

وزارت علوم تحقیقات و فناوری



دانشگاه صنعتی امام سجاد (ع)

دانشکده برق و مهندسی پزشکی

گروه مخابرات

سمینار کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات - سیستم

پردازش سیگنال های رادار و سونار

سید محمد سعادت‌مند

استاد راهنما:

دکتر ایمان احدی اخلاقی

بهار ۹۶

فهرست مطالب

۱- مقدمه	۱
۲- رادار و سونار	۴
۱-۲- کلیت سامانه رادار و سونار	۴
۲-۲- تاریخچه	۷
۱-۲-۲- سرگذشته سونار	۷
۲-۲-۲- سرگذشت رادار	۸
۳-۲- مدل سیگنال	۱۰
۱-۳-۲- معادله برد راداری یک نقطه ساده	۱۰
۲-۳-۲- معادله برد توزیع شده	۱۱
۳-۳-۲- RCS و پلاریزاسیون	۱۲
۴-۳-۲- دید آماری به سطح مقطع راداری	۱۲
۵-۳-۲- مدل سورلینگ	۱۵
۶-۳-۲- مدل کلاتر	۱۶
۷-۳-۲- مدل نویز و سیگنال به نویز	۱۷
۸-۳-۲- مدل فرکانسی: جابجایی دوپلر	۱۸
۳- جمع بندی	۱۸
۴- منابع	۲۰

۱- مقدمه

واژه رادار مخفف **Radio Detection And Ranging** و واژه سونار مخفف عبارت **And Navigation Sound Ranging** می‌باشند. امروزه این عبارات وارد زبان‌ها شده و این کلمه مستقلاً معنی پیدا کرده. هر دو سیستم از انتشار امواج برای روشن کردن محیط استفاده می‌کنند و با دریافت کردن بازتاب روشنائی می‌توانند در مورد محیط؛ اطلاعات، بدست آورند. تفاوت آنها در موجی است که برای روشن کردن محیط استفاده می‌کنند، رادار از امواج رادیویی استفاده می‌کند و سونار از امواج مکانیکی. از آنجا که این امواج ویژگی‌های متفاوتی دارند خاستگاه آنها هم متفاوت است. امواج رادیویی در آب کشته می‌شوند در حالی که در هوا به خوبی منتشر می‌شوند، این در حالی است که امواج مکانیکی برعکس امواج رادیویی می‌توانند در آب بهتر از هوا منتشر شوند. با این وجود سونار در هوا هم کاربردهایی دارد، مثلاً برای ناوبری روبات‌ها و نوع خاصی از آن برای بررسی هوا کره استفاده می‌شود.

اساس کاری که در این دو تکنیک استفاده می‌شود یکسان است، به طور کلی هر دو فاصله سیگنال ارسال شده را تا زمان دریافتش، اندازه گیری می‌کنند، که این اندازه گیری با دانستن سرعت حرکت موج در محیط مورد نظر انجام می‌شود. مثلاً سرعت امواج رادیویی در هوا، سرعت نور (3×10^8 متر بر ثانیه) است.

پس معادله ای که برای مدل کردن رفتار رادار و سونار استفاده می‌شود؛ یک تیپ خواهد داشت. به همین دلیل در نوشته پیش رو فقط رادار را مورد بحث قرار می‌دهیم. نکته ای هم که در مورد سونار وجود دارد، این است که کتاب‌های موجود در اینترنت برای مطالعه پیرامون سونار خیلی محدود تر از رادار هستند، و مطالبی که در مورد سونار بیان خواهند شد نیز از دانشنامه انگلیسی ویکی پدیا خواهد بود.

سونار به دو دسته اکتیو و پسیو تقسیم می‌شود، همچنین رادار را می‌توان از جنبه‌ها مختلف طبقه بندی نمود. امروزه با توسعه این تکنولوژیها، کاربردهای نوین و وسیعی پیدا کرده اند، اگر چه هنوز هم بزرگترین مشتری رادارها قسمت نظامی کشورها هستند و همانها هم بزرگترین توسعه دهندگان این تکنولوژی می‌باشند. بیشتر رادارها، رادارهای پالسی و **monostatic** (آنتن فرستنده و گیرنده امواج یکجا هستند) با چاشنی پردازش سیگنال هستند. که بعداً پیرامون این موارد صحبت خواهد شد.

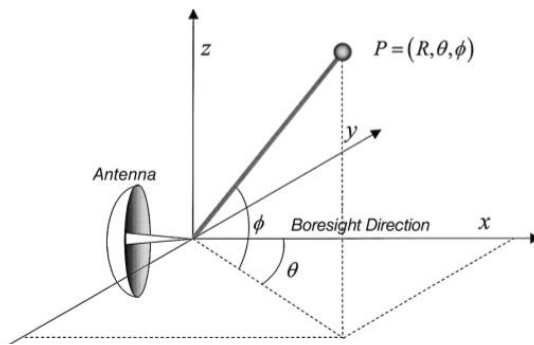
سامانه‌های رادار پیشرفته با پردازش دیجیتال سیگنال و یادگیری ماشین همراه شده اند که قابلیت استخراج اطلاعات مفید را از سطح بالای نویز فراهم کرده. همچنین با ظهور پردازش مدرن سیگنالها استفاده از سونار پسیو به عنوان ابزار اصلی جستجو و تشخیص امکان پذیر شده است.

معادله رادار، در فضای کروی می‌باشد و **شکل ۱-۱** نوتیشن‌ها را بیان نموده. زاویه θ را سمت خوانده و زاویه ϕ را **بلند** r و **R** را برد r خوانیم. همچنین قسمتی از الگوی تشعشعی آنتن که بیشترین مقدار را دارد را **بیشینه دید** گوئیم.

r Range

θ Elevation

ϕ Azimuth



شکل ۱-۱ مولفه های مختصات کروی [1]

معیارهای شایستگی پارامترهایی هستند که میزان کارایی و دقت را در اندازه گیری های دیگر تعیین می کنند. اساسی ترین معیارها در تحلیل کارایی تشخیص و آشکار سازی، احتمال تشخیص P_D و احتمال تشخیص اشتباه P_{FA} می باشد. در حالتی که دیگر پارامترها ثابت باشد، افزایش P_D افزایش P_{FA} را به همراه خواهد داشت. معیار دیگر نسبت سیگنال به تداخل (SIR) است. زمانی که چند هدف برای تشخیص وجود داشته باشد، ملاحظات دیگر ظاهر می شوند. این که رزولوشن مورد و گلبرگ های کناری آنتن چقدر باشند.

در تصویر برداری مهم ترین معیارها رزولوشن و دینامیک رنج می باشند. کاربرد رزولوشن واضح است، اما کاربرد دینامیک رنج کنتراست تصویر و ممیزان اطلاعاتی که می توان از تصویر استخراج کرد را تعیین می کند.

هدف پردازش سیگنال در رادار بهبود این معیارهای شایستگیست. SIR را می توان با یکپارچه سازی پالس ۱ بهبود داد. SIR و رزولوشن را می توان به صورت توام با تکنیک های طراحی شکل دهی موج مثل فشرده سازی پالس ۲ یا چابکی فرکانس ۳ بهبود داد. دقت دست آورد کاهش SIR و روش های درون یابی است. رفتار گلبرگ های کناری را می توان با تکنیک پنجره پنجره کردن، که در دیگر کاربردها هم استفاده می شود؛ بهبود داد. هر کدام از این موضوعات می توانند موضوع یک فصل باشند.

پردازش سیگنال های رادار در بسیاری از تکنیک هایی که در رشته های دیگر مانند: مخابرات، سونار یا حتی پردازش صوت، استفاده می شود؛ اشتراک دارد. بیشتر وظیفه تشخیص هدف ها بر پایه فیلتر کردن خطی، قضیه تشخیص آماری، است. تبدیل فوریه با تکنیک FFT^۶ همه جا دیده می شود، از پیاده سازی کانولوشن فیلتر تطبیف یافته گرفته تا تخمین طیف دوپلر و تصویربرداری راداری. تکنیک های نوین تخمین طیف و فیلترهای تطبیقی بر مبنای مدل، برای شکل دهی موج و حذف پارازیت به کار می روند. تکنیک های تشخیص الگو برای جداسازی هدف و درهم برهمی^۷ و شناسایی هدف استفاده می شوند.

