

سامانه لیدار^۱ و کاربردهای آن در عملیات دریایی

افراسیاب فدوی^۲

چکیده:

نیروی دریایی یک نیروی تجهیزات محور و تخصص محور است. نیروی دریایی راهبردی به تجهیزات خاص نیاز دارد.

امروزه عملیات دریایی بر محور عملیات زیرسطحی می‌چرخد. در این راستا طراحان عملیات دریایی و سازه‌های زیرسطحی به دنبال راه‌هایی هستند، که توسط حساسه‌های صوتی طرف مقابل (دشمن) مورد کشف و شناسایی قرار نگیرند. این فرایند دوطرفه همیشه در جریان است. یکی از فناوری‌هایی که قابلیت تشخیص زیر دریا را بدون استفاده از امواج صوتی دارد، سامانه لیدار می‌باشد. اساس کار لیدار و رادار مشابه بوده و تفاوت این دو در طول موج‌های مورد استفاده آن‌ها است، در حالی که رادار از امواج رادیویی با طول موج‌هایی در حد سانتی‌متر استفاده می‌نماید، لیدار از طول موج‌های نوری که توسط لیزرها فراهم می‌شوند، بهره می‌برد. یکی دیگر از تفاوت‌های عمده رادار و لیدار این است که لیدار قادر به اندازه‌گیری در تمام شرایط آب و هوایی نمی‌باشد. امروزه از این فناوری در اقیانوس‌نگاری و تحقیقات اقیانوس‌شناسی مانند بررسی عمق آب در نقاط مختلف، تعیین آلاینده‌های موجود در آب و همچنین تصویربرداری از اجسام غوطه‌ور در آب استفاده می‌شود. کاربردهای نظامی این سامانه در تهیه نقشه‌های توپوگرافی با دقت بالا، در هیدروگرافی برای اندازه‌گیری عمق آب‌های سطحی و ارتفاع زمین‌های اطراف سواحل و قابل ذکر است، این سامانه تنها سامانه‌ای است که می‌تواند در یک عملیات نقشه‌برداری هر دو اطلاعات هیدروگرافی و توپوگرافی را جمع‌آوری کند و در عملیات ضدزیردریایی جهت شناسایی و تصویربرداری از زیر دریایی‌های دشمن از این سامانه استفاده و در هواشناسی برای اندازه‌گیری توده‌های شیمیایی از قبیل لایه ازن، بخار آب و آلودگی‌ها در اتمسفر نیز بهره‌برداری می‌گردد. به‌علاوه از این سامانه در جنگل‌داری، توسعه شهری و اکتشاف نفت استفاده شده است.

کلید واژگان: لیدار، لیزر، توپوگرافی، هیدروگرافی، نقشه‌برداری، موقعیت‌یاب جهانی.

1 - LIDAR: Light Detection and Ranging

۲- کارشناس ارشد مدیریت دفاعی و رئیس کمیته فرماندهی و ستاد گات دریایی

مقدمه:

امروزه افزایش چالش‌ها بسیار فراتر از روبرو شدن با دشمنان بالقوه که به سلاح‌های مدرن دسترسی دارند، است. بخش‌های تجزیه و تحلیل امور نظامی روند این تغییرات را بررسی می‌نمایند، که آیا رشته‌های اخیر نظامی و فناوری‌های در حال ظهور در ترکیب، سازمان و تغییرات عملیاتی، پیشرفت‌های چشم‌گیری در اثربخشی نظامی که به آن انقلاب در امور نظامی می‌گویند به وجود خواهد آورد؟

مهم‌ترین اصل در عملیات ضدزیردریایی، کشف یگان زیرسطحی است. سامانه‌های کشف زیردریایی به دو گروه صوتی و غیرصوتی تقسیم‌بندی می‌شوند. سامانه‌های صوتی با انتشار صوت نسبت به کشف و شناسایی هدف مورد نظر اقدام می‌کنند. از معروف‌ترین آنها می‌توان به سونارها و بویه‌های سوناری (سونوبوی) اشاره کرد.

سامانه‌های غیرصوتی کشف زیردریایی که در انواع یگان‌های پروازی قابل نصب هستند با استفاده از طبیعت کره زمین (مغناطیس) و یا دانش جدید (لیزر) نسبت به کشف و شناسایی هدف مورد نظر اقدام می‌کنند. از معروف‌ترین این سامانه‌ها می‌توان به سامانه کشف دود، لیدار، سامانه پشتیبانی الکترونیکی و سامانه تشخیص تغییرات میدان مغناطیسی اشاره نمود. (طحانی، ۱۳۸۹ص ۲۴) با پیشرفت و توسعه فناوری، ابزارهای مختلفی به منظور کسب اطلاعات از سطح زمین به کار گرفته می‌شود. استفاده از عکس‌های هوایی توسط دوربین‌های نصب شده در هواپیما منجر به پیدایش علم فتوگرامتری شد. در این روش با عکس‌برداری از منطقه‌ای با پوشش‌های مناسب و فرآیند تصحیح تصاویر، نقشه سه‌بعدی منطقه تهیه می‌شود. پس از آن با پیدایش فناوری ماهواره‌ها، تصویربرداری از سطح زمین آغاز شد و علم سنجش از دور پدید آمد، که به صورت فعال و غیرفعال به کسب اطلاعات از زمین پرداخت. (آقایی، جعفری، ۱۳۸۶ص ۳۲)

