فصل دوم

عوامل مؤثر در عملکرد رادار

هدفهای رفتاری: از فراگیر انتظار می‌رود در پایان این فصل :

۱ــ عوامل مؤثر در عملکرد رادار را نام ببرد.

۲ــ عوامل مؤثر در تعیین حداکثر بُرد رادار را تشریح کند.

۳ــ عوامل مؤثر درتعیین حداقل بُرد رادار را تشریح کند.

۴ــ تفکیک در فاصله را با استفاده از دستگاه رادار نشان دهد.

۵ــ تفکیک در سمت را با استفاده از دستگاه رادار نشان دهد.

۶ــ معادله رادار را بنویسد و توضیح دهد.

۷ــ مفهوم قدرت رادار را توضیح دهد.

۱ــ۲ــ عوامل مؤثر در عملکرد رادار

علاوه بر مشخصه‌های فنی دستگاههای مختلف یک سیستم رادار از قبیل قدرت فرستنده، حساسیت گیرنده، عرض پالس، زمان تکرار پالس، ... و فرکانس تکرار پالس که بر عملکرد رادار تأثیرهای مختلفی دارند، عوامل دیگری نیز وجود دارند که هریک به گونه‌ای خاص بر روی نحوهٔ کار و عملکرد رادار تأثیر می‌گذارند. عمده‌ترین این عوامل عبارتند از :

۱ــ شرایط جوّی ؛

۲ــ ارتفاع هدف نسبت به ارتفاع آنتن ؛

۳ــ مشخصه‌های هدف.

۱ــ۱ــ۲ــ شرایط جوّی ــ امواج آبهای اطراف کشتی که درمسیر انتشار امواج راداری قرار می‌گیرند، به‌عنوان مانع مقداری از انرژی منتشره را در جهات مختلف منعکس می‌کنند. بخشی از این انرژی بازتاب شده که دوباره از طریق آنتن دریافت می‌شود، باعث می‌شود تا اکوهایی بر روی صفحه نشاندهنده رادار ظاهر شوند که به‌طور عمده از اکوی هدفهای واقعی ضعیفتر هستند. این اکوهای حاصل از امواج دریا را پژواک دریا (SEA CLUTTER یا SEA ECHO) می‌گویند.

مقدار این اکوها بستگی به وضعیت سطح دریا دارد. بدیهی است درهوای طوفانی میزان پژواک دریا بر روی صفحه رادار زیاد بوده تا فواصل بیشتری توسعه می‌یابد و این امر، تشخیص هدفهایی را که پژواک آنها درمحدودهٔ این پژواکهای دریا قرار گرفته باشند بسیاردشوار می‌کند. در شرایط جوّی نامساعد، پدیدهٔ پژواکهای دریا ضمن این که باعث پراکندگی پرتوهای منتشره راداری خواهند شد که خود سبب می‌شود تا عملکرد رادار در تشخیص و کشف هدفهای دور دست ضعیف شود، در تشخیص اکوی هدفهایی که در فواصل نزدیکتر قرار گرفته‌اند نیز ایجاد دشواری خواهند کرد.

همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر شد، برد رادار معمولاً محدود به افق است، زیرا لایه یونسفر برای فرکانسهای امواج راداری به عنوان یک سطح منعکس‌کننده عمل نمی‌کند. گاه شرایط جوّی خاصی به وجود می‌آید که سبب می‌شود افق رادار کمی بیشتر از افق دید باشد. اگر چه فرض بر این است که امواج رادار و نور کاملاً مستقیم حرکت می‌کنند، اما تغییرات درجهٔ حرارت و رطوبت لایه تروپوسفر[1] (Tropospher) باعث کاهش ضریب دی‌الکتریک آن با افزایش ارتفاع می‌شود ؛ از این رو تشعشعات راداری همواره به سمت پایین انکسار[2] (Refraction) پیدا کرده درنتیجه افق دید رادار به‌گونه‌ای می‌شود که گویی شعاع کره زمین $\frac{۴}{۳}$ میزان واقعی آن شده است. فرکانسهای پایین بیشتر انکسار پیدا می‌کنند ؛ به همین دلیل در رادارهای دور برد از فرکانسهای پایین استفاده می‌شود. شرایطی که ذکر شد و درنتیجه آن امواج رادار مسیر منحنی شکلی را طی می‌کنند، باعث ایجاد بردهای غیر عادی زیاد یا کم رادار خواهد شد. برای مثال، هدفی که معمولاً در فاصله ۲۰ مایلی به وسیلهٔ رادار کشف می‌شود، ممکن است تحت شرایط خاص جوّی در ۱۲۰ مایلی نیز کشف شود یا برعکس اصلاً کشف نشود. به این پدیده که باعث افزایش یا کاهش غیر عادی برد رادار می‌شود، پدیده فوق انکسار (Super refraction یا Ducting) می‌گویند. توضیح این که وقتی انحنای پرتوهای رادار به سمت پایین باشد، افزایش برد را به‌دنبال خواهد داشت و برعکس وقتی انحنای پرتوها به سمت بالا باشد، نتیجهٔ آن کاهش شدید برد خواهد بود.

درمحدودهٔ فرکانسهای راداری، اتمسفر، به گونه‌ای که برای امواج الکترومغناطیسی با فرکانس کمتر از ۱۰۰۰ مگاهرتز شفاف و بدون مانع است، عمل نمی‌کند که این امر، کاهش انرژی، امواج

۱ــ **تروپوسفر:** پایین‌ترین قسمت اتمسفر را تروپوسفر می‌گویند. این لایه معمولاً از سطح زمین تا فاصله ۱۰ تا ۲۰ کیلومتری امتداد دارد.

۲ــ **انکسار:** شکست امواج را در اثر تغییرات چگالی ناحیه‌ای که امواج از آن عبور می‌کند، انکسار می‌نامند. اگر انکسار وجود نداشت، افق رادار با افق دید برابر می‌شد، در حالی که در اثر ایجاد پدیده انکسار افق رادار تقریباً ۱/۲۵ برابر افق دید است.