ویژگی های پردازش سیگنال رادار این است که: الف) بیشتر رادارهای امروزی، همدوس^۸ هستند، یعنی سیگنال دریافتی به فرکانس پایه منتقل شده و مختلط می شود و دیگر حقیقی نخواهد بود. ب) دینامیک رنج سیگنال بسیار بالاست، بنابراین کنترل بهره و گلبرگ های کناری مهم است. ج) پهنای باند بالا، از چند مگاهرتز تا حتی گیگاهرتز. که تاثیرش را روی بخش DSP^۹ یا پردازش سیگنال های دیجیتال خواهیم دید. باعث می شود نیاز به مبدل آنالوگ به دیجیتال سریع

^۷ Clutter

^۸ Coherence

^۹ Digital signal processing

^۵ Windowing

^۶ Statistical detection theory

^۶ Fast Fourier Transform

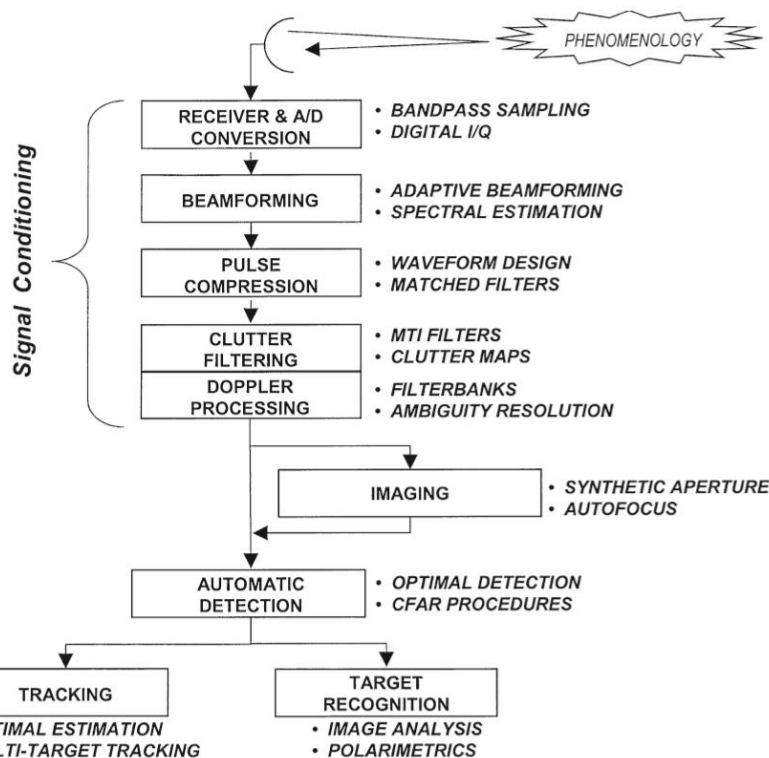
^۱ Pulse integration

^۲ Pulse compression

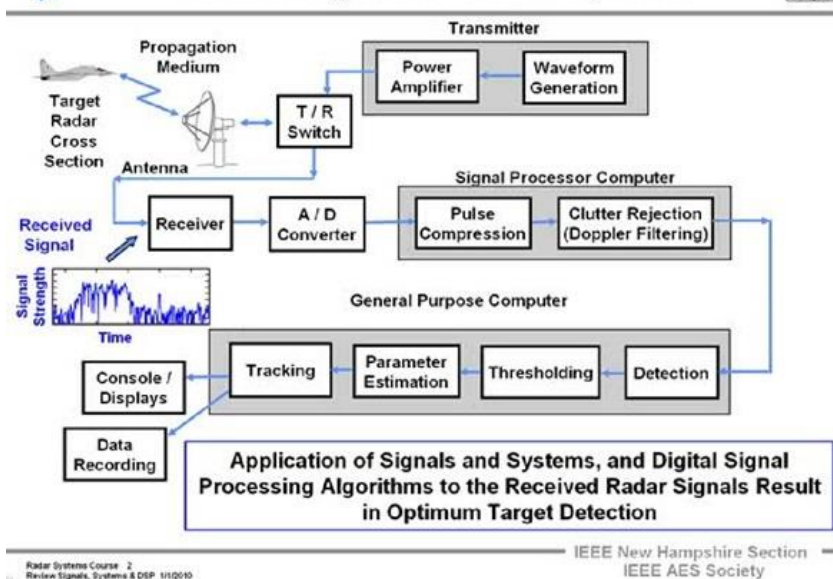
^۳ Frequency agility

داشته باشیم، که منجر به داشتن نرخ نمونه برداری بالا و بالطبع نرخ بالای داده برای پردازش خواهد شد، پس نیازمند الگوریتم‌های سریع هستیم، به همین دلیل هم در قسمت چندبسیازی، به جای ۱۶ بیت از هشت تا چهارده بیت برای هر کلمه، استفاده می‌شود تا نرخ پردازش داده‌ها کم نگه داشته شود. مطالبی که تا اینجا به طور مختصر در موردشان صحبت شد را در شکل ۳-۱ - شما کلی از سیستم رادار پالسی می‌بینیم.

در متن پیش رو قصد داریم به خود سیستم رادار و سونار، و سپس به صورت سطحی به پردازش سیگنال‌های رادار بپردازیم.



شکل ۲-۱ کلیت پردازش سیگنال در رادار [1]



شکل ۳-۱ - شما کلی از سیستم رادار پالسی [2]

۲- رادار و سونار

این بخش که بخش اصلی سمینار است، ابتدا مقداری در مورد کلیت سامانه رادار و سونار صحبت می‌کنیم، به تاریخچه شان می‌پردازیم، سپس به مبحث پردازش سیگنال می‌پردازیم.

۲-۱- کلیت سامانه رادار و سونار

قابلیت‌های مطلوب رادار عبارتند از: [3]

- کار در شب، روز، در نور یا تاریکی و با برد زیاد.
- کار کردن در هر آب هوایی، مه، برف، یا حتی عبور از دیوار یا قطری از برف.
- پوشش سطح زیاد، و پوشش یک نیم کره به طور کامل.
- تشخیص اشیا و ردگیری آنها، تصویر برداری با کیفیت، بالطبع استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر.
- فعالیت بدون نیاز به انسان، و ۲۴ ساعته.

رادار می‌تواند تقسیم بندی‌های متفاوتی داشته باشد. اگر آنتن فرستنده و گیرنده رادار، یکجا باشد؛ به آن *monostatic* و اگر با فاصله از هم قرار گرفته باشند، *bistatic* گویند.

تقسیم بندی رادارها از لحاظ سیگنال ارسالی: الف) پالسی ب) موج پیوسته

الف) پالسی:

رادار، پالسی را با فرکانس بالا می‌فرستد، کمی صبر می‌کند تا پژوال سیگنال را دریافت کند به یک تقسیم بر مجموع زمان ارسال پالس و زمان صبر کردن برای دریافت ^۱PRF گویند. اگر PRF بالا باشد برای اندازه گیری سرعت مناسب است. اگر کم باشد برای اندازه گیری برد مناسب است.

ب) موج پیوسته:

این تکنیک به صورت پیوسته موجی با فرکانس خالص ارسال می‌کند. به همین دلیل توانایی اندازه گیری سرعت را دارد. یعنی فرکانس سیگنال دریافتی را با سیگنال ارسالی مقایسه می‌کند و تغییر فرکانس نشان دهنده سرعت شعاعی نسبت به آنتن رادار می‌باشد. اما اندازه گیری فاصله نیازمند نشانه‌هایی برای اندازه گیری زمان می‌باشد که با مدولاسیون (مثلاً FM) می‌توان به این نیازمندی دست یافته، فاصله را هم اندازه گیری کرد.

اجزا مهم رادار پالسی و *monostatic* :

- **فرستنده:** پالسی در فرکانس بالا با طول کم و انرژی زیاد تولید می‌کند تا توسط آنتن در هوا منتشر شود. می‌تواند همدوس^۲، غیر همدوس یا شبه همدوس باشد. اگر تمام پالس‌های ارسالی یک فاز معلوم داشته باشند، سیستم همدوس خواهد بود، اگر هر پالس فازی تصادفی و نامعلوم داشته باشد، غیر همدوس خواهد بود، اگر غیر همدوس باشد ولی فاز هر پالس در حافظه ذخیره شده و توسط گیرنده قابل دسترسی باشد،

^۲ coherence

^۱ Pulse Repetition Frequency

شبه همدوس نامیده خواهد شد. دو نوع فرستنده معمول هستند: الف) نوع keyed-oscillator که یک پله ۱ سازنده پالس در فرکانس رادیویی دارند، معمولاً مگنترون^۲، که با یک پالس پر توان و توسط قسمتی دیگر تولید می‌شود، کلید خورده یا مدوله^۳ می‌شود. به این سیستم POT (Power Oscillator Transmitter) گویند، این نوع رادارها غیر همدوس یا شبه همدوس اند. ب) Power-Amplifier-Transmitters (PAT) که در رادارهای جدید تر استفاده می‌شود، قسمت مولد شکل موج را به طور کلی به فرکانس‌های پایین منتقل نموده و توسط تقویت کننده‌های قدرت (Amplifitron, Traveling wave tube, Klystron or Solid-State-) (Amplifier)، آن را برای ارسال توسط آنتن آماده می‌کنند. این نوع رادارها می‌توانند کاملاً همدوس باشند.