امروزه سامانه‌های فعال که در آن سنجنده به‌عنوان مولد موج الکترومغناطیس، محدوده مشخصی از طول موج را به سمت هدف ارسال نموده و بازگشت امواج را ثبت می‌نمایند، عرصه جدیدی را به وجود آورده است که اطلاعات متنوعی را ارائه می‌دهند. به‌طور کلی در تصویربرداری اپتیکی (نوری) فقط اطلاعات مربوط به دامنه ثبت، اما توسط سنجنده‌های فعال که رادار و لیدار از آن دسته‌اند، اطلاعات بیشتری ثبت می‌گردند.

۹۹..... فصلنامه علوم و فنون نظامی، سال هفتم، شماره ۱۷، تابستان ۱۳۸۹

داده‌های مکانی نقش مهمی در تفسیر ما از محیط پیرامون بازی می‌کنند. فرآیند جمع‌آوری داده‌های توپوگرافی باروش‌های نقشه‌برداری زمینی تا فتوگرامتری فضایی و سنجش از دور و تکنیک جمع‌آوری داده در سال‌های اخیر با استفاده از سامانه لیدار که لیزر اسکنر هوایی^۱ نامیده می‌شود، تحولی عظیم را در صحنه عملیات ایجاد نموده است. سامانه لیدار از سال ۱۹۷۰ میلادی توسعه یافت و قادر است به‌طور سه‌بعدی و تمام اتوماتیک اشیاء را از فضا، هوا، کشتی یا ایستگاه‌های زمینی اندازه‌گیری نماید. لیدار داده‌ها را از اولین سطحی که پرتو لیزر با آن برخورد می‌کند، جمع‌آوری و مدل رقومی سطح^۲ حاصل، نمایش دهنده ارتفاع سطحی است که ترکیبی از سطح زمین لخت^۳ و عوارض روی زمین می‌باشد. سامانه لیدار، اطلاعات سه‌بعدی رقومی مربوط به شکل زمین، شامل تعیین ساختار سطح قائم، ارتفاع عوارض روی زمین، درختان، بوته‌ها و ساختمان‌ها و روشنایی که عوارض سطحی تولید می‌کند را تهیه می‌نماید. در واقع، فناوری لیدار ابزار مکملی جهت اخذ اطلاعات سه‌بعدی در کنار فتوگرامتری فضایی و سنجش از دور است. لیدار یک سامانه فعال است و انواع هوایی آن قادر به ایجاد ابرنقاط با تراکم بالا (یک نقطه در متر مربع یا بالاتر) و با دقت نسبتاً خوب ۵۲ تا ۵۱ سانتی‌متر در ارتفاع ۳۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر در سطح برای ارتفاع پرواز کمتر از ۲ کیلومتر از سطح زمین) در مدت زمان نسبتاً کوتاهی می‌باشد. امتیازات این سامانه، شامل قابلیت استفاده در شب و روز، قابلیت نفوذ در جنگل و پوشش‌های گیاهی مختلف و جمع‌آوری سریع اطلاعات از زمین و دریا در سطح وسیع به‌صورت رقومی است. اکنون سامانه لیدار برای تهیه نقشه توپوگرافی، نقشه جنگل‌ها، دریاها، زمین‌های مسطح، نقشه راه‌ها، دالان‌ها، خطوط ریلی، خطوط نیرو و مدل سازی شهری، فضاها شهری، ارتباطات بی‌سیم و محاسبات کارهای مهندسی، مدیریت نواحی ساحلی و کشف و استخراج نفت استفاده می‌شود.

۱- لیدار چیست؟

لیدار که مخفف عبارت آشکارسازی نوری و بردیابی است، یک نوع دورحسی نوری از نوع فعال می‌باشد، که در آن با استفاده از لیزر پالسی، پالس‌هایی به درون محیط تزریق، آن‌گاه نور پس