راداری را که در اتمسفر منتشر می‌شوند، پدید خواهد آورد. این کاهش انرژی به دلایل زیر است :

۱ــ جذب مستقیم انرژی به وسیلهٔ گازهای موجود در اتمسفر ؛

۲ــ جذب و پراکندگی انرژی به وسیله مواد متراکم موجود در اتمسفر نظیر قطرات باران. از گازهای موجود در اتمسفر، اکسیژن و بخار آب انرژی امواج راداری را جذب می‌کنند. قطرات آب موجود در اتمسفر به صورت مه، ابر یا باران نیز باعث جذب یا پراکنده شدن امواج راداری می‌شوند ؛ بنابراین اتمسفر خود نیز باعث تضعیف امواج راداری می‌شود که این در عملکرد رادار تأثیر منفی خواهد داشت.

۲ــ۱ــ۲ــ ارتفاع هدف نسبت به ارتفاع آنتن ــ ارتفاع رادار و همچنین خود هدف (بلندی هدف نسبت به سطح آب) از عواملی هستند که در تعیین فاصله هدف مؤثرند. بدیهی است هر چه آنتن رادار در ارتفاع بلندتری قرار گرفته باشد، میدان دید رادار وسیع‌تر شده و برد آن افزایش می‌یابد. به همین منوال هر چه هدف از سطح آب بالاتر باشد زودتر در میدان دید رادار قرار می‌گیرد. در اثر همین عوامل است که هواپیماهای دور پرواز در فاصله دورتری نسبت به کشتیها کشف می‌شوند. به‌طور کلی حد اکثر برد رادار که به وسیله دو عامل یاد شده محدود می‌شود، از رابطه زیر به دست می‌آید که :

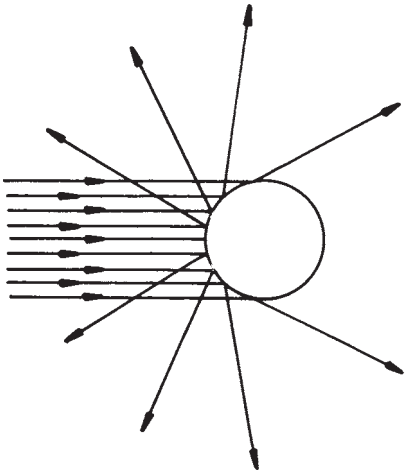
$$R_{max} = \sqrt{۲h_۱} + \sqrt{۲h_۲}$$

در آن R_{max} حداکثر برد بر حسب مایل، $h_۱$ ارتفاع آنتن رادار بر حسب فوت و $h_۲$ ارتفاع یا بلندی هدف نسبت به سطح آب بر حسب فوت است.

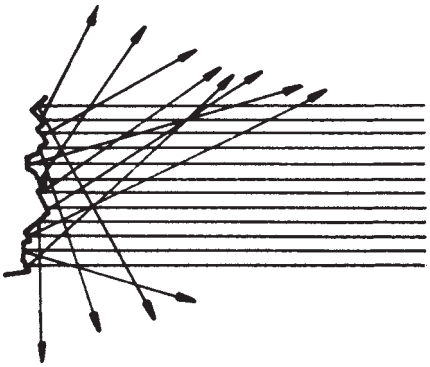
۳ــ ۱ــ ۲ــ مشخصه‌های هدف ــ نوع جنس تشکیل دهنده هدف، شکل و اندازه آن از مشخصه‌هایی است که هر یک به‌گونه‌ای برعملکرد رادار تأثیر می‌گذارد. اشعه‌های نور که با یک جسم برخورد می‌کنند، یا منعکس می‌شوند یا جذب می‌شوند و یا مانند شیشه شعاعهای نور را از خود عبور می‌دهند. همین شرایط در مورد امواج رادار نیز حکمفرما است و همواره جذب بخشی از امواج راداری به وسیلهٔ هدف، قابل انتظار است. بعضی از عناصر، نظیر پوشش مخصوص انتهای خروجی کانال هادی موج در آنتن، امواج را از خود عبور می‌دهد. در بحث رادار، عمل انعکاس که اساس کار بوده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است تا مقدار زیادی به عناصر تشکیل‌دهنده جسم منعکس کننده بستگی دارد. برای نمونه، عمل انعکاس در عناصری مثل فلز و آب بهتر از چوب، سنگ، زمین و نباتات صورت می‌گیرد.

شکل جسم یا هدف نیز یکی از دیگر مشخصه‌های هدف است که برنحوهٔ کار رادار تأثیر می‌گذارد. پرتوهای رادار پس از برخورد باهدف و باتوجه به شکل آن، ممکن است در یک جهت منعکس شده

یا در تمام جهات منعکس شوند. بدیهی است در شرایطی که بازتاب از هدف در یک جهت صورت گیرد، در نحوهٔ کار رادار تأثیر مثبت خواهد داشت. در مواردی که سطح منعکس‌کننده هدف غیر هموار باشد، انعکاس بیشتر در یک جهت همراه با انعکاساتی در سایر جهات صورت خواهد پذیرفت. روشن است که هر چه بازتابهای برگشتی به آنتن گیرنده بیشتر باشد، تصویر بهتری بر روی صفحهٔ نشان دهنده رادار ظاهر خواهد شد. در شکل (۱ــ۲) نحوهٔ انعکاس از یک گوی که در تمام جهات بازتاب می‌شوند، نشان داده شده است. همچنین در شکل (۲ــ ۲) نیز نحوهٔ انعکاس از یک سطح ناهموار نشان داده شده است.