- **دوپلکسر:** که سیرکولاتوره یک نوع آن است و به آن R/T^۶ سویچ هم گویند، وظیفه جدا کردن گیرنده از فرستنده را دار، چرا که معمولاً در این رادارها به یک آنتن وصل هستند و سیگنال‌های قوی فرستنده می‌تواند، باعث نابودی گیرنده شود. رادارهای موج پیوسته، همواره امواج را ارسال می‌کنند. به همین دلیل نیازمند دو آنتن جدا برای ارسال و دریافت هستند.

- **گیرنده:** اطلاعات را از آنتن گرفته، به باند پایه برده پردازش می‌کند. در گیرنده، LNA و Gain Control باید وجود داشته باشند. وجوب المان اول واضح است و دومی به دلیل دینامیک رنج بالای سیگنال دریافتی است.
- **آنتن:** معمولاً از آنتن‌های سمت گرایبی بالا استفاده می‌کنند تا از انرژی به طور بهینه استفاده شود. معمولاً این آنتن‌ها با بازتابگر سهمی، شکاف دار^۷ یا آرایه فازی ساخته می‌شوند. به $P(\theta, \varphi)$ الگوی تشعشعی آنتن گویند.

$$P(\theta, \varphi) = |E(\theta, \varphi)|^2 \quad (1-2)$$

رادار را می‌توان با توجه به بازه فرکانسی اختصاص یافته به آن هم تقسیم بندی نمود. کل طیف فرکانسی توسط دو سازمان مختلف طبقه بندی شده، IEEE و NATO که این تقسیم بندی به ترتیب شامل: HF, VHF, UHF, L, S, C, K_a, K, K_u, V & W or millimeter wave است.

کاربردهای رادار:

کنترل ترافیک هوایی و زمینی، رادار نجومی، سامانه پدافند هوایی، سامانه ضد موشک، رادارهای کشتی‌ها برای موقعیت یابی نشانه‌ها^۸ دیگر کشتی‌ها، سامانه ضد برخورد هواگردها، سامانه نظارت بر اقیانوس‌ها (تحقیقاتی)، سامانه‌های نظارت بر فضا و مائور ملاقات در فضا، پایش بارش‌های مربوط به هواشناسی، ارتفاع سنجی و سیستم کنترل پرواز، سامانه هدف یابی موشک‌های هدایت شونده^۹، رادار زمین نفوذ برای مشاهدات زمین شناسی، سامانه ضد تصادف/ کروز کنترل و ایمنی اتوموبیل‌ها، سامانه‌های هشدار زودهنگام با رادار Over horizon که از بازتاب تروپوسفر استفاده می‌کنند تا فرا تر از سطح افق را پوشش دهند.

^۹ Rendezvous

^{۱۰} Guided missile

^۶ Circulator

^۷ Receive/Transmit

^۸ Slotted waveguide

^۹ Landmarks

^۱ Stage

^۲ Magnetron

^۳ Modulated

^۴ Duplexer

سونارها به دو صورت اکتیو^۱ یا فعال و پسیو^۲ یا انفعالی وجود دارند، سونار اکتیو مثل رادار امواجی را ارسال کرده پژواکشان را تحلیل می‌کند. سونار پسیو موجی نمی‌فرستد، فقط به صداها گوش می‌دهد، سونار مبدلی دارد، که به زبان لاتین به آن ترنسدیوسر^۳ گویند. هر تبدیل کننده انرژی از حالتی به حالت دیگر را ترنسدیوسر یا مبدل گویند. این مبدل در سونار انرژی الکتریکی را به مکانیکی تبدیل کرده. گوش‌های دریایی؛ فقط مکانیکی را به الکتریکی تبدیل می‌کنند.

استفاده نظامی سونار: در جنگ‌های دریایی استفاده از سونار اکتیو و پسیو در کشتی‌ها، هواگردها و مکان‌های ثابت حیاتی است. اگر چه در جنگ جهانی دوم از سونار در کشتی‌های سطح دریا استفاده شد اما زیر دریایی‌ها از سونار اکتیو استفاده نکردند چرا که باعث می‌شد موقعیتشان برای دشمن آشکار شود. البته با ظهور پردازش مدرن سیگنالها با استفاده از سونار پسیو به عنوان ابزار اصلی جستجو و تشخیص امکان پذیر شده. گفته می‌شود در سال ۱۹۸۷ شرکت جاپنی توشیبا دستگاهی را به روسیه فروخت که باعث ساکت تر شدن تیغه‌های پروانه محرک زیر دریایشان شده. به این ترتیب تشخیص نسل‌های جدید تر زیر دریایی‌ها را سخت تر کرده اند.

زیردریایی با استفاده از سونار نمی‌تواند اطلاعات با کیفیت خیلی بالا را برای سامانه آتش فراهم کند، اما استفاده آن توسط کشتی‌های سطح دریا می‌تواند بسیار مفید باشد، زیر دریایی‌ها فقط در موقعیت‌های تاکتیکی که شرایط بر آنها دیکته می‌کند، به طور موقتی و به عنوان وسیله ای پشتیبان برای سونار پسیو، از سونار اکتیو استفاده می‌کنند؛ چرا که ممکن است تشخیص موقعیت زیر دریایی دشمن از مخفی کردن خودمان مهم تر باشد. از آنجا که می‌توان کشتی را با استفاده از داده‌های ماهواره ای ردیابی کرد، آشکارسازی موقعیتشان نمی‌تواند خیلی مهم باشد. سیگنال فرستنده سونار تا فاصله‌های بسیار دور (چند برابر فاصله قابل تشخیص خود استفاده کننده سونار) فابل شنیدن بوده، که مورد پسند نیست.

سونار در هواگردها به صورت قابل عرضه استفاده می‌شود و با نام Sonobuoy معروف اند. Sonobuoy شناوری در آب است که از آن آرایه ای از سونار آویزان است.

تقریباً در تمام قسمت‌های زیر دریایی سونار پسیو نصب شده، اگر در سمتی صدایی شنیده شود (تحلیل پهن باند) می‌توان روی آن زوم کرد (تحلیل باریک باند). باید توجه داشت که هر شی موتوری؛ نویزی دارد، یعنی صدا ایجاد می‌کند. با تبدیل فوریه می‌توان فرکانس‌های مختلفش را استخراج کرد، چرا که هر موتوری نویز خاصی ایجاد می‌کند، می‌توان شی را تشخیص داد. یک پایگاه داده با داشتن اطلاعات ویژگی‌های موتورها ویژگی ای است که با نام ACINT (ACoustic INTelligence) یاد می‌شود.

استفاده دیگر از سونار پسیو، تعیین مسیر پرواز (trajectory) هدف است، به این توانایی Target Motion Analysis (TMA) گویند. نتیجه اش یافتن: سرعت، جهت و فاصله هدف است.

۰ disposable

۲ Transducer

۱ Active

۴ Hydrophone

۲ Passive

اگر چه سونار گران قیمت بوده و دارای اجزای الکترونیکی با فناوری سطح بالا می‌باشد اما نامرئی و کاربردیست. معمولا به صورت آرایه ای نصب شده تا کارایی بالایی داشته باشد.

کاربردها: جنگ ضد زیر دریایی‌ها، اژدرها، مین‌های دریایی، مین یاب‌های دریایی، ناوبری زیر دریایی‌ها، هواگردها(با سونوبوی‌های اکتیو یا پسیو)، ارتباطات زیر آب، نظارت زیر اقیانوس، امنیت زیر آب، سونار شنود(شنود برای یافتن سونارهای اکتیو دیگر).

کاربردهای غیر نظامی: ماهی گیری، Echo sounding (اندازه گیری عمق آب)، Underwater acoustic positioning system، جایگزین زوج تصویری اش(به جای پردازش تصویر)، ماشین‌های بدون سرنشین زیر آب.

کاربردهای علمی: اندازه گیری موج، اندازه گیری سرعت آب، نقشه برداری از اقیانوس و دریا و تعیین نوع کف و حتی زیر کف اقیانوس‌ها، Synthetic aperture sonar.

۲-۲- تاریخچه

در این بخش به بررسی تاریخ سونار و رادار می‌پردازیم. شاید تجهیزات رادار از سال ۱۹۵۰ تا امروز، تفاوت فاهشی نداشته باشد. اما طریقه هدایت و تحلیل داده‌ها با ظهور پردازش سیگنال تغییر نموده و بهبود یافته.