-
- 1 - Airborne laser scanner
 - 2 - Digital surface model
 - 3 - Bare-earth

سامانه لیدار و کاربردهای آن در عملیات دریایی..... ۱۰۰

پراکنده شده و با تأخیر زمانی معین توسط سامانه آشکارساز لیدار، آشکار می‌گردد. این سامانه با ارسال پالس‌های لیزری به سمت هدف، زمان بازگشت پالس به سمت گیرنده را اندازه‌گیری و با توجه به سرعت نور، فاصله هدف را محاسبه می‌کند. لیدار یا سامانه فاصله‌یاب و کشف لیزری یک سامانه سنجش از دور است، که به منظور جمع‌آوری اطلاعات توپوگرافی استفاده می‌گردد. بر این اساس، تکنیک لیدار شباهت بسیار زیادی به تکنیک رادار دارد. به این دلیل به رادار لیزری نیز مشهور است. تفاوت این دو را می‌توان در طول موج‌های مورد استفاده آن‌ها جستجو کرد. در حالی که رادار از امواج رادیویی با طول موج‌هایی در حد سانتی‌متر استفاده می‌نماید، لیدار از طول موج‌های نوری که توسط لیزرها فراهم می‌شوند، بهره می‌برد. این سامانه با سامانه‌های موقعیت‌یاب جهانی و اندازه‌گیری اینرشیاال یکپارچه و در یگان‌های پروازی نصب می‌شود. حساسه‌های لیدار، اطلاعات نقاطی که به طور مرتب توسط سامانه موقعیت‌یاب جهانی ثبت می‌گردد را جمع‌آوری، پردازش و تجزیه و تحلیل می‌کنند. سپس این اطلاعات به صورت طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ثبت و به صورت مدل ارتفاع دیجیتال نمایش داده می‌شود. اطلاعاتی که توسط سامانه لیدار جمع‌آوری می‌گردد، به صورت مختصات سه بعدی X, Y, Z است. اطلاعات لیدار قابل تلفیق با اطلاعات تصاویر هوایی بوده و با مقایسه این تصاویر می‌توان خصوصیات زمین و دریا را به سادگی شناسایی کرد. (آقایی، جعفری، ۱۳۸۶ ص ۳۲)

۲- اجزای لیدار:

به طور کلی یک سامانه لیدار از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

الف) فرستنده

ب) گیرنده

ج) آشکارساز

۳- نحوه عمل کرد سامانه لیدار:

لیدار یک فناوری شبیه به رادار است که با ارسال موج لیزر به سمت عارضه و دریافت آن، با ثبت شدت موج برگشتی و اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت موج، تصویر عارضه را ثبت و فاصله را محاسبه می‌نماید.

۱۰۱..... فصلنامه علوم و فنون نظامی، سال هفتم، شماره ۱۷، تابستان ۱۳۸۹
در سامانه لیدار که به نام‌های رادار لیزری، رادار نوری^۱ و ALMS^۲ بیان می‌گردد، از فرکانس‌های نوری استفاده می‌شود. این فناوری قادر است فاصله بین سنجنده تا شیء یا یک سطح را توسط پالس‌های لیزر اندازه‌گیری نماید. سامانه رادار با استفاده از امواج رادیویی و با اندازه‌گیری زمان ارسال موج تا دریافت موج، فاصله را محاسبه می‌کند، اما سامانه لیدار از نور یا لیزر استفاده می‌نماید. تفاوت اصلی لیدار و رادار در طول موج‌های مورد استفاده می‌باشد. در لیدار از طول موج‌های بسیار کوچک که به نوعی در محدوده ماوراء بنفش، مرئی یا مادون قرمز نزدیک است، استفاده شده اما در رادار از امواج با طول موج‌های بلند در محدوده ماکروویو استفاده می‌شود. لازم به ذکر است طول موج‌های به کار گرفته شده در لیدار حدوداً ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ برابر کوچک‌تر از طول موج‌های سامانه رادار است.

در لیدار ممکن است موج پیوسته^۳ یا پالس^۴ به صورت متمرکز یا به صورت پرتوهای موازی استفاده شود. امواج پیوسته در لیدار هنگامی استفاده می‌شود که فواصل کوتاه و پریودهای طولانی مورد نظر باشد. از لیزر به صورت پالس در مواردی استفاده می‌شود که از توان بسیار بالاتری در طول کار استفاده شود. بنابراین نسبت سیگنال به نویز بیشتر است، در سامانه‌های لیدار برای اندازه‌گیری فواصل دور معمولاً از پالس استفاده می‌شود.

لیدار ممکن است دارای یک فرستنده و یک گیرنده به صورت جداگانه باشد^۵ یا دارای یک بخش بوده که در آن ارسال و دریافت امواج صورت می‌گیرد.^۶ (شکل ۱) این سامانه به دلایل زیر در اندازه‌گیری علمی ترجیح داده می‌شود:

(۱) امتداد گذاری و نشانه روی، هر دو در یک مسیر قرار می‌گیرند.

(۲) ارسال و دریافت داده‌ها از یک محل صورت می‌گیرد.

(۳) فقط یک دستگاه وجود دارد.

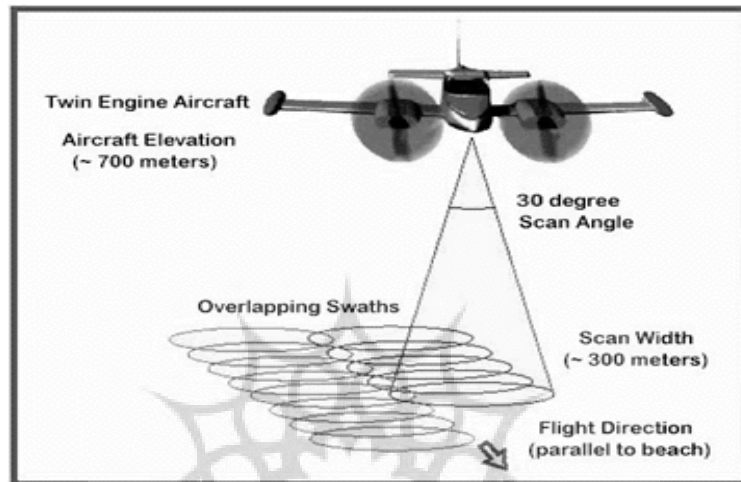
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
رتال جامع علوم انسانی

-
- 1 - Optical Radar
 - 2 - Airborne Laser Swath Mapping
 - 3 - Continuous wave
 - 4 - Pulse
 - 5 - Bi static
 - 6 - Mono static

سامانه لیدار و کاربردهای آن در عملیات دریایی ۱۰۲
در برخی از سامانه‌های لیدار به نام CLR^1 علاوه بر اطلاعات دامنه و زمان، اطلاعات فاز^۲ نیز ثبت می‌شود.