شکل ۱ــ۲ــ انعکاس در تمام جهات

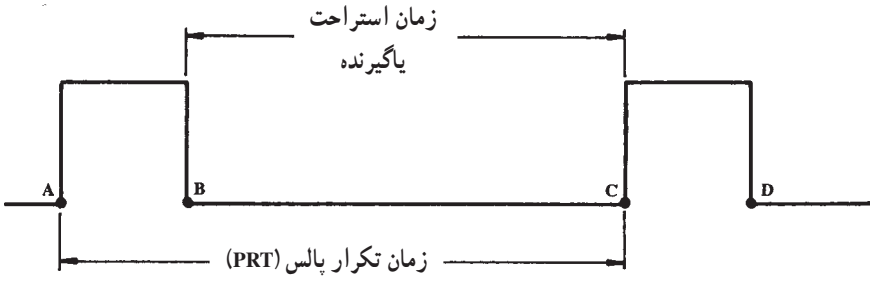


شکل ۲ــ۲ــ انعکاس از سطح ناهموار

علاوه بر نوع جنس و شکل جسم که بر بازتاب امواج راداری اثر می‌گذارند، اندازه جسم نیز بر انرژی اکوهای بازتاب شده اثر می‌گذارد. از این طریق می‌توان به کوچکی یا بزرگی دو اکو که در فاصله مساوی از کشتی خودی قرار دارند پی برد، زیرا اکوی مربوط به یک کشتی بزرگ قویتر از اکوی یک کشتی کوچک که در همان فاصله نسبت به کشتی خودی قرار گرفته است، خواهد بود. در بحث اندازهٔ جسم در مورد هدفهای راداری واژه‌ای به‌کار گرفته می‌شود که نشانگر اندازه هدف است. این واژه «سطح مقطع راداری» است (Radar Cross Section[1]) که مشخص می‌کند سطح مؤثر هدف که امواج را منعکس می‌کنند، به چه میزانی است. برای تشریح مفهوم سطح مقطع راداری، چنانچه یک سطح منعکس کننده ایده‌آلی را درنظر بگیریم که به طور دقیق همان مقدار از انرژی امواج راداری را که خود هدف حقیقی نیز بازتاب می‌دهد منعکس کند، در این صورت میزان مساحت این سطح منعکس کننده ایده‌آل مجازی را سطح مقطع راداری هدف می‌گویند. لازم به توضیح است که وقتی صحبت از اندازهٔ هدف می‌کنیم، در حقیقت منظورمان اندازه‌ای است که امواج رادار در زاویه و حالتی که به هدف برخورد می‌کنند هدف را می‌بینند. برای روشن شدن مطلب به این نکته اشاره می‌کنیم که وقتی یک کشتی را از سینه مشاهده کنیم تصویری از آن حاصل می‌شود که با تصویر به‌دست آمده از حالتی که کشتی را از پهلو (برد راست یا چپ) مشاهده کنیم کاملاً متفاوت خواهد بود و این، همان چیزی است که به عنوان سطح مقطع راداری مطرح است.

۲ــ۲ــ عوامل مؤثر در تعیین حداکثر برد رادار

شکی نیست که به نوعی، برد حداکثر متناسب با قدرت امواج ارسالی رادار است و هر چه قدرت امواج بیشتر باشد، پرتوهای ارسالی فاصله دورتری را طی خواهند کرد. در این مبحث آنچه که مورد نظر است، تعیین حداکثر برد رادار با توجه به مشخصه‌های پالس رادار است. در شکل (۳ــ۲)



شکل ۳ــ۲ــ پالس رادار

۱ــ سطح مقطع راداری را Echo Area یا Target Cross - Section نیز می‌نامند.

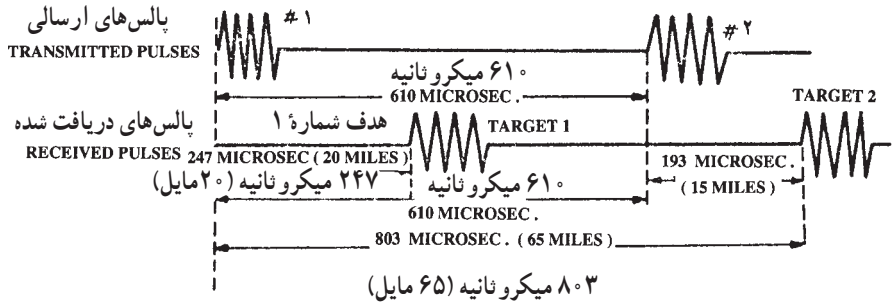
یک پالس رادار نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً شرح داده شد، در فاصله A تا B پالس ارسال می‌شود و در فاصله B تا C که تحت عنوان زمان استراحت یا زمان گیرنده نامیده می‌شود، گیرنده رادار آمادگی دریافت بازتابهای پالس ارسال شده را دارد ؛ بنابراین طولانی‌ترین فاصله‌ای که رادار می‌تواند ببیند، از نظر زمانی به‌وسیله مقدار PRT مشخص می‌شود.

درحالتی که PRT رادار خیلی کم باشد (PRFزیاد)، مشاهده می‌شود که زمان گیرنده کوتاه است ؛ از این رو سیگنال بازتاب برخی از هدفها که در فواصل دورتر قرار دارند، ممکن است پس از ارسال پالس بعدی به گیرنده برسند. بروز چنین وضعی بدیهی است که باعث ابهام در اندازه‌گیری فاصله می‌شود، زیرا رادار بازتاب را مربوط به پالس دوم درنظر گرفته (چون بازتاب در زمان گیرنده بعد از پالس بعدی وارد گیرنده خواهد شد) فاصله‌ای کوتاهتر از مقدار واقعی را نشان می‌دهد ؛ بنابراین حداکثر فاصله‌ای که رادار قادر است برد هدف را به طور واقعی نشان دهد، فاصله‌ای است که بازتاب هدف قبل از شروع پالس بعدی (نقطه C در شکل ۳ــ ۲) به گیرنده رسیده باشد. این فاصله را تحت عنوان «حداکثر فاصله واضح» می‌نامند و مقدار آن از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\text{حداکثر فاصله واضح} = \frac{\text{PRT}}{۱۲/۳۵}$$

دراین‌رابطه فاصله‌برحسب مایل دریایی و PRT برحسب میکرو ثانیه است. توضیح این که عدد ۱۲/۳۵ همان مایل راداری، یعنی زمان رفت و برگشت پالس برای فاصله یک مایل دریایی است و رابطه فوق با یک تناسب ساده حاصل می‌شود.