۲-۲-۱- سرگذشته سونار

استفاده از سونار قبل از رادار بوده، در ۱۹۱۳، الکساندر بم^۱ برای دستگاه اکو سوندر^۲ ثبت اختراع انجام داد. تا سال ۱۹۱۵ یک سری از زیر دریایی‌های بریتانیا به یک نوع خاص از اکو سوندر مجهز شدند که قابلیت اندازه گیری بورد و مخابره اطلاعات در زیر دریا را داشت. در خلال جنگ جهانی اول(بین سال‌های ۱۹۱۴ تا ۱۹۱۸) نیاز برای آشکارسازی زیر دریایی‌ها تحقیقات بر روی صدا را بیشتر کرد. تا جایی که بریتانیا و فرانسه سیستم آزمایشی فعال خود را توسعه دادند. بریتانیا وسیله ای ابتدایی برای شنود، به نام هیدرو فون ساخت. در ۱۹۱۵ چند نفر بر روی ابزار صدایی فعال، برای تشخیص زیر دریایی کار میکردند. سال ۱۹۱۶ در انجمن اختراع و تحقیقات بریتانیا، برای بخش ضد زیر دریایی پرسنل نیروی دریایی محصولی آزمایشی از اولین وسیله آشکارساز صوت در زیر آب، با کریستال پیزوالکتریک^۳ را با نهایت پنهان کاری برای سال ۱۹۱۷ آماده می‌کردند. این وسیله ASDIC(Anti-Submarine Detection Investigation Committee) نام گرفت. در ۱۹۱۸، فرانسه و بریتانیا نسخه آزمایشی سیستم‌های فعالشان را ساخته و در سال ۱۹۲۰ به تولید رسانیدند.

با شروع جنگ جهانی دوم(۱۹۳۹ تا ۱۹۴۵) فن آوری ASDIC به صورت رایگان از بریتانیا به ایالات متحده منتقل شد، بازه تحقیقات گسترده تر شد، اولین sonobuoyها در سال ۱۹۴۴ توسط بریتانیا با اسم رمزهای High Tea, dipping/dunking and mine detection sonar توسعه یافتند. توسعه سونار در کشورهای متحدین، مخصوصا آلمان هم انجام می گرفت. بعد از جنگ جهانی دوم آمریکایی‌ها برای سیستم‌های خود واژه سونار را به کار بردند.

^۳ Piezoelectric

^۲ Echo sounder

^۱ Alexander Boehm

۱۸۷۳ کلارک ماکسول فیزیکدان اسکاتلندی تئوری الکترومغناطیس را ارائه نموده و وجود امواج الکترومغناطیسی را پیش بینی کرد. ۱۸۸۶ هرتز نشان داد امواج الکترومغناطیس می‌توانند از اجسام جامد منعکس شوند. الکساندر پاپو در ۱۸۹۵ با گیرنده Coherer وسیله ای برای تشخیص رعد برق‌های دور ساخت، سال بعد فرستنده شکاف جرقه را ساخت. سال ۱۸۹۷، وقتی روی تجهیزات مخابراتی بین دو کشتی کار می‌کرد، با عبور کشتی سوم، تداخل نبضی^۱ را مشاهده کرد، در نوشته‌هایش فقط آمده که این پدیده می‌تواند برای تشخیص اشیا استفاده شده و چیزی بیش از این در دیده‌هایش نبود. مخترع آلمانی هولز میر، اولین کسی بود که از امواج رادیویی برای تشخیص وجود اشیا فلزی در دور دست استفاده کرد. در ۱۹۰۴ توانست امکان پذیری آشکار سازی کشتی را در مه روشن نمود، گفته می‌شود به دلیل دیدن غم مادری که فرزند خود را در برخورد دو کشتی از دست داده بود، دست به این کار زد و در ۱۹۰۴ برای یک سیستم کامل رادار با نام Telemobilescope ثبت اختراع نمود. این سیستم با بازتابگر سهمی و آنتن هورن^۲ در طول موج ۵۰ سانتی کار می‌کرد، اگر چه سیستمش با مقامات نظامی آلمان در یک بندر آزمایش شد، اما آنها نپذیرفتند. در دهه ۱۹۲۰، تحقیقات انگلیس به رهبری رابرت واتسون وات، تکنیک‌های رادیویی پیشروی زیادی کردند. شامل کاوش کردن در آیاناسفر و تشخیص رعد و برق در فاصله دور. او به خاطر تجربه اش در آزمایشات رعد و برق، بر جهت یابی رادیویی تسلط داشت. او از یک تازه وارد به نام آرنولد فردریک ویکینز خواست تا یک گیرنده مناسب برای فرستنده‌های مایکروویو پیدا کند، او هم با سعی زیاد مدل گیرنده‌های عمومی اداره پست را انتخاب کرد، در نوشته‌هایش^۳، محو شدگی؛ را به هنگام عبور هواپیما ثبت کرده بود. در ۱۹۲۲ محققانی دوباره به اثر محو شدگی، هنگام عبور کشتی از پرتو مخابره کننده، اشاره کردند، اما هشت سال بعد؛ لارنس هایلند، مهندس برق آمریکایی، همین محو شدگی را برای هواگردها مشاهده نمود که منجر به ثبت اختراع کاربردی شد و این موضوعی برای کاری جدی بر سیگنال پژواک هدف‌های محرک در آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی دریایی آمریکا شد. آمریکا در ۱۹۳۵ برای هدایت نور افکن‌های گارد ساحلی ه اش رادار راهنما ساخت. رادار هوایی Chain Home را نیز تولید کرد که در سال ۱۹۳۹ و در جنگ جهانی دوم لبه شرقی اروپا را پوشش می‌داد (شکل ۲-۲ chain home and its coverage). در سال ۱۹۴۳، رادارها با تکنیک مونوپالس بهبود یافتند و برای سالها کاربرد داشتند.

در حالت کلی برای تشخیص اشیا، در ابتدا از آینه‌های صوتی^۴ (شکل ۱-۲ acoustic mirror) استفاده می‌شد، سپس موقعیت یابی صوتی^۵ (شکل ۳-۲ acoustic location) و بعد از آن رادار مورد استفاده قرار گرفت. شاید اولین استفاده از رادار و موقعیت یابی صوتی در کنترل نور افکن‌ها^۶ (شکل ۴-۲ searchlights) بوده.

^۱ Echo location

^۲ Searchlight

^۳ Fading

^۴ Coastal guard

^۵ Acoustic mirror

^۶ Interference beat

^۷ Horn

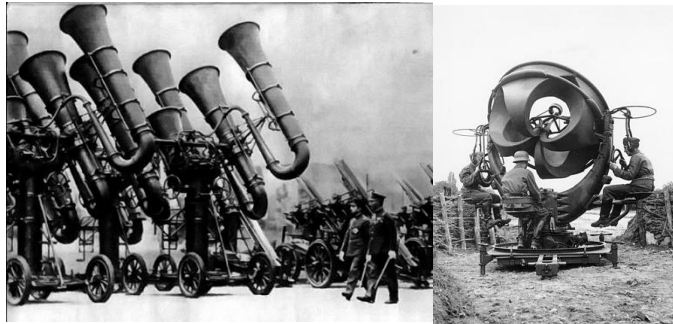
^۸ Instruction manual



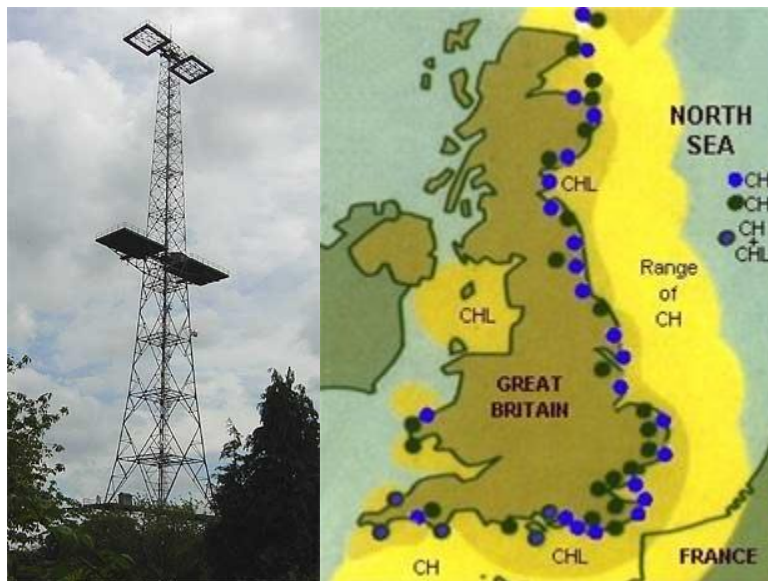
شكل ١-٢ acoustic mirror [4]



شكل ٤-٢ searchlights [5]



شكل ٣-٢ acoustic location [6]



شكل ٢-٢ chain home and its coverage [7] [8]

۲-۳- مدل سیگنال

اگر چه رادار سیگنالی خوش تعریف و کنترل شده را ارسال می کند اما سیگنال پژواک دریافتی در گیرنده حاصل جمع آثار عنصری هستند که هیچ کدام توسط طراح سیستم آنتن قابل کنترل نیستند؛ شامل هدف، درهم برهمی (Clutter)، نویز و در برخی موارد پارازیت. که هر کدام می توانند زیر بخش هم داشته باشند، مثلاً می توان درهم برهمی را به زمین و آب و هوا (مثل باران). پارازیت می تواند، فعال (فرستنده نویز) یا انفعالی (ابری از براده آهن) باشد. درهم برهمی (کلاتر) می تواند تداخل حساب شود یا چیزی باشد که دنباش هستیم، مثل زمانی که می خواهیم از سطح زمین عکس بگیریم. کارایی پردازش سیگنال با چند معیار شایستگی بررسی می شود، و با پردازش سیگنال این معیارها باید بهبود یابند، مثل احتمال آشکار سازی، سیگنال به نویز، یا دقت زاویه ای.