به‌طور کلی سه نوع سامانه لیدار وجود دارد:

الف) لیدار فاصله‌یاب^۳: از ساده‌ترین نوع لیدار است. این نوع لیدار برای اندازه‌گیری فاصله بین لیدار تا عارضه خاص استفاده می‌شود. (آقایی، جعفری، ۱۳۸۶ ص ۳۲).



شکل (۱) نحوه عمل کرد سامانه نصب شده در هواپیما^۴

ب) $DIAL^5$: از این سامانه لیدار برای اندازه‌گیری توده‌های شیمیایی از قبیل لایه ازن، بخار آب و آلودگی‌ها در اتمسفر استفاده می‌شود. یک $DIAL$ از دو طول موج متفاوت لیزر استفاده می‌کند و به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که یکی از طول موج‌ها توسط مولکول‌های مورد نظر جذب شده و دیگری عبور می‌کند. از طریق اختلاف بین مقادیر سیگنال‌های بازگشتی دو طول موج می‌توان به وجود مولکول‌های مورد نظر در اتمسفر پی برد.

-
- 1 - Coherent Laser Radar
 - 2 - Phase
 - 3 - Range Finder LIDAR
 - 4 - <http://www.csc.noaa.gov/products/sccoasts/html/tutlid.htm>
 - 5- Differential Absorption LIDAR

۱۰۳..... فصلنامه علوم و فنون نظامی، سال هفتم، شماره ۱۷، تابستان ۱۳۸۹
ب) لیدار داپلر^۱: این سامانه به منظور اندازه گیری سرعت یک هدف، مورد استفاده قرار می گیرد. هنگامی که نور از سمت این سامانه به عارضه ای که در حال دور شدن یا نزدیک شدن به سامانه لیدار می باشد، ارسال گردد، طول موج نور بازتابی از هدف تغییر می کند، این پدیده به عنوان پدیده جابه جایی داپلر شناخته شده است، به همین علت این سامانه به نام لیدار داپلر خوانده می شود. هنگامی که هدف در حال دور شدن از سامانه لیدار باشد، نور بازگشتی طول موج بلندتری خواهد داشت. در حالی که اگر هدف به سمت لیدار در حال نزدیک شدن باشد، طول موج کوتاه تری به سنجنده می رسد. از این سامانه می توان برای تعیین سرعت اجسام مختلف استفاده کرد. همچنین می توان با استفاده از این سامانه سرعت باد را از طریق اندازه گیری سرعت ذرات معلق در هوا اندازه گیری نمود.

۴- قواعد لیدار:

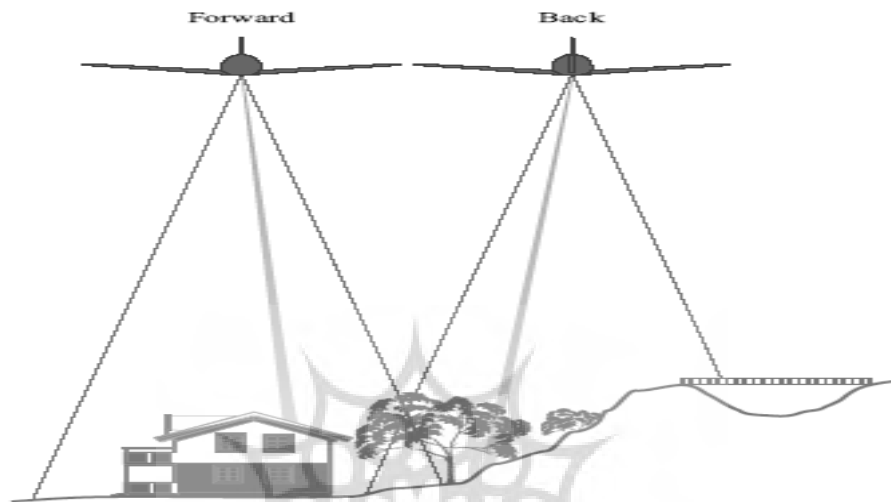
سامانه لیدار اسکن های زیادی را از سطح زمین و دریا با استفاده از چند خط پرواز به دست آورده و سپس اسکن ها به یکدیگر متصل شده تا یک مدل گسسته از زمین و دریا به دست آید. معمولاً اجزاء یک سامانه لیدار همگی بر روی یک سطح^۲ هوایی و در موارد خاص روی یک پلت فرم فضایی سوار می شوند. داده های لیدار خصوصیات خاص خود را دارند، ابری از نقاط در فضای سه بعدی و با داده های به دست آمده از روش های معمول فتوگرامتری فضایی و سنجش از دور پدید می آید. (Baltsavias, 1999, :83-94)