برای درک بهتر مطلب به شکل(۴ــ ۲) توجه کنید. در این شکل یک پالس راداری با RRT برابر ۶۱۰ میکروثانیه نشان داده شده است. این مقدار PRT مشخص می‌کند که حداکثر فاصله واضح این رادار حدود ۵۰ مایل است. فرض کنید این پالس درمسیر انتشار خود به دو هدف برخورد کند که

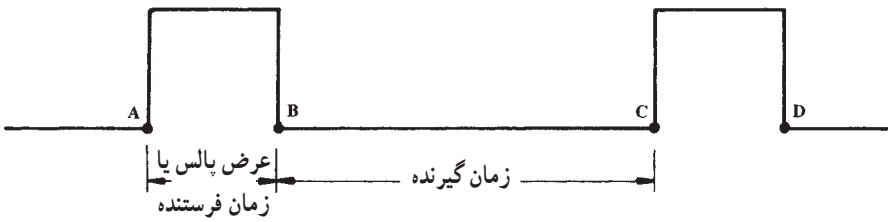


شکل ۴ــ۲ــ حداکثر فاصله واضح

هدف اوّل در فاصله ۲۰ مایلی و هدف دوم در فاصله ۶۵ مایلی قرار گرفته باشند. بازتاب مربوط به هدف اوّل، ۲۴۷ میکروثانیه و بازتاب مربوط به هدف دوم ۸۰۳ میکروثانیه پس از ارسال و انتشار پالس اوّل به گیرنده خواهند رسید. همان طوری که در شکل (۴ــ۲) نیز مشاهده می‌شود، بازتاب هدف اوّل به طور صحیح و درموقعیت زمانی خود نشان داده می‌شود، زیرا فاصله هدف کمتر از حداکثر فاصله واضح رادار (حدود ۵۰ مایل) است ؛ اما بازتاب هدف دوم چون زمان رفت و برگشت پالس بیش از مقدار PRT است، موقعی به گیرنده خواهد رسید که پالس دوم انتشار یافته، گیرنده این بازتاب را دراثر برخورد پالس دوم با هدفی که در فاصله نزدیک قرار گرفته باشد درنظر گرفته و لذا بر روی صفحه نشان دهنده رادار فاصله هدف دوم را ۱۵ مایل نشان خواهد داد که صحیح نمی‌باشد. بنابراین حداکثر فاصله واضح و یا به عبارت دیگر حداکثر فاصله یا برد مؤثر رادار بستگی به میزان PRT داشته و هرقدر PRT بیشتر باشد، حداکثر برد رادار بیشتر خواهد شد.

۳ــ۲ــ عوامل مؤثر در تعیین حداقل برد رادار

عرض پالس یا زمان فرستنده مدت زمانی است که فرستنده در حال انتشار پالس رادار است و در این فاصله زمانی گیرنده رادار به آنتن وصل نبوده هیچ‌گونه بازتابی دریافت نخواهد شد. حال چنانچه هدفی آن قدر به کشتی خودی نزدیک باشد که سیگنال بازتاب آن قبل از سپری شدن زمان فرستنده، یعنی قبل از خاموش شدن فرستنده و در مدار آمدن گیرنده به آنتن برسد دریافت نخواهد شد، زیرا گیرنده هنوز خاموش است. همان طور که در شکل ۵ــ۲ نشان داده شده است، کوتاهترین



شکل ۵ــ۲ــ حداقل فاصله رادار

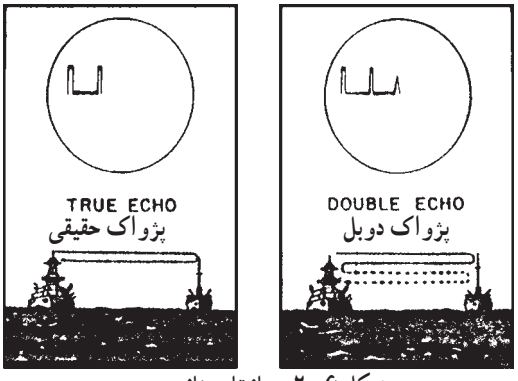
فاصله‌ای که بازتاب یک هدف می‌تواند وارد گیرنده شده بر روی صفحه نشان‌دهنده رادار ظاهر شود، فاصله‌ای است که بازتاب آن در نقطه B، یعنی بلافاصله در شروع به کار گیرنده وارد آنتن رادار شود. با توجه به این که زمان رفت و برگشت پالس باید برابر با زمان عرض پالس (PW) باشد ؛ بنابراین حداقل فاصله از رابطهٔ زیر به دست خواهد آمد :

$$\text{حداقل فاصله رادار} = ۱۶۴ \times PW$$

دراین رابطه فاصله‌برحسب یارد و عرض پالس (PW) برحسب میکروثانیه خواهد بود. توضیح این که بنا بر تعریف مایل راداری، زمان رفت و برگشت پالس برای هدفی که در فاصله ۱۶۴ یاردی واقع شده باشد، برابر یک میکرو ثانیه خواهد بود و رابطه فوق با یک تناسب ساده حاصل خواهد شد.

در راستای توضیح بیشتر دربارهٔ حداقل فاصله یا برد رادار، چنانچه کل زمان ارسال پالس (عرض پالس) برابر با ۲ میکروثانیه باشد، هیچ پالسی در این محدودهٔ زمانی ۲ میکروثانیه دریافت نخواهدشد. به عبارت دیگر، هیچ بازتابی از هدفهای نزدیکتر از ۳۲۸ یارد (۳۲۸ = ۲×۱۶۴= حداقل فاصله) دریافت نمی‌شود. بدین ترتیب عامل تعیین کننده حداقل برد رادار، عرض پالس است. هر قدر عرض پالس کمتر باشد هدفهای با فاصله کمتر از کشتی خودی بیشتر قابل کشف خواهند بود.

۱ــ۳ــ۲ــ بازتاب دوبل ــ هنگامی که فاصله هدف تا کشتی کمتر از حداقل فاصله رادار باشد، بازتاب پالس وقتی از هدف به کشتی فرستنده امواج می‌رسد گیرنده خاموش بوده قابل دریافت نخواهد بود. در این حالت چنانچه موج ارسال شده به اندازه کافی قوی باشد و شرایط خاصی از نظر نحوهٔ استقرار کشتی و هدف نسبت به یکدیگر وجود داشته باشد، موج بازتاب شده به سطح کشتی خودی برخورد کرده دوباره بازتاب می‌شود. این موج اخیر که در جهت هدف انتشار می‌یابد، در برخورد با هدف همانند یک موج رادار عمل کرده دوباره منعکس می‌شود و به طرف کشتی خودی باز می‌گردد. چون به اندازه کافی زمان سپری شده است و گیرنده روشن است، این بازتاب وارد گیرنده شده به عنوان اِکوی هدفی که در فاصله‌ای دو برابر فاصله حقیقی هدف باشد ظاهر می‌شود، زیرا در حقیقت دوبار این مسیر رفت و برگشت را طی کرده است. چنین بازتابهایی را بازتاب دوبل (Double Echo) می‌نامند. این حالت درشکل (۶ــ۲) نشان داده شده است. البته لازم به ذکر است



شکل ۶ــ۲ــ بازتاب نانویه

که وقوع چنین حالتی برای هدفهایی هم که در فاصله نزدیک اما بیشتر از حداقل فاصله رادار از کشتی قرار گرفته باشند امکانپذیر است. در این صورت اِکوی حقیقی نیز بر روی صفحه نشان‌دهنده رادار ظاهر خواهد شد. همان طور که مشاهده می‌شود، شکل (۶ــ ۲) این حالت رانشان می‌دهد.