انرژی ارسال شده با پالسینگ روشن و خاموش است. مدولاسیون فاز هم برای نیاز به افزایش پهنای باند و بهبود رزولوشن در نظر گرفته شده. به طور کلی هر یک از پالس های ارسالی به شکل زیر اند:

$$\bar{x}(t) = \sin[2\pi F_t + \theta(t)] \quad (1-2)$$

از آنجا که شکل موج ارسالی معمولاً یک درصد فرکانس ارسالی بوده و در موارد خاصی ده درصد هم دیده شده. سیگنال ارسالی رادار را باریک باند در نظر می گیریم. از آنجا که سیگنال دریافتی پراکنده شده سیگنال ارسالی است آن را هم باریک باند در نظر می گیریم. سیگنال دریافتی پراکنده شده در فاصله $R_0 = ct_0/2$ بدین صورت می باشد:

$$\bar{y}(t) = k \cdot a(t - t_0) e^{j[2\pi F_t(t-t_0) + \theta(t-t_0) + \varphi(t)]} + n(t) \quad (2-2)$$

$n(t)$ نویز گیرنده، k فاکترواندازه پژواک با توجه به تلافات انتشار و بازتابندگی هدف، $\varphi(t)$ مدولاسیون فاز مربوط به اثر متقابل هدف.

طراحی یک الگوریتم خوب برای پردازش سیگنال نیازمند مدلی خوب برای سیگنالی است که قرار است پردازش شود.

۲-۳-۱- معادله برد راداری یک نقطه ساده

به این صورت محاسبه مس شود که توان در فضا به صورت کروی پخش شده، هدف هم مقداری از این توان را با توجه به سطح جذبش، جذب کرده و به صورت همه طرفه دوباره منتشر می کند. این که چه مقدار از توان ارسالی را بازتاب کند با مقدار σ تعیین می شود. این مقدار را سطح مقطع راداری یا RCS_r گویند. این معادله به صورت زیر است:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^2 R^4 L_s L_a(R)} \quad (3-2)$$

که L_S تلفات سیستم و $L_a(R)$ تلفات هوا کرده می باشد. همان طور که می بینید توان دریافتی را به پارامترهای اساسی سیستم رادار و پارامترهای هدف مرتبط نموده. این پارامترها عبارتند از: توان ارسالی، فرکانس کاری، بهره آنتن؛ سطح مقطع راداری؛ و فاصله.

فرض کنید راداری در باند ایکس (۱۰ گیگا هرتز) و با توان ارسالی هزار وات با پرتو باریک با عرض پرتو یک درجه کار میکند. فرض کنید پژواک از یک جت بزرگ با سطح مقطع راداری ۱۰۰ متر مربع و فاصله ۱۰ کیلومتر دریافت می شود. بهره آنتن ۴۴ دسی بل بدست خواهد آمد و اگر توان دریافتی را هم محاسبه کنید به عدد بسیار کوچک ۳,۰۷ نانو وات خواهید رسید، تقریباً ۱۲ مرتبه از توان ارسالی کمتر شده. با این که فاصله کم بوده و هدف بزرگ اما توان دریافتی فقط چند نانو وات بود. با این حال این مقدار توان برای اکثر موارد می تواند یک آشکار سازی مطمئن را امکان پذیر سازد.

۲-۳-۲- معادله برد توزیع شده

نمی توان تمام پراکنده سازها را به صورت بازتاب از یک نقطه مدل کرد. کلاتر زمین مثال خوبیست و بازتاب توزیع شده روی سطح می باشد. پدیده های هواشناسی مثل باران و تگرگ هم به صورت پراکنده ساز توزیع شده در سه بعد مدل می شوند.

اگر فرض کنیم پراکندگی به صورت توزیع سه بعدی، یکسان با مقدار η باشد؛ خواهیم داشت:

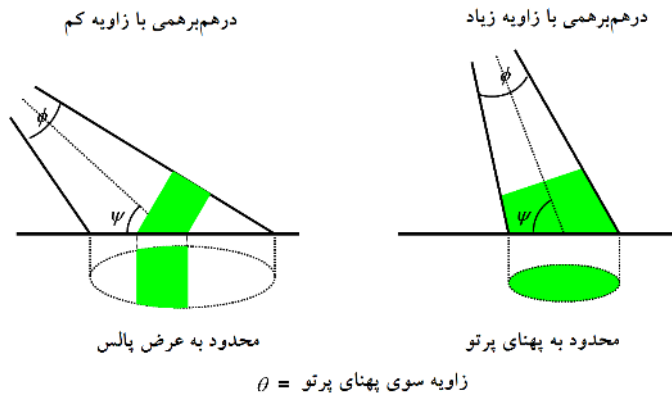
$$d\sigma = \eta dV = \eta R^2 ddRd\Omega \quad (۴-۲)$$

که $d\Omega$ زاویه فضایی دیفرانسیلی است. معادله به صورت زیر خواهد شد:

$$P_r(t_0) = \frac{P_t \lambda^2 \lambda}{(4\pi)^3 L_s} \int_{\Delta R, \Omega} \frac{P^2(\theta, \varphi)}{R^2(R)} dR d\Omega \quad (۵-۲)$$

این معادله برای حالات سه بعدی و سطحی به صورت عمومی است. و برای هر کدام انتگرال گیری انجام شده و معادله خاص خود به دست می آید. همچنین با توجه به این که رزولوشن برد سطح روشن شده را محدود کند یا سطح گلبرگ اصلی الگوی تشعشعی سطح را روشن کند، به این دو حالت به ترتیب محدود شده به پالس ۱ یا محدود شده به پرتو ۲ گویند (شکل ۲-۵). معادله با در نظر گرفتن هر یک متفاوت می شود.

در هواشناسی مثلا برای قطره‌های باران یا دانه‌های برف η را میانگین سطح مقطع راداری تک تک دانه‌ها قرار می‌دهند، η با تراکم برف و باران رابطه مستقیم داشته و برای هواشناسان کاربرد بیست.



شکل ۵-۲ شکل موج‌های محدود به پالس و پرتو [9]

۲-۳-۳ RCS و پلاریزاسیون

اگر فرض کنیم چگالی توان اطراف هدف Q_t و توانی که به صورت همه جهتی پراکنده شده، P_b باشد؛ سطح مقطع راداری یا σ به صورت زیر در می‌آید: (۲-۸)

$$P_b = \sigma Q_t \quad (۶-۲)$$

از آنجا که توان تابعی از میدان الکتریکی می‌باشد داریم:

$$\sigma \propto \frac{|E_b|^2}{|E_t|^2} \quad (۷-۲)$$

نویشن‌های b و t به ترتیب مخفف کلمات backscatter و transmit بوده که می‌توان بازتاب شده و ارسال شده معنایشان کرد. این فرمول فقط به اندازه میدان‌ها مرتبط شده ولی میدان‌ها می‌توانند ارتباط پیچیده‌ای به صورت زیر داشته باشند:

$$\begin{bmatrix} E_H^b \\ E_V^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^t \\ E_V^t \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} E_H^t \\ E_V^t \end{bmatrix} \quad (۸-۲)$$

