪ است. دلیل این مسئله آن است که اهداف مطلوب این رادار (انسان یا خودرو کوچک) سطح مقطع کمی دارند و بسیار محتمل است که یک هدف بزرگ در فواصل دور با یکی از این اهداف کوچک اشتباه گرفته شود و به‌همین دلیل برد بدون ابهام این رادار نسبتاً بزرگ انتخاب شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳. مشخصات رادار مراقبت زمینی AN/PPS-5

شماره	پارامتر	مقدار	توضیحات
۱	فرکانس	۸/۸ - ۹GHz	
۲	توان بیشینه	۱Kw	
۳	توان متوسط	۱W	
۴	نرخ تکرار پالس	۴kHz±۵%	
۵	عرض پالس	۰/۲۵ us	
۶	نوع آنتن	Parabolic	
۷	ابعاد آنتن	۳۴×۱۰۷cm	
۸	برد آشکارسازی	۵km	نفر پیاده
۹		۱۰km	خودرو سبک
۱۰	دقت اعلام فاصله	۲۰m	
۱۱	دقت اعلام زاویه	۱۰mils	
۱۲	توان مصرفی	۶۵W	
۱۳	کمینه سرعت قابل آشکارسازی	۱/۶km/h	

با توجه به ابعاد آنتن و باند فرکانسی، پهنای بیم آنتن در راستای سمت برابر با ۲ درجه و در راستای ارتفاع برابر با ۶/۳ درجه و بهره آنتن dB ۳۳ تخمین زده می‌شود. متأسفانه در منابع موجود این پارامترها گزارش نشده تا مقادیر واقعی و تخمینی را مقایسه کنیم. اما در جدول دقت زاویه‌سنجی هدف برابر با ۱۰ میلی رادیان (۰/۵۷ درجه) ذکر شده که در صورتی که فرض کنیم این زاویه سنجی در حداقل SNR مورد نیاز برای آشکارسازی (حدود dB ۱۳) به‌دست می‌آید، مقدار پهنای بیم این رادار در راستای سمت باید بین حدود ۱/۷ درجه باشد که این مقدار تخمین قبلی (۲ درجه) را تأیید می‌کند.

شکل ۴. تصویری از رادار مراقبت زمینی AN/PPS-5

میزان عرض پالس ۰/۲۵ میکروثانیه دقت ۱۸/۷۵± متر را در فاصله سنجی می دهد که این مقدار با مقادیر جدول مطابقت خوبی دارد. همچنین مقدار عرض پالس ۰/۲۵ میکروثانیه، به همراه نرخ ارسال پالس ۴۰۰۰ هرتز و توان بیشینه یک کیلو وات، توان متوسط را برابر با یک وات تخمین می‌زند که این مورد هم تطابق خوبی با داده‌های واقعی رادار دارد. اما باید توجه داشت که نسبت توان مصرفی رادار (۶۵ وات) به توان متوسط ارسالی برابر با ۶۵ و بسیار بیش از مقدار تخمین زده شده در بخش قبل (یعنی حدود ۵ برابر) است. دلیل این مسئله هم آن است که به‌علت توان ارسالی کم رادار، توان لازم برای پردازش، نمایشگر و کنترل خیلی بیشتر از توان متوسط ارسالی رادار است و برای این رادار این فرض که توان اصلی مصرفی در رادار همان توان ارسالی رادار است، صادق نمی‌باشد.