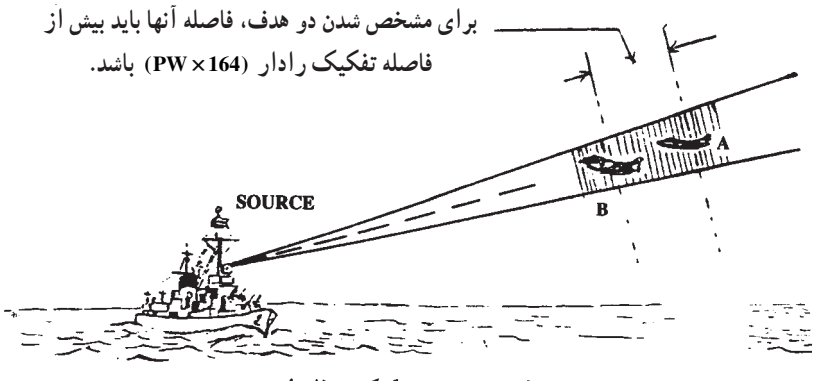
۴ــ۲ــ مفهوم تفکیک در فاصله

تفکیک در فاصله عبارت است از توانایی یک رادار در تشخیص و تفکیک دو هدف که دارای سمت یکسان نسبت به کشتی خودی بوده، اما فاصله آنها متفاوت باشد. در عمل وقتی دو هدف در یک سمت بوده و فاصله میان آنها کم باشد، ازنظر رادار به صورت یک هدف برروی صفحه نشاندهنده رادار ظاهر خواهند شد. حداقل فاصله‌ای که بین این دو هدف باید باشد تا آنها به صورت دو هدف جداگانه به تصویر درآیند، حد تفکیک فاصله نامیده می‌شود.

حد تفکیک فاصله رادار تابعی است از عرض پالس و میزان آن از رابطه زیر به دست می‌آید که در آن حد تفکیک فاصله برحسب یارد و عرض پالس (PW) نیز برحسب میکروثانیه است :

حد تفکیک فاصله = ۱۶۴ × PW

مفهوم تفکیک در فاصله و یا به عبارت دیگر دقت در فاصله در شکل (۷ ــ ۲) نشان داده شده است. برای مثال، چنانچه راداری را باعرض پالس ۱ میکروثانیه درنظر بگیریم، با استفاده از رابطهٔ مربوطه، میزان حد تفکیک فاصله برابر با ۱۶۴ یارد است ؛ یعنی اگر دو هدف با فاصله‌ای نزدیک به هم و در یک سمت از کشتی خودی قرار گرفته باشند، برای این که دو اکوی مجزا و قابل تفکیک بر روی صفحه نشان‌دهنده داشته باشند باید حداقل ۱۶۴ یارد از یکدیگر فاصله داشته باشند، در غیر



شکل ۷ــ۲ــ حد تفکیک در فاصله

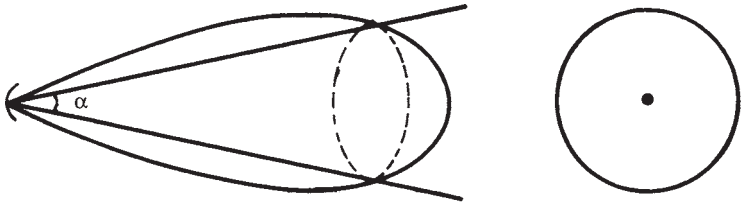
این صورت تنها یک اکو ظاهر خواهد شد.

علت به وجود آمدن این وضعیت که دو هدف تنها یک اکو داشته باشند این است که وقتی دو هدف به هم نزدیک باشند، هنگامی که لبهٔ جلویی پالس برروی هدف دورتر قرارگرفته هدف نزدیکتر نیز در داخل پالس ارسالی بوده و یاحداکثر لبهٔ عقبی پالس بر روی آن قرار می‌گیرد ؛ درنتیجه یک بازتاب ایجاد خواهد شد، مگر آن‌که وقتی لبه جلویی پالس بر روی هدف دورتر قرارگرفت لبه عقبی پالس از روی هدف نزدیکتر گذشته باشد که در این صورت دو اکوی مجزا تشکیل خواهد شد.

۵ــ۲ــ مفهوم تفکیک درسمت

تفکیک در سمت عبارت است از توانایی یک رادار در تشخیص وتفکیک دو هدف که دارای فاصله یکسان از کشتی خودی بوده و سمت آنها متفاوت اما نزدیک به هم باشد. وقتی دو هدف در یک فاصله و در کنار یکدیگر قرار گرفته باشند، قابل تفکیک از یکدیگر نبوده یک تصویر راداری را ایجاد خواهند کرد، مگر آن‌که فاصله آنها از یکدیگر بیش از مقدار معیّنی باشد.

امواج راداری وقتی از آنتن انتشار می‌یابند به صورت یک خط راست نیستند، بلکه لبه جلویی موج به صورت یک سطح کروی شکل بوده که در طول مسیر انتشار هرچه فاصله زیادتر باشد قطر پرتو رادار بیشتر می‌شود. برای اندازه‌گیری قطر پرتو که به عنوان یک مشخصه پرتو رادار مطرح است، از مفهوم عرض پرتو (Beam Width)که یک معیار زاویه‌ای است، استفاده می‌شود. در شکل (۸ــ۲) تصویری از یک پرتو رادار و همچنین مفهوم عرض پرتو نشان داده شده است. با توجه به‌شکل (۸ــ۲) ملاحظه می‌شود که هر قدر عرض پرتو کمتر باشد، پرتو باریکتر بوده در مسیر انتشار فضای کمتری را تحت پوشش قرار می‌دهد. زاویه . را عرض پرتو می‌نامند و معمولاً میزان آن را با درجه بیان می‌کنند.