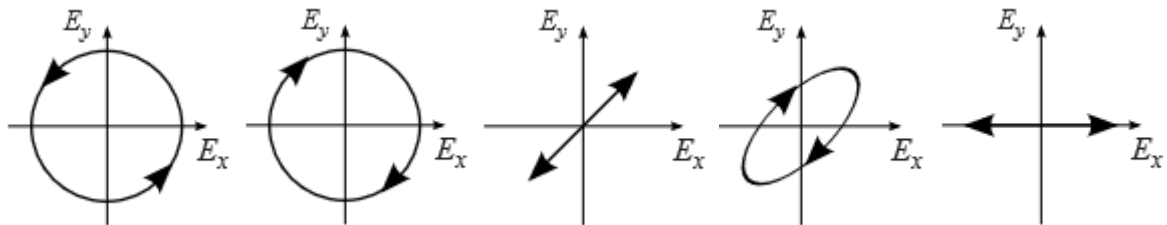
برای این که بتوانیم تاثیر پلاریزاسیون را به طور کامل در مدلمان در نظر بگیریم نیاز داریم تا سطح مقطع راداری یا σ را باید به ماتریس S (معادله ۲-۹) یا polarization scattering matrix (PSM) بسط داده شود. می‌توان رادار را طوری طراحی نموده تا توانایی تشخیص PSM مختلط را به طور کامل داشته باشد، یا فقط فقط اندازه‌های عناصر ماتریسش را محاسبه کند. محاسبه پلاریزاسیون در رادار می‌تواند اهداف مختلفی داشته باشد و نیاز به پردازش سیگنال پلاریمتریک و رادار پلاریمتریک دارد. در شکل ۲-۶ زیر انواع پلاریزاسیون‌های میدان‌های الکترومغناطیسی را مشاهده می‌نماییم:

۲-۳-۴ دید آماری به سطح مقطع راداری

حتی برای یک پراکنده ساز ساده، سطح مقطع راداری را نمی‌توان به سادگی به صورت یک عدد ثابت مدل کرد، چرا که RCS یک تابع پیچیده از زاویه دید، فرکانس و پلاریته می‌باشد. مثلا برای یک بازتابگر گوشه سه‌وجهی در شکل ۲-۸ به عنوان هدف کالیبره ساز برای اندازه گیری‌های میدان‌ها استفاده میشود. RCS این شکل با ریاضیات قابل محاسبه

بوده به فرکانس و زاویه دید، وابسته است. اما RCS یک یگ گوی هادی به زاویه دید بستگی ندارد و سطح مقطع راداری آن برای طول موج‌های بزرگتر از شعاع کرده برابر πa^2 است.

برای مثال، یک شکل دمبل مانند ساده که از دو گوی فلزی (دو نقطه بازتابگر) تشکیل شده را در نظر بگیرید، پس از محاسبه سطح مقطع راداری آن که به سادگی محاسبه می‌شود، به شکل ۹-۲. **Error! Reference source not found.**



شکل ۶-۲ انواع پلاریزاسیون‌های خطی، دایروی و بیضوی [10]

در می‌آید؛ همان گونه که می‌بینید با این که ساختار دمبل، ساختار ساده‌ای است اما σ آن دارای گلبه‌های زیادی شده است. اگر تعداد زیادی بازتابگر در نقاط مختلف داشته باشیم، فرمول کلی زیر را خواهیم داشت:

$$\bar{y}(t) = e^{j2\pi Ft} \sum_{i=1}^N \sqrt{\sigma_i} e^{-j4\pi R_i(\theta)/\lambda} \quad (9-2)$$

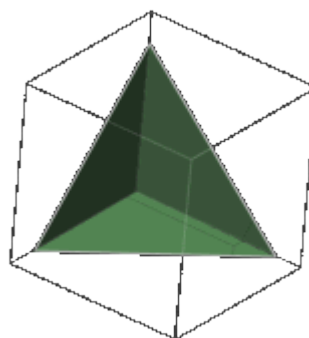
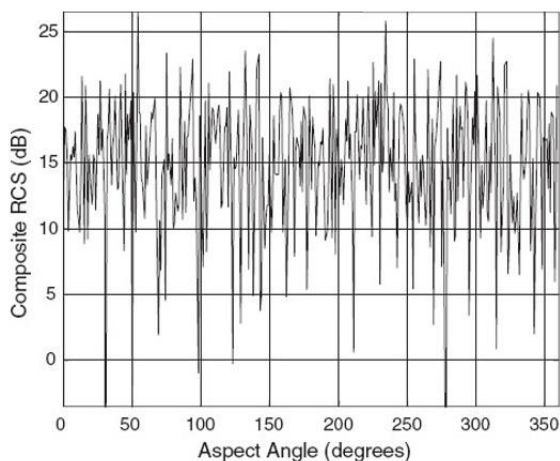
$$\zeta = |\bar{y}(t)|, \quad \sigma = \zeta^2 \quad (10-2)$$

حالا اگر ۵۰ تا از این پراکنده سازها را به صورت تصادفی را در ۵۰ متر مربع پخش کنیم و از فاصله ده کیلومتری با فرکانس ده گیگا هرتز و دقت دو دهم درجه، با فرض $\sigma_i = 1$ خواهیم داشت: (شکل ۷-۲)

همان طور که می بینید شکل ۷-۲ نشان می دهد RCS نسبت به تغییرات زاویه دید و فرکانس بسیار پیچیده و با حساسیت بالاست. به همین جهت از توصیف آماری RCS استفاده می می کنیم. σ را در سلول رزولوشن، یک متغیر تصادفی با PDF خاصی در نظر می گیریم. معمولاً برای محاسبه معادله برد از میانگین یا میانه RCS استفاده می شود. اما برای محاسبات احتمالات آشکارسازی نیاز به PDF کاملشان را خواهیم داشت.

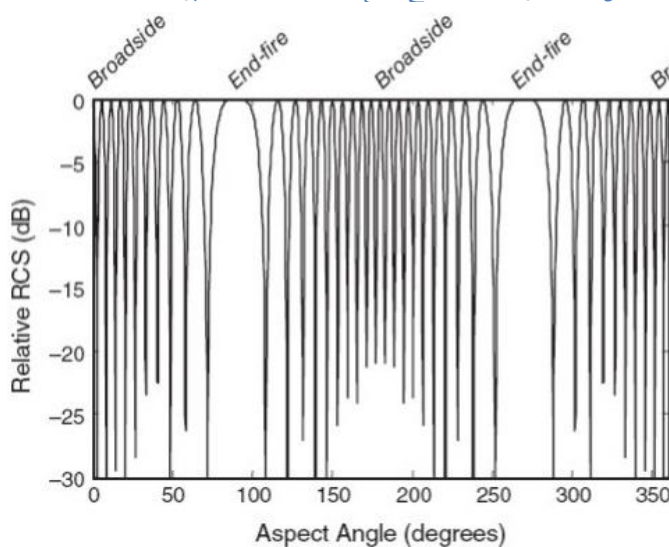
با فرض داشتن چندین پراکنده ساز همسان داشته باشیم، می توان فرض کرد فاز بین صفر تا دو پی به صورت یکسان توزیع شده چون حساسیت به برد خیلی زیاد هست. با این شرایط قضیه حد مرکزی ضمانت می کند که قسمت های حقیقی و موهومی پژواک را می توان به صورت متغیر تصادفی گوسی با متوسط صفر، مستقل و با واریانس های همسان α^2 در نظر گرفت. در این صورت مربع اندازه σ ، PDF نمایی خواهد داشت:

$$p_{\sigma}(\sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \exp\left[-\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}\right] & \sigma \geq 0 \\ 0 & \sigma < 0 \end{cases} \quad (11-2)$$

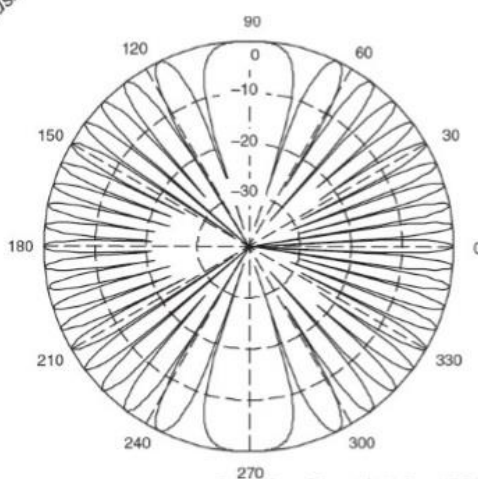


شکل ۸-۲ - پس بازتابگر گوشه ای [11]

شکل ۷-۲ تغییرات شدید سطح مقطع راداری تعداد زیادی پراکنده ساز [1]



RCS دکارتی



RCS قطبی

شکل ۹-۲ تغییرات سطح مقطع راداری ساختار دمبل مانند [1]

که $\bar{\sigma} = 2\alpha^2$ مقدار میانگین RCS است. و χ توزیع ریلی^۱ دارد که از جنس ولتاژ و σ از جنس توان است. چگالی احتمال σ برای حالتی که تعداد زیادی پراکنده ساز به علاوه یک پراکنده ساز غالب داشته باشیم به صورت چی-اسکور^۲ در خواهد آمد.

چندین مدل مشهور آماری برای سطح مقطع راداری وجود دارد نوع یک پارامتری (فقط نیازمند میانگین) که همین دو توزیع گذشته می‌باشند، به علاوه توزیع‌های دیگری وجود دارند که دو متغیره بوده و این متغیرها در طراحی الگوریتم‌های خودکار تشخیص دهنده مهم هستند.