کمترین سرعت قابل شناسایی در رادار ۱/۶ کیلومتر بر ثانیه اعلام شده که این مطابق با داپلر ۲۷ هرتز است. با توجه به این فرکانس داپلر و نرخ ارسال پالس ۴۰۰۰ هرتز، می‌توان استنباط کرد که رادار برای پردازش داده‌ها از ۴۰۰۰ تقسیم بر ۲۷ (یعنی ۱۴۸) پالس استفاده می‌کند. برای جمع‌آوری این تعداد پالس، رادار به ۳۷ میلی‌ثانیه زمان نیاز دارد و در این مدت بیم آنتن نباید بیش از یک عرض بیم جابجا شود. با توجه به عرض بیم ۲ درجه، سرعت چرخش آنتن این رادار باید برابر با ۹ دور در دقیقه باشد. متأسفانه این داده هم در مستندات رادار موجود نیست و نمی‌توان آن را با مقدار واقعی مقایسه نمود. در جدول زیر مقایسه‌ای بین پارامترهای تخمین زده شده و پارامترهای واقعی سه رادار بررسی شده در این بخش آمده است.

جدول ۴. مقایسه مقادیر تخمین زده شده و پارامترهای واقعی سه رادار مورد بررسی

نام رادار	پارامتر	محاسبه شده	واقعی
ASR-9	برد (کیلومتر)	۹۹	۱۰۰
ASR-10		۱۴۴	۱۵۰
AN/SPS-5		۱۶	۱۰
ASR-9	توان متوسط (وات)	۱۵۶۰	۱۶۰۰
AN/SPS-5		۱	۱
ASR-9	بهره آنتن (دسی بل)	۳۲/۴	۳۳/۵
ASR-10		۳۳	۳۴/۵
AN/SPS-5	پهنای پرتو آنتن (درجه)	۲	۱/۷
AN/SPS-5	دقت فاصله سنجی (متر)	۱۸	۲۰

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله استخراج پارامترهای عملیاتی رادار به کمک سیگنال‌های دریافتی در الینت مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی شامل پهنای اشعه آنتن رادار، بهره و ابعاد فیزیکی آنتن، برد رادار، قدرت تفکیک در برد، کوچک‌ترین هدف قابل آشکارسازی در رادار، توان ارسالی رادار، فاصله رادار از الینت و توان مصرفی رادار بودند. دیدیم که بسیاری از پارامترهای عملیاتی رادار را می‌توان بر اساس مفروضات منطقی به‌دست آورد. با این حال بسیاری دیگر از پارامترها به‌طور مستقیم قابل تخمین نیستند و تنها بر اساس برخی مفروضات منطقی قابل ارزیابی هستند. همچنین دیدیم که تخمین در برخی از موارد مثل تخمین پهنای بیم افقی آنتن دقت بالایی دارد

Archive of SID

www.SID.ir

ولی در برخی دیگر از موارد نظیر تخمین توان ارسالی رادار، تخمین می‌تواند خطای بزرگی داشته باشد. در قسمت انتهایی مقاله چند رادار مختلف مورد بررسی قرار گرفت و دیدیم که اغلب تخمین‌ها با مقادیر واقعی مطابقت خوبی دارند. البته مواردی نیز (مانند توان مصرفی یک رادار برد کوتاه) از تخمین ارائه شده فاصله زیادی دارند. توضیح دادیم که چنین مواردی باید با دیدگاه رادار خاص بررسی شده و به ملاحظات عملی آن‌ها دقت شود. در مجموع می‌توان گفت که اگر چه به کمک مشاهدات صرفاً بر پایه الینت نمی‌توان همه پارامترهای عملیاتی رادار را به‌طور کامل تعیین نمود، ولی اغلب تخمین‌های منطقی وجود دارد که تاحد زیادی مشخصات رادار را تعیین می‌نماید.

در تحلیلی که در این مقاله ارائه گردید، فرض بر آن بود که اطلاعات موجود صرفاً اطلاعات جمع آوری شده از الینت هستند، در حالی که در عمل ممکن است منابع دیگر اطلاعاتی هم در دسترس باشند. این منابع می‌توانند شامل اطلاعات بصری (تصویر برداری از رادار)، اطلاعات آزاد (مثلاً موجود در اینترنت) یا دسترسی به اطلاعات پنهان باشند. در چنین مواردی می‌توان از این اطلاعات هم استفاده کرده و تخمین‌های دقیق‌تری از توانمندی رادار به‌دست آورد.