در یک سامانه لیدار، زمان بازگشت یک پالس لیزر محاسبه می شود تا فاصله نقطه گسیل بر روی پلت فرم هوایی از سطح زمین به دست آید. زمان رفت و برگشت پالس به وسیله آنالیز الکترونیکی نوع موج پالس برگشتی محاسبه می شود، سپس فاصله از نقطه گسیل پالس تا سطح زمین با ضرب سرعت نور در نصف زمان رفت و برگشت بدست می آید. آرایه اندازه گیری فاصله، از نوع خطی، اسکن نامیده می شود. (شکل ۲) فاصله و موقعیت گسیل های پالس و وضعیت خط دید در سامانه لیدار مشخص است، لذا موقعیت نقاط روی سطح زمین در یک قالب سه بعدی قابل تعیین خواهند بود و فواصل بین نقاط بستگی به نرخ اندازه گیری، زاویه اسکن، ارتفاع از سطح زمین و سرعت پلت فرم فضایی دارد. چون عوارض روی زمین در

1 -Doppler LIDAR
2- platform

سامانه لیدار و کاربردهای آن در عملیات دریایی..... ۱۰۴

ترکیب مواد و ارتفاع متفاوت می‌باشند، قدرت سیگنال پالس برگشتی (پژواک پالس گسیل شده) نیز ضبط می‌شود و امکان دریافت چندین انعکاس از یک پالس وجود دارد. سیگنال لیزری در زمان ارسال به سمت زمین ممکن است با اشیاء مختلفی (پوشش گیاهی) برخورد کند و قسمتی از سیگنال ارسال شده، به سمت گیرنده منعکس شود و توسط آن ثبت و بخشی دیگر به سطح زمین برخورد و بازتاب آن توسط گیرنده ثبت شود. (صادقیان، ولدان زوج، ۱۳۸۷ ص ۳۴)



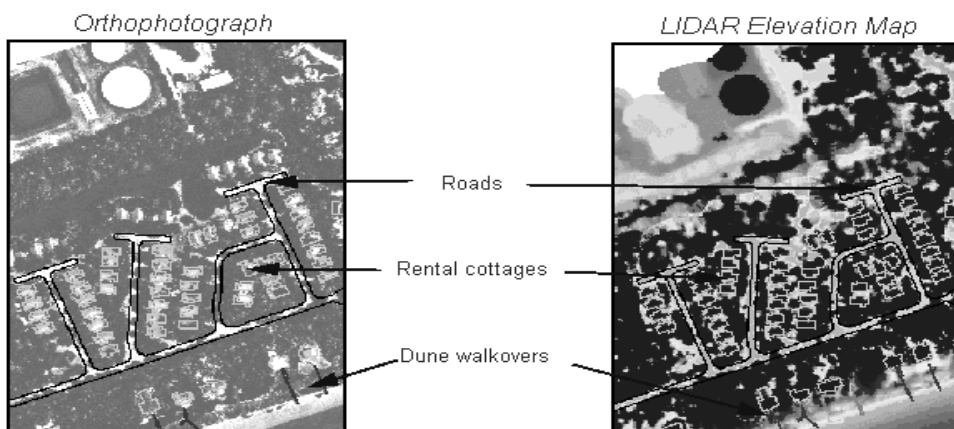
شکل ۲- برداشت اطلاعات از زمین توسط سامانه لیدار نوع هوایی

(در این روش سطح زمین به صورت نواری اسکن می‌شود و ابری از نقاط با استفاده از ترکیب اسکن‌ها تشکیل می‌گردد)

اولین پالس منعکس شده حاوی اطلاعاتی راجع به پوشش گیاهی روی زمین بوده که در تولید اورتوفوتوگراف^۱ (شکل ۳) و کاربردهای جنگل‌داری و تعیین پوشش گیاهی استفاده می‌شوند و پالس برگشتی دوم برای اندازه‌گیری زمین لخت^۲ استفاده می‌شود.

1 -Orthophotograph
2 -Bare-earth

Kiawah Island, South Carolina



شکل ۳- مقایسه تصویر برداشت شده توسط سامانه لیدار و روش ارتوفوتوگرافی
بر گرفته از: <http://www.csc.noaa.gov/products/sccoasts/html/tutlid.htm>