همان طور که مشاهده شد، RCS یک هدف پیچیده با فرکانس ارسالی و زاویه دید تغییر می‌کند. مشخصه مهم دیگر هدف‌ها فاصله دیکورولیشن^۳ در زمان، فرکانس و زاویه است. یعنی فاصله ای در زمان، فرکانس یا زاویه، که برای دیکورولیت شدن اندازه پژواک تا حد خاصی مورد نیاز می‌باشد. برای یک شی ثابت برد و زاویه دید می‌تواند دیکورولیشن ایجاد کند، اگر کلاتری هم توسط رادار روشن شده باشد، حتی اگر این پارامترها تغییر نکنند باز هم می‌توانیم دیکورولیشن داشته باشیم، به دلایلی همچون امواج، حرکت برگ‌ها و شاخه‌ها یا وزش باد با سرعت‌های مختلف، که به اینها حرکات داخلی^۴ گویند.

اگر چه رفتار هدف‌های واقعی هدف‌ها واقعا پیچیده است ولی با استدلالی ساده می‌توان تخمینی برای دوره ناهمبستگی پراکنده کننده‌ها بدست آورد. با یادگیری اصول آشکارسازی خواهید فهمید که وقتی اندازه گیری‌های پشت سر هم، ناهمبسته باشند در بعضی موارد به بهبود کارایی آشکار سازی کمک می‌کند. به همین دلیل بعضی از بعضی رادارها از فن آوری چابکی فرکانسی استفاده می‌کنند تا اندازه گیری‌ها را به اجبار دیکورولیت کنند.

۲-۳-۵- مدل سورلینگ

این مدل که توسط پیتر سورلینگ مهندس الکترونیک و ریاضی دان آمریکایی معرفی شد، چهار یا پنج حالت دارد که در لیست شده اند. بدنه نظریه تشخیص^۶ بر پایه این چهار مدل سطح مقطع راداری شکل گرفته اند. (جدول ۱-۲ مدل سورلینگ)

جدول ۱-۲ مدل سورلینگ [1]

تابع چگالی احتمال سطح مقطع راداری	همبستگی نمونه‌های متحد شده به صورت غیر همدوست ناهمبسته	همبسته
ریلی / نمایی	سورلینگ دو	سورلینگ یک
چی-اسکور، درجه چهار	سورلینگ چهار	سورلینگ سه

^۵ Peter Swerling

^۲ Decorrelation interval

^۱ Rayleigh

^۶ Detection

^۴ Internal decorrelation

^۲ Chi-square

به هدف‌های نا متغییر، مدل سورلینگ صفر یا پنج می‌گویند. همچنین تابع احتمالش فرمول (۱۲-۲) بوده و آن را مارکوم^۱ هم، می‌خوانند:

$$p_{\sigma}(\sigma) = \delta_D(\sigma - \bar{\sigma}) \quad (12-2)$$

$$var(\sigma) = 0$$

۲-۳-۶- مدل کلاتر

پژواک کلاتر و هدف تفاوت خود را در PDF، همبستگی‌های مکانی و زمانی، مشخصه‌های دوپلری، سطح توان نشان می‌دهند. کلاتر دو تفاوت عمده با نویز دارند: طیف توانش سفید نیست (تداخلی همبسته است) و از آنجا که کلاتر پژواک سیگنال ارسالی خودمان است، توانش به پارامترهای رادار مثل: توان ارسالی، بهره آنتن و فاصله از رادار بستگی دارد. در صورتی که نویز به پارامترهای رادار بستگی ندارد و به نویز فیگور^۲ پهنای باند گیرنده بستگی دارد.

بازتابندگی کلاتر سطح با میانه یا میانگینش σ^0 ، PDF تغییرات بازتابندگی و همبستگی مکانی یا زمانیش مشخص می‌شود. مقدار σ^0 شدیداً تابع حالت و نوع زمین (زبری سطح و رطوبت)، آب‌وهوا (سرعت و جهت وزش باد، بارش)، میزان درگیری با هندسه (زاویه برخورد) و پارامترهای رادار (طول موج و پلاریته) است. مهم آن است که بتوانیم σ^0 را بر حسب این پارامترها بیان کنیم. طی گذشت سال‌ها و جمع‌آوری اطلاعات پیرامون σ^0 ، داده‌ها را جدول بندی و رفتارشان را مدل کرده‌اند.

از آنجا که در بسیاری از موقعیت‌ها، تداخل کننده‌ی غالب، به جای نویز، کلاتر است. نیاز داریم تا نسبت سیگنال به تداخل یا SCR^۳ را بدانیم. می‌توان با تقسیم فرمول (۲-۳) بر فرمول (۲-۵) این مقدار را بدست آورد.

همبستگی زمانی کلاتر به دلیل حرکات داخلی رخ می‌دهد. تحقیقات مختلفی برای تعیین مشخصه دیکورولیشن پژواک کلاتر بر حسب حرکات داخلی انجام شده و آنرا به صورت تجربی به دست آورده، مدل کردند. البته باید بدانیم در واقع با به دست آوردن مشخصه دیکورولیشن به مشخصه‌های طیف توان دست پیدا می‌کنیم. یکی از این مدل‌ها، مدل مربعی است، که طیف توان سطح مقطع راداری دخت‌های برگ دار یا باران را تخمین می‌زند. دیکورولیشن کمتر یعنی پهنای باند بیشتر، و دکورولیشن کمتر شباهت کلاتر را به نویز سفید بیشتر می‌کند، که باعث کاهش عملکرد بعضی تکنیک‌های حذف کلوتر می‌شود. مدل گوسی برای رادارهای آب و هوایی استفاده می‌شود. که البته هر دو مدل ذکر شده با مدل Autoregressive (AR) درجه پایین، تظابق دارند. کلاترهای اندازه‌گیری شده توسط رادارهای زمینی را می‌توان با حداکثر درجه چهار مدل AR تخمین زد اما برای رادارهای هوابرد ممکن است تا درجه ده هم استفاده شود. مزیت مدل AR این است که می‌توان پارامتر هایش را مسقیماً با داده‌های اندازه‌گیری شده تعیین کرد و به صورت بی‌درنگ آنها را با الگوریتم Levinson-Dorbin یا الگوریتم‌های مشابه تغییر داد. پارامترهای AR را می‌توان در فیلترهای حذف کلاتر تطبیقی استفاده کرد. اما عیبش این است که با افزایش درجه مدل، محاسبات به سرعت سنگین می‌شوند.

^۳ Signal to Clutter Ratio

^۲ Noise figure

^۱ Marcum

کارایی آشکارسازی رادار شدیداً به مدل RCS هدف یا کلاتر وابسته است. می‌دانیم تغییرات ویژگی‌های آماری RCS با فاکتورهای هندسه، رزولوشن، طول موج و پلاریته تغییر میکند. همین دلایل یک زمینه فعال برای تحقیقات عملی و آنالیزی را برای توسعه مدل‌های آماری مناسب RCS فراهم ساخته‌اند.

بعضی PDF ها با توجه به فیزیک ساختار بازتاب کننده‌ها بدست آمده‌اند، مثل: ریلی (که از قضیه حد مرکزی منتج شده است) و مدل رایسی (که همان ریلی است ولی با پراکنده سازهای غالب بیشتر از یک عدد) دیگر مدل‌ها مثل Weibull و Log-normal به صورت تجربی و با تطبیق دادن توزیع‌ها بر روی داده‌ها بدست آمده‌اند. برای تطبیق دادن این مدل‌های تجربی با فیزیک ساختارهای واقعی پراکنده‌سازها شده است. نتیجه این بوده که PDFهای تک متغیره را کنار گذاشته و فرض کنند متغیر تصادفی که اندازه پژواک را توصیف می‌کند از ضرب دو متغیر دیگر بدست آمده است، و می‌توان آنها را با توجه به فرمول بیض بدست آورد. این PDF بیشتر برای توصیف کلاتر دریا استفاده می‌شود. توانسته بین فیزیک و مدل‌های تجربی ارتباط برقرار کند.

$$2-3-7 = \text{مدل نویز و سیگنال به نویز}$$

به طور کلی دو نوع نویز داریم: نویزی که از طریق آنتن و از منبع خارجی دریافت شده باشد، و نویزی که توسط گیرنده رادار تولید شده باشد.

نویز خارجی تابع جهت آنتن است. منبع اصلی آن هم خورشید است. اگر آنتن به سمت آسمان شب باشد، و تداخلی با منابع ریزموج‌ها هم نداشته باشد، منبع اصلی نویز خارجی نویز کهکشانی^۱ خواهد شد.