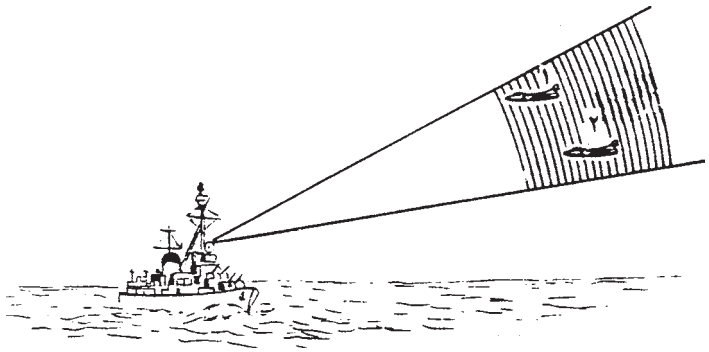


شکل ۸ــ۲ــ تصویری از یک پرتو موج، مفهوم عرض پرتو و سطح مقطع لبه جلویی پرتو

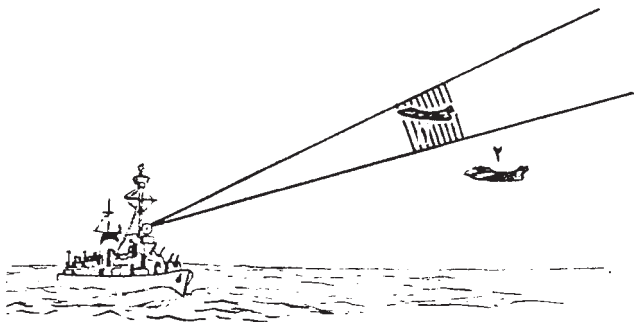
هنگامی که پرتو رادار به دو هدف که در یک فاصله بوده اما نزدیک به هم قرار گرفته باشند برسد، هر دو هدف همزمان در داخل پرتو قرار می‌گیرند و در نتیجه به عنوان یک هدف تلقی شده یک

اکو تولید می‌کنند، مگر آن که پرتو رادار به اندازه‌ای باریک باشد که هر دو هدف همزمان درداخل پرتو قرار نگیرد که دراین صورت دو اکوی مجزا تولید خواهد شد. پس حد تفکیک دو هدف در سمت (و یا به عبارتی دقت در سمت) بستگی به عرض پرتو دارد. با توجه به این که در فواصل دورتر قطر پرتو رادار گسترش می‌یابد، تفکیک هدفها در سمت در فواصل دورتر بسیار دشوارتر خواهد بود.

در شکل (۹ــ۲) دو هدف مشاهده می‌شود که هردو درپرتو رادار قرار گرفته قابل تفکیک نیستند، اما برعکس در شکل (۱۰ــ۲) که عرض پرتو باریکتر است ؛ درهر لحظه تنها یکی از هدفها در داخل پرتو و در معرض پالس قرار می‌گیرد و درنتیجه از یکدیگر قابل تفکیک بوده، به صورت دو اکوی مجزا و مستقل خواهد شد.



شکل ۹ــ۲ــ دو هدف غیر قابل تفکیک در سمت



شکل ۱۰ــ۲ــ دو هدف قابل تفکیک در سمت

پس به طور کلی دقت در سمت یا حد تفکیک در سمت به وسیله عرض پرتو مشخص می‌شود.

برای مثال: اگر عرض پرتو ۲ درجه باشد، دو هدف که در یک فاصله بوده اما نسبت به یکدیگر کمتر از ۲ درجه اختلاف زاویه داشته باشند، قابل تفکیک نبوده و به صورت یک هدف ظاهر می‌شوند.

۶ــ۲ــ معادله رادار

یک سیستم رادار باید سیگنالهای ضعیفی را که از هدفهای دوردست منعکس می‌شوند، کشف و دریافت کند. معادله رادار به لحاظ این‌که روابط عوامل مختلفی را که بر روی قدرت سیگنالهای برگشتی رادار تأثیر دارند، نشان می‌دهد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در این جا بدون این که وارد جزئیات بشویم، معادله رادار را جهت آشنایی مقدماتی با آن مطرح کرده و شرح مختصری نیز درمورد آن بیان می‌کنیم. معادله رادار که در آن حداکثر فاصله (یا برد) رادار بر مبنای سایر اطلاعات و عوامل مختلف نوشته می‌شود، به شرح زیر است :

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P.A^2.S}{4\pi\lambda^2 P_{min}}}$$

در رابطه ذکر شده برای معادله رادار :

R_{max} = برد حداکثر رادار

P = قدرت (توان) ارسالی

A = سطح دریافتی آنتن گیرنده

S = سطح مقطع راداری هدف

λ = طول موج

P_{min} = حداقل توان قابل دریافت به وسیله گیرنده رادار

نتایج بسیارجالب ومهمی رابا بررسی دقیق معادله رادار می‌توان به دست آورد. اوّلین و روشن‌ترین این نتایج عبارت است از این که برد حداکثر رادار متناسب با ریشه چهارم توان ارسالی پالسی[1] است. این بدان معنی است که با ثابت بودن تمام عوامل دیگر، توان پالسی باید شانزده برابر افزایش یابد تا برد حداکثر رادار دو برابر شود. درنتیجه روشن است که چنین افزایش توانی در هرسیستم خاص راداری یا عملی نبوده و یا غیر اقتصادی خواهد بود.

به همین ترتیب روشن است که هر کاهشی در حداقل توان قابل دریافت (P_{min}) همان اثر افزایش توان ارسالی را خواهد داشت. هر چند که این روش بسیار جالب توجهی در برابر روش قبلی (افزایش توان ارسالی) محسوب می‌شود. اما عوامل مختلفی مقدار P_{min} را کنترل می‌کنند که باعث می‌شود کاهش میزان P_{min} نیز حد و حدودی داشته باشد، چون در غیر این صورت بر روی سایر عواملی که بر کارکرد نامطلوب رادار موثر خواهند بود اثرات منفی خواهد داشت.