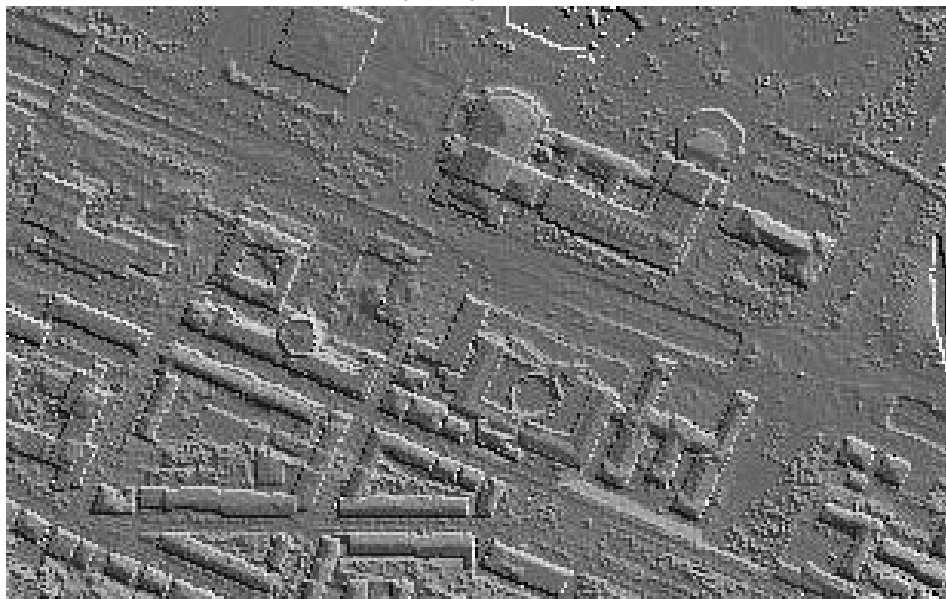
علاوه بر این دو بازگشت، ممکن است سیگنال لیزر به عوارض دیگری در بین این دو مسیر برخورد نماید و انعکاس آن توسط سنجنده ثبت شود. سامانه‌های امروزی قابلیت ثبت حداقل دو انعکاس مختلف برای هر سیگنال ارسال شده را دارند، که معمولاً به این انعکاس‌ها پالس اولیه^۱ و پالس ثانویه^۲ گفته می‌شود. این ویژگی سامانه‌های لیدار را از سامانه‌های معمول فتوگرامتری^۳ فضایی متمایز می‌کند، چرا که در مناطق پوشیده از گیاه علاوه بر مدل رقومی سطح منطقه، می‌توان به کمک پالس ثانویه، بسته به تراکم پوشش گیاهی، بخش زیادی از سطح زمین را نیز نمونه‌برداری نمود. اطلاعاتی که توسط سامانه لیدار جمع‌آوری می‌گردد، به صورت مختصات سه بعدی X, Y, Z بوده، اگر چه امکان تعیین موقعیت مسطحاتی و ارتفاعی عوارض با دقت قابل قبولی امکان‌پذیر است، ولی این داده‌ها هیچگونه اطلاعاتی در مورد بافت و خصوصیات رادیومتریکی عوارض ارائه نمی‌کنند. به این ترتیب، داده‌های ثبت شده حاوی اطلاعات هندسی و ساختاری سطح خواهند بود، در سال‌های اخیر دو روش عمده به منظور افزودن قابلیت اندازه‌گیری اطلاعات رادیومتریک عوارض به داده‌های معمول ارتفاعی لیدار مورد استفاده قرار

-
- 1 - First pulse
 - 2 - Last pulse
 - 3 - Photo-grametry

سامانه لیدار و کاربردهای آن در عملیات دریایی..... ۱۰۶
گرفته است. یکی از این روش‌ها، ثبت قدرت سیگنال بازگشتی و دیگری استفاده از یک دوربین دیجیتال جهت تصویربرداری هم‌زمان با نمونه‌برداری سامانه اسکن لیزری است.

(Baltsavias, 1999, :83-94)

همان‌گونه که از نوع موج برگشتی برای اندازه‌گیری زمان بازگشت یک پالس استفاده می‌شود، اکثر سامانه‌ها از این مورد برای اندازه‌گیری قدرت پالس برگشتی نیز استفاده می‌کنند. با ثبت قدرت سیگنال بازگشتی، علاوه بر اطلاعات هندسی، بخشی از خواص رادیومتریکی عوارض موجود در منطقه نیز ثبت خواهد شد. داده‌های سامانه لیدار شدت درجات خاکستری اشیاء را ثبت نمی‌کنند، بلکه این داده‌ها نشان‌دهنده قدرت لیزر دریافت شده توسط سنجنده هستند. مواد موجود بر روی سطح زمین خصوصیات طیفی متفاوتی دارند و به همین دلیل امکان بدست آوردن یک تصویر با قدرت تفکیک پایین از قدرت پالس برگشتی وجود دارد، عوارضی که لیزر را به نحو مشابهی منعکس می‌نمایند، در این تصاویر، دارای درجات خاکستری یکسان خواهند بود، در صورت یکسان بودن سایر شرایط فیزیکی به عنوان مثال، آسفالت سقف ساختمان‌ها و آسفالت راه‌ها دارای انعکاس مشابهی بوده و در تصاویر داده‌های لیدار، به یک صورت ثبت می‌شوند. به این ترتیب قابلیت این داده‌ها جهت استفاده در روند تشخیص و جداسازی اشیاء به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد. تشعشع استفاده شده در لیدار در محدوده مادون قرمز از طیف الکترومغناطیس است. بنابراین موادی مانند گیاه، روشن به نظر می‌رسند، زمین و آسفالت تیره به نظر می‌آیند، در آب‌های عمیق تشعشع جذب می‌شود، البته در کنار داده‌های هندسی لیدار می‌توان از دوربین رقومی برای تصویربرداری استفاده کرد و از داده‌های آن برای استخراج بافت و خصوصیات رادیومتریکی عوارض استفاده نمود، وقتی همه اسکن‌ها به هم پیوسته شدند ابری از نقاط در یک قالب مرجع سه‌بعدی بدست می‌آید. (شکل ۴) مهم‌ترین خصوصیت قابل ذکر ابر نقاط لیدار این است که بزرگ و حجیم هستند و اغلب شامل میلیون‌ها نقطه می‌باشند. (صادقیان، ولدان زوج، ۱۳۸۷ ص ۳۵)