منابع نویزهای داخلی عبارتند از: نویز حرارتی (نویز جانسون هم خوانده می‌شود) ناشی از تلفات اهمی، نویز ضربه‌ای^۲ و نویز Partition به خاطر ذات کوانتومی جریان الکتریکی، نویز سوسویبی^۳ و ذره^۴ به خاطر تاثیرات کمبود سطحی در وسیله‌های هادی و نیمه هادی.

نویز غالب، نویز حرارتی است. نظریه‌های مکانیک کوانتومی و آمار، فرآیند تصادفی گوسی با میانگین صفر را برای نویز تصادفی در مدارهای الکتریکی دیکته می‌کنند. میانگین انرژی این فرآیند $kT/2$ ژول است که T دمای کلوین بوده و k ثابت بولتزمن است. به صورت تقریبی می‌توان فرض کرد نویز حرارتی، نویزی با طیف سفید می‌باشد.

$$S_n(F) = kT W/Hz \quad (2-13)$$

در کانال‌های I و Q چگالی طیف توان نویز $\frac{kT}{2}$ W/Hz خواهد بود، و اندازه سیگنال مختلط I + Q توزیع رالی و توان دو این سیگنال توزیع نمایی خواهد داشت.

اگر پهنای باند گیرنده از پهنای باند سیگنال ارسالی کمتر باشد، انرژی از دست خواهد رفت و حساسیت کم می‌شود. اگر پهنای باندش بیشتر از پهنای باند سیگنال باشد، سیگنال در معرض نویز بیشتری قرار خواهد گرفت، در نتیجه باز

^۱ Partition noise

^۲ Shot noise

^۳ Flicker noise

^۴ Galactic (also called cosmic) noise

هم حساسیت کاهش خواهد یافت. همچنین نمونه برداری گیرنده طوری طراحی می شود تا نویز نمونه ها ناهمبسته باشند.

به T دمای نویز گویند، که میزان توان نویز در دسترس سیگنال یا منبع نویز را نشان می دهد. برای تعریف میزان نویز سیستم ها از $Noise\ figure\ (NF)$ استفاده می شود. NF را در معادله (۱۴-۲) می بینید.

$$F_n = \frac{KT_0\beta_n G_s + KTe\beta_n G_s}{KT_0\beta_n G_s} = \frac{N}{KT_0\beta_n G_s} \quad (14-2)$$

T_0 دمای استاندارد، β_n پهنای باند معادل نویز، N توان نویز خروجی از سیستم است. نهایتاً چیزی که روی کارایی آشکار سازی تأثیر می گذارد، SNR است، نه صرفاً خود توان دریافتی. فرمول SNR معادله (۱۵-۲) است.

$$x = \frac{P}{N} \quad (15-2)$$

N با فرمول (۱۴-۲) محاسبه شده و P فرمول (۳-۲) است.

۲-۳-۸- مدل فرکانسی: جابجایی دوپلر

وقتی جسم و رادار سرعت نسبی داشته باشند، فرکانس سیگنال دریافتی با فرکانس سیگنال ارسالی یکسان نخواهند بود. از جابجایی دوپلر می توان استفاده های مفیدی مثل: آشکار سازی پژواک هدف با حضور بسیار بیشتر پژواک کلاتر و افزایش قابل توجه رزولوشن عمود بر برد، کرد. تغییرات جبران سازی نشده دوپلری می تواند تأثیرات نامطلوبی مثل از دست دادن حساسیت با بعضی از شکل موج ها داشته باشد. بنابر این مشخصه و اندازه گیری های جابجایی دوپلر موضوع مهمی در رادار است.

با وجود سرعت نسبی، طول، اندازه، میزان تأخیر، فاز و فرکانس پالس ارسالی تغییر می کند. تغییر طول و اندازه خیلی کم هستند و باطبع مقدار تغییر فرکانسی هم خیلی زیاد نیست. برای اندازه گیری میزان تغییر فرکانس از فاز و تاریخچه آنها استفاده می شود. به این معنا که نمی توان تغییر فرکانس را از تغییر پالس به پالس اندازه گیری نمود، مگر این که طول پالس ارسالی خیلی بلند باشد، که معمولاً این کار را نمی کنند، هر چند در موارد نادر و خاص با همین پالس های بلند سرعت را اندازه گیری می کنند. برای اندازه گیری فرکانس دوپلر پالس ها را تجمیع می کنند^۲، سپس با DFT فرکانس را محاسبه می کنند. پردازش دوپلر پیچیده تر از چیزیست که به نظر می آید. خود پردازش دوپلر یک فصل است.

۳- جمع بندی

فصل یک مقدمه ای بر پردازش سیگنال رادار بود. در فصل دو با فیزیک سیستم های رادار و سونار آشنا شدیم. اجزای سازنده هر یک، و اصطلاحات مورد نیاز برای درک بهتر مفاهیم را معرفی کردیم. تاریخچه رادار و سونار آشنا شدیم، دیدیم پیشرفت هر دو با جنگ های جهانی شتاب یافتند. استفاده عملی از سونار قبل از رادار بوده. و شاید دلیلش این است که معادلات حاکم بر امواج الکترومغناطیس پیچیده تر از معادلات حاکم بر امواج مکانیکی بوده و امواج مکانیکی

^۲ Pulse integration

^۱ Cross-range resolution

حسی تر می باشند. در نهایت مدل سیگنال‌هایی که در رادار استفاده می‌شود را از کتاب *Fundamental of radar signal processing* نوشته آقای Mark A. Richard بیان کردیم. در واقع این فصل سطحی ترین بخش، و آشنایی کلی با پردازش سیگنال رادار است. فصل‌های بعد از مدل سیگنال عبارتند از: جمع آوری داده در رادار پالسی، شکل موج رادار، پردازش دوپلر و مبانی آشکار سازی، سه فصل بعد مباحث تعمیمی و پیشرفته تر بر مبنای این اصول می‌باشند.

این کتاب بر پایه رادارهای پالسی گرد آوری شده، و به رادارهای موج پیوسته کاری نداشته است. به گفته نویسنده، رادارهای پالسی بسیار دقیق بوده و در رادارهای امروزی کاربرد زیادی دارند. اما از آنجا که رادارهای موج پیوسته موج را به صورت بی‌وقفه می‌فرستند، همزمان به دو آنتن برای دریافت و ارسال سیگنال نیاز دارند. و اگر چه سرعت را به راحتی از طریق فرکانس دوپلر محاسبه می‌کنند، اما نمی‌توانند در حالت عادی فاصله را اندازه گیری کنند، چرا که موجی با فرکانس خالص، نشان‌هایی برای اندازه گیری زمان ندارد، برای ایجاد این نشانه‌ها از مدولاسیون استفاده می‌کنند، که شایع ترین روش مدولاسیون در رادارهای موج پیوسته مدولاسیون FM یا LFM می‌باشد. با این حال رادارهای موج پیوسته بسیار ارزان تر و به صرفه تر از رادارهای پالسی هستند، چرا که توان ارسالی حداکثر با توان ارسالی متوسط برابر است. بنابراین نسبت رادارهای پالسی می‌توان کمتری را ارسال کرد که ما را از تقویت کننده‌های میکروویو بی‌نیاز ساخته و با استفاده از تقویت کننده‌های حالت جامد اندازه و قیمت رادار افت می‌کند، می‌توان از آنتن‌های ارزان قیمت پچ^۱ نیز استفاده کرد. با تکنولوژی حال حاضر می‌توان رادار موج پیوسته‌ای به اندازه کف دست ساخت، امروزه این رادار را در ماشین‌ها برای کروز کنترل یا سیستم ضد برخورد، و در صنعت، مثلا کنترل سطح سیلو مشاهده کرد.

^۱ Patch antenna

- [1] A. Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing, Georgia: McGraw-Hill, 2014.
- [2] IEEE free course. [online]. <http://aess.cs.unh.edu/radar%20se%20List%20of%20Lectures%20.html>.
- [3] Radar Basics - Physical fundamentals of the radar principle. [online]. <http://www.radartutorial.eu/01.basics/Physical%20fundamentals%20of%20the%20radar%20principle.en.html>
- [4] wikipedia - Acoustic mirror. [online]. https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_mirror
- [5] wikipedia - Searchlight. [online]. <https://en.wikipedia.org/wiki/searchlight>
- [6] wikipedia - Acoustic location. [online]. https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_location
- [7] Radar (Radio Direction Finding). [online]. <http://www.battleofbritain1940.net/document-12.html>
- [8] wikipedia - Radar. [online]. <https://en.wikipedia.org/wiki/radar>
- [9] wikipedia - Clutter. [online]. <https://en.wikipedia.org/wiki/clutter>
- [10] wikipedia - Polarization. [online]. <https://en.wikipedia.org/wiki/polarization>
- [11] Radar Basics - Corner reflector [online]. <http://www.radartutorial.en/17.bauteile/bt47.tr.html>