۱ــ منظور از توان، همان توان قله پالس رادار (PEAK POWER) است که به طور مشروح‌تر در قسمت بعدی این فصل مطرح خواهد شد.

روش دیگر برای افزایش برد حداکثر رادار، افزایش سطح دریافتی آنتن است که درعمل به معنی افزایش قطر مؤثر آنتن است. متأسفانه در انجام این روش نیز محدودیت وجود دارد، زیرا عرض پرتو (BEAM WIDTH) یک آنتن متناسب با نسبت طول موج به قطر آنتن است و درنتیجه هرگونه تغییر در ابعاد آنتن، عرض پرتو را نیز تغییر خواهد داد و این در بعضی موارد در عملکرد مطلوب رادار محدودیت ایجاد می‌کند.

به طور کلی معادله رادار نحوهٔ ارتباط عوامل مختلف را که در عملکرد رادار مؤثرند، بیان می‌کند. از این معادله می‌توان در طراحی سیستمهای راداری متناسب با نوع کاربرد و خصوصیات مورد نظر آن بهره‌برداری کرده و مشخصه‌های مختلف را تعیین کرد.

مثال ۱: حداکثر برد سیستم راداری را به دست آورید که در طول موج ۳ سانتیمتر کار کرده و دارای توان قله پالسی ۵۰۰ کیلووات باشد. فرض کنید که حداقل توان قابل دریافت برابر با $۱۰^{-۱۳}$ وات، سطح دریافتی آنتن رادار برابر با ۵ متر مربع و سطح مقطع راداری هدف برابر با ۲۰ متر مربع باشد.

$$R_{max} = \left(\frac{P.A^{۲}.S}{۴\pi^{۲}P_{min}}\right)^{\frac{۱}{۴}}$$

$$R_{max} = \left(\frac{۵۰۰\times۱۰^{۳}\times۵^{۲}\times۲۰}{۴\pi\times(۰/۰۳)^{۲}\times۱۰^{-۱۳}}\right)^{\frac{۱}{۴}} = \left(\frac{۲۵}{۳۶\pi}\times۱۰^{۲۴}\right)^{\frac{۱}{۴}}$$

$$= ۶/۸۶\times۱۰^{۵} \text{ متر}$$

$$= ۶۸۶ \text{ کیلومتر } (= ۳۷۰ \text{ مایل دریایی})$$

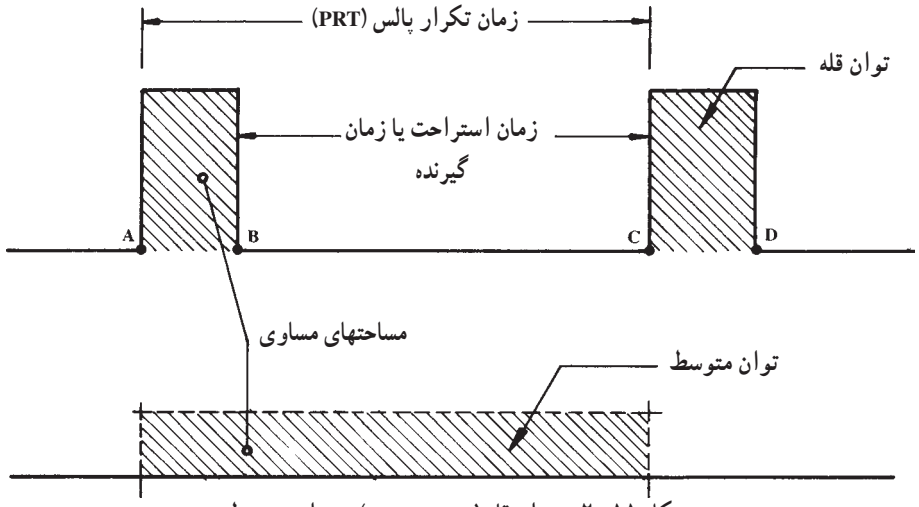
۷ــ۲ــ قدرت رادار

در یک سیستم رادار، فرستنده امواج الکترومغناطیسی را با انرژی زیاد به صورت پالسهایی کوتاه ایجاد کرده از طریق آنتن منتشر می‌سازد. از آنجا که زمان دوام پالس (یا عرض پالس) باید کم باشد تا امکان دریافت اکو هدفهای بسیار نزدیک فراهم باشد و از طرفی نیز پالس رادار باید توان (قدرت) کافی داشته باشد تا بازتاب قابل دریافتی از هدفهای دوردست و در حداکثر برد وجود داشته باشد، لازم است فرستنده رادار خروجی بسیار قوی داشته باشد تا بتواند پالسهای راداری با انرژی زیاد و کافی را تولید کند. توان مؤثر و مفید فرستنده رادار در پالس منتشر شده نهفته است و میزان آن‌را توان قله پالسی (PEAK POWER) می‌نامند.

چون فرستنده یک سیستم رادار در طول سیکل کار خود، تنها برای مدت زمان کوتاهی عمل فرستندگی انجام داده، در بقیه زمان که طولانی نیز است، به حالت خاموش درمی‌آید، توان متوسط فرستنده (AVERAGE POWER) در مقایسه با توان قله (PEAK POWER) در طول زمان تکرار پالس (PRT) بسیار کم خواهد بود.

درشکل (۱۱ــ۲) مفهوم توان قله و توان متوسط نشان داده شده است. در زمان فرستنده که از نقطه A تا B ادامه دارد، قدرت خروجی وجود دارد و این همان قدرت یا توان قلّه یا به عبارتی، قدرت پیک است. در بقیه زمان یعنی از نقطه B تا C که گیرنده شروع به کار می‌کند تا بازتابهای پالسهای ارسالی را دریافت کند، مقدار توان صفر است. از آنجا که اندازه‌گیری میزان توان قله عملی نیست، معمولاً توان متوسط فرستنده اندازه‌گیری شده بر مبنای روابطی که میان توان قله و توان متوسط وجود دارد، میزان توان قله فرستنده مشخص می‌شود.