علاوه بر این، موضوع مهم دیگری که تحلیل‌گر الینت باید قادر به انجام آن باشد، تحلیل رادار از دید جنگ الکترونیک و تأثیر انواع روش‌های حمله الکترونیک بر آن است. این تحلیل اغلب بعد از تعیین توانمندی‌های عادی رادار مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر دو موضوع استفاده از سایر منابع اطلاعاتی برای تخمین دقیق‌تر پارامترهای رادار و تحلیل توانمندی رادار از دیدگاه جنگ الکترونیک می‌تواند موضوع تحقیقات آینده باشد.

۵. مراجع

[1] Nayebi, M. M., Hormati, A. "Introduction to Electronic Warfare"; Sharif Univ. Press, 1st Ed. 2007 (In Persian)

[2] Scheleher, D. C. "Electronic Warfare in the Information Age"; Artech House, June 1999.

[3] Wiley, R. G. "ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals"; Artech House, 1th Ed., April 2006.

[4] Wang, A.; Krishnamurthy, V. "Signal Interpretation of Multifunction Radars: Modeling and Statistical Signal Processing With Stochastic Context Free Grammar"; IEEE T. Signal Proc. 2008, 56, 1106 – 1119.

[5] Liang, Q.; Cheng, X.; Samn, S. W. "NEW: Network-Enabled Electronic Warfare for Target Recognition"; IEEE T. Aero. Elec. Sys. 2010, 46, 558 – 568.

[6] Clarkson, I. Vaughan L. "Optimization of Periodic Search Strategies for Electronic Support"; IEEE T. Aero. Elec. Sys. 2011, 47, 1770 – 1787.

[7] Poisel, Richard A. "Electronic Warfare Target Location Methods"; Wiley, 2005.

[8] Norouzi, Y.; Derakhshani, M. "Joint Time of Arrival/Angle of Arrival Position Finding in Passive Radar"; IEE P-RADAR SON NAV 2009, 3, 167-176.

[9] Balanis, C. A. "Antenna Theory, Analysis and Design"; Wiley, 1997.

[10] Levanon, N.; Mozeson, E. "Radar Signals"; Wiley Inter-Sci., 2004.

[11] Stimson, G. W. "Introduction to Airborne Radar"; Sci. Tech., 2nd Ed., 1998.

[12] Andrews, G. A. Jr. "Performance of Cascaded MTI and Coherent Integration Filters in a Clutter Environment"; Naval Research Laboratory Report 7533, Washington D.C. 1973.

[13] Nathanson, F. "Radar Design Principles"; McGraw-Hill, 2nd Ed. 1980.

[14] Skolnik, M. I. "Radar Hand Book"; McGraw-Hill, 3rd Ed., 2007.

[15] Papoulis, A.; Pillai, A. "Probability, Random Variables and Stochastic Processes"; McGraw-Hill, 4th Ed., 2000.

[16] Shanmugam, Sun "Digital And Analogue Communication Systems"; John Wiley & Sons, September 1979.

[17] Esfandyarpour, R.; Norouzi, Y. ; Parizi, K. B.; Esfandyarpour, H.; Nayebi, M. M. "A Simple and Fast Analysis of SNR in Non-Coherent Integrators"; 1st Int. Conf. on Computers, Communications, & Signal Processing with Special Track on Biomedical Eng. 2005, 5-9.

[18] Skolnik, M. I. "Introduction to Radar Systems"; McGraw-Hill, 3rd Ed. 2000.

[19] Razavi, B. "Design of Integrated Circuits for Optical Communications"; McGraw-Hill, 2003.

[20] Proakis, G. J. "Digital Communications"; 4th Ed., McGraw-Hill, 2000.

[21] Barton, D. K.; Leonov, S. "Radar Technology Encyclopedia"; Artech House, Electronic Ed. 1998.

[22] Streetly, M. "Jane's Radar and Electronic Warfare Systems"; DPA, 14th Ed. 2003.

Archive of SID

www.SID.ir