همان‌طور که درشکل (۱۱ــ۲) مشاهده می شود، توان متوسط میزانی از توان است که چنانچه در طول زمان تکرار پالس تولید شود برابر خواهد بود با توان قله که تنها در مدت زمان کوتاهی (برابر با عرض پالس) تولید خواهد شد. این موضوع در شکل (۱۱ــ ۲) به وسیله سطوح هاشور زده نشان



شکل ۱۱ــ۲ــ توان قله (Peak power) و توان متوسط

داده شده است. رابطهٔ میان توان متوسط که در طول یک سیکل کامل (زمان تکرار پالس ــ PRT) مصرف می‌شود و توان قله که در طول زمان عرض پالس تولید می‌شود، به شرح فرمول زیر است :

$$\frac{\text{توان متوسط}}{\text{توان قله}} = \frac{\text{عرض پالس}}{\text{زمان تکرار پالس}} = \frac{PW}{PRT}$$

این رابطه نشان می‌دهد که هر چه عرض پالس بیشترباشد، توان متوسط بیشتر خواهد بود و همچنین هر چه زمان تکرار پالس بیشتر باشد، توان متوسط کمتر خواهد شد.

۱ــ۷ــ۲ــ سیکل‌کارراادار (DUTY CYCLE)ــسیکل‌کارراادار (DUTY CYCLE) عبارت است از نسبت زمانی که فرستنده رادار مشغول کار است به کل زمان یک سیکل رادار که همان زمان تکرار پالس (PRT)است. این تعریف را می‌توان به صورت رابطهٔ زیر نوشت :

$$\text{سیکل کار رادار} = \frac{\text{عرض پالس}}{\text{زمان تکرار پالس}} = \frac{PW}{PRT}$$

مشاهده می‌شود که سیکل کار رادار ضمن این که نسبت عرض پالس به زمان تکرار پالس است، همزمان برابر است با نسبت توان متوسط پالس به توان قله. رابطه زیر در این‌خصوص وجود دارد :

$$\text{سیکل کار رادار} = \frac{PW}{PRT} = \frac{\text{توان متوسط}}{\text{توان قله}}$$

مثال ۱: سیکل کار رادار را برای راداری که عرض پالس آن ۲ میکرو ثانیه وفرکانس تکرار پالس آن ۵۰۰۰ هرتز باشد، حساب کنید.

$PW = ۲$ میکرو ثانیه $PRF = ۵۰۰۰$ هرتز

$$PRT = \frac{۱}{PRF} = \frac{۱}{۵۰۰۰} = ۲۰۰ \text{ میکرو ثانیه}$$

$$\text{سیکل کار} = \frac{PW}{PRT} = \frac{۲}{۲۰۰} = ۰/۰۱$$

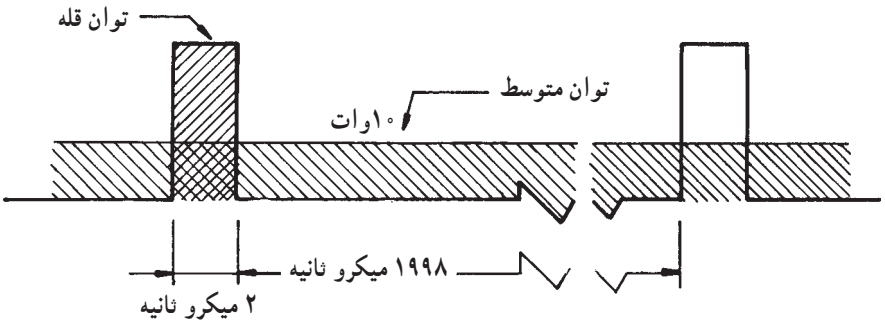
همان طور که درمثال ۱ مشاهده شد، چون بین PRT و PRF یک رابطه عکس $(PRT = \frac{۱}{PRF})$ وجود دارد، می‌توان فرمول مربوط به سیکل کار رادار را به صورت زیر نیز نوشت :

$$\text{سیکل کار رادار} = \frac{PW}{PRT} = \frac{\text{توان متوسط}}{\text{توان قله}} = PW \times PRF$$

مثال ۲: باتوجه به شکل صفحه بعد و مقادیر داده شده، چنانچه توان متوسط این رادار ۱۰ وات باشد، سیکل کار و توان قلّه را حساب کنید.

$$PRT = PW + RT = ۲ + ۱۹۹۸ = ۲۰۰۰ \text{ میکروثانیه}$$

$$\text{سیکل کار} = \frac{PW}{PRT} = \frac{۲}{۲۰۰۰} = ۰/۰۰۱$$



شکل ۱۲ــ۲

$$\text{توان قله} = \frac{\text{توان متوسط}}{\text{سیکل کار}} \quad \text{سیکل کار} = \frac{\text{توان متوسط}}{\text{توان قله}} \rightarrow \ldots.$$

$$\text{توان قله} = \frac{\text{توان متوسط}}{\text{سیکل کار}} = \frac{۱۰}{۰/۰۰۱} = ۱۰۰۰۰ \text{ وات}$$

توان قله = ۱۰ کیلووات

پرسش

۱ــ عوامل مؤثر در عملکرد رادار را نام ببرید؟

۲ــ پژواک دریا (SEA CLUTTER) را شرح داده اثرات آن را در عملکرد رادار بیان کنید.

۳ــ اتمسفر چه اثراتی برروی امواج راداری دارد؟

۴ــ سطح مقطع راداری هدف را تعریف کنید.

۵ــ حداکثر فاصله واضح رادار به چه عاملی بستگی دارد؟

۶ــ اگر بخواهیم در یک سیستم رادار هدفهای تا ۶۵ مایلی را کشف کنیم، میزان PRT حداقل چه باید باشد؟

۷ــ اگر عرض پالس ۲ میکروثانیه باشد، حداقل فاصله رادار چه قدر است؟

۸ــ مفهوم تفکیک در سمت را تشریح کنید.

۹ــ سیکل کار رادار را تعریف کرده روابط مربوط را بنویسید.

۱۰ــ اگر فرکانس تکرار پالس ۲۰۰۰ هرتز و سیکل کار رادار ۰/۰۰۲ باشد، عرض پالس چه‌قدر است؟