شکل (۴) تصویر به دست آمده از ابر نقاط

۵- تهیه مدل سه بعدی با استفاده از تکنیک لیدار:

یکی از کاربردهای مهم لیدار که امروزه در بخش‌های نقشه‌برداری هوایی و دریایی در بسیاری از کشورها استفاده می‌شود، تهیه و تولید مدل ارتفاعی رقومی دقیق (DEM) با دقت در حد ۱۰ سانتی‌متر و تهیه مدل سه بعدی از سطح زمین می‌باشد. یک سامانه لیدار شامل قسمت‌های زیر است:

۱- یک سامانه اسکن کننده که پالس لیزر را تولید کرده و امواج بازگشتی از سطح زمین را ثبت می‌کند.

۲- یک سامانه موقعیت یاب جهانی نصب شده در هواپیما به منظور ثبت موقعیت سنجنده.

۳- یک واحد اندازه گیری اینرشیال^۱ به منظور اندازه گیری وضعیت سنجنده^۲.

۴- یک ایستگاه سامانه موقعیت یاب جهانی دقیق مستقر در سطح زمین به منظور استفاده از روش تفاضلی برای تعیین موقعیت دقیق^۳.

1 -IMU

2 -Attitude

3- DGPS: Differential GPS

سامانه لیدار و کاربردهای آن در عملیات دریایی..... ۱۰۸

سامانه نوری بخش اسکن کننده، پالس لیزری را با ۷۵۰۰۰ پالس در هر ثانیه و در جهت عمود بر مسیر حرکت سنجنده به سمت زمین ارسال کرده و نقاط زمینی را در فواصل ۰/۵ تا ۴ متری برداشت می کند که در واقع همان توان تفکیک مکانی سنجنده می باشد. فواصل نقاط برداشته شده بسته به سرعت سنجنده متغیر خواهد بود. با کاهش سرعت سنجنده فواصل برداشته شده، کمتر شده لذا توان تفکیک مکانی بهبود می یابد.

با اندازه گیری دقیق زمان رفت و برگشت لیزر و با معلوم بودن سرعت نور، فاصله لیدار تا نقطه زمینی مطابق رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$d = c.t/2$$

t زمان رفت و برگشت و C سرعت نور خواهد بود.

دقت تعیین فاصله لیدار به عوامل زیر بستگی دارد: (آقایی، جعفری، ۱۳۸۶، ص ۳۳)

۱- ارتفاع پرواز که بر روی شدت موج بازگشتی تأثیر گذار است.

۲- دقت دستگاه لیدار و سامانه پردازش کننده.

۳- صحت و دقت موقعیت سنجنده، ارتفاع و داده های وضعیت سنجنده.

۴- مشخصات عارضه (اندازه گیری های دقیق تر می تواند از سطوح جامد و سخت حاصل شود).

سامانه موقعیت یاب جهانی نصب شده در هواپیما به منظور تعیین موقعیت X، Y، Z سنجنده استفاده می شود. همچنین میزان وضعیت سنجنده حول سه محور X، Y، Z توسط یک سامانه اندازه گیری اینرشیال که شامل شتاب سنج و جایروسکوپ^۱ می باشد اندازه گیری می شوند. به منظور افزایش دقت تعیین موقعیت سنجنده، می توان از یک سامانه موقعیت یاب جهانی زمینی نیز استفاده و به روش تفاضلی موقعیت دقیق سنجنده را تعیین کرد. لذا با معلوم بودن مختصات دقیق سنجنده و فاصله بین سنجنده تا هر نقطه می توان مختصات سه بعدی هر نقطه در روی زمین را تعیین و نقشه توپوگرافی سطح زمین را به دست آورد.

(<http://www.csc.noaa.gov/crs/rsapps/sensors/lidar.htm>)

یکی از تفاوت های عمده رادار و لیدار این است که لیدار قادر به اندازه گیری در تمام شرایط آب و هوایی نمی باشد، زیرا به دلیل کوچک بودن طول موج های لیزر، ذرات با قطر کوچک از قبیل ذرات باران، ابر و گرد و غبار، به عنوان یک مانع در برابر این امواج قرار می گیرند. اما در سامانه های رادار به دلیل استفاده از طول موج های بلند، این مشکل بوجود نمی آید. لازم به ذکر

۱۰۹..... فصلنامه علوم و فنون نظامی، سال هفتم، شماره ۱۷، تابستان ۱۳۸۹
است لیدار قادر است در شب و روز اطلاعات کسب نماید. در سال‌های اخیر در کنار سامانه لیدار از دوربین‌های رقومی نیز استفاده می‌شود. پس پردازش‌های انجام شده بر روی داده‌های لیدار شامل موارد زیر می‌باشند:

۱- استفاده از داده‌های موقعیت‌یاب جهانی زمینی به منظور زمین مرجع نمودن داده‌ها.
۲- فیلتر نمودن داده‌ها به منظور جدا کردن داده‌های عوارض مختلف سطح زمین که باعث بازگشت‌های متفاوت یک پالس به سنجنده می‌شوند. (آقایی، جعفری، ۱۳۸۶ ص ۳۳)
با توجه به این که یک پالس لیزر ممکن است به چند عارضه برخورد کرده و بازگشت آن در زمان‌های متفاوت به سنجنده برسد، نیاز به یک سری پس‌پردازش^۱ می‌باشد تا بتوان پالس‌های بازگشتی متفاوت را از هم جدا نمود، که این عمل توسط الگوریتم‌های مختلفی که به منظور فیلتر کردن وجود دارد انجام می‌شود. به عنوان مثال یک لیزر ممکن است به عوارض یا بخش‌های مختلف برخورد کرده و بازگشت امواج آنها با ترتیب خاصی و در زمان‌های مجزا به سنجنده برسند، با جدا کردن این سیگنال‌های دریافتی می‌توان بخش‌های مختلف را از هم تمیز داد.

۶- محدودیت‌های سامانه لیدار:

(۱) در مناطقی که پوشش گیاهی فشرده و وسیع بوده، اطلاعات بدست آمده توسط سامانه لیدار (ارتفاع و فاصله) با مقدار واقعی آن از زمین دارای خطا است.
(۲) دقت اطلاعات کسب شده توسط سامانه لیدار به دقت سامانه موقعیت‌یاب جهانی و اندازه‌گیری اینرشیال بستگی داشته زیرا در مواقعی که هواپیما پیچ^۲ و رول^۳ دارد، توسط سامانه اندازه‌گیری اینرشیال این خطا تصحیح می‌گردد.
(۳) سامانه لیدار از امواج مادون قرمز نزدیک^۴ استفاده می‌کند، سطوح خاص مانند آب، آسفالت و قیر، ابر و مه این امواج را جذب و بازتاب این اجسام کم است.
(۴) اندازه فایل‌های اطلاعات سامانه لیدار بسیار بزرگ است.
(<http://www.csc.noaa.gov/crs/rsapps/sensors/lidar.htm>)

1 - Post processing
2 - Pitch
3 - Roll
4 - Near Infra Red

۷- کاربردهای سامانه لیدار:

علاوه بر تهیه مدل سه بعدی زمین این سامانه کاربردهای متعددی دارد. از جمله می توان به

موارد زیر اشاره کرد:

- (۱) تهیه نقشه های زیربنایی شهر
- (۲) جنگل داری
- (۳) هیدروگرافی
- (۴) مطالعات اتمسفری
- (۵) تولید محصولات سه بعدی و شبیه سازی پرواز
- (۶) کاربردهای نظامی
- (۷) بررسی تغییرات کوچک ارتفاعی در سطح زمین

۸- کاربرد در هیدروگرافی:

لیدار ابزار ایده آلی برای اندازه گیری عمق آب های سطحی و ارتفاع زمین های اطراف سواحل بوده و تنها سامانه ای است که می تواند در یک عملیات نقشه برداری هر دو اطلاعات هیدروگرافی و توپوگرافی را جمع آوری کند. لیدار هیدروگرافی اندازه گیری های سریع و مترکم از نواحی ساحلی، تعیین میزان حجم کانال های کم عمق، اندازه گیری حرکات شن های کنار سواحل، تهیه نقشه تپه های مرجانی، نقشه های دریایی، تعیین پیوستگی های بین تغییرات عمق سنجی در فواصل دور از ساحل، آشکارسازی شکل خطوط ساحلی، کمک به پروژه های لوله گذاری و کابل کشی، نمایش پویایی رسوبات، پیش بینی میزان ذوب شدن برف ها از دیگر ویژگی های این سامانه است.

سیل و مسائل همراه آن به دلیل میزان خسارتی که به محیط اطراف وارد می آورد مورد توجه بسیاری از کشورها است. از مهم ترین پارامترها در مطالعه هیدرولیک، دشت های سیلابی و جهت جاری شدن آب است، لیدار این امکان را فراهم می آورد که بتوان سطح را بازسازی نموده و زوایای شیب را محاسبه کرد، که این مورد کمک شایانی به محاسبه سریع، آسان و دقیق جهت جریان آب می کند. موضوع مهم دیگر تغییرات اطلاعات حاشیه رودخانه ها و جابه جایی آن در طول زمان است، که با روش های فتوگرامتری و سنسجش از دور بسیار زمان بر و پرهزینه خواهد بود، در مقابل، لیدار راه حل سریع و بهینه را با کیفیت مطلوب ارائه می کند، به-

۱۱۱..... فصلنامه علوم و فنون نظامی، سال هفتم، شماره ۱۷، تابستان ۱۳۸۹
دلیل طبیعت داده‌های لیدار که در آن عوارض را نمی‌توان به سادگی تشخیص داد (در مقایسه با داده‌های تصویری) نیاز به توسعه روش‌های مستحکم و کارآمد پردازش تصویر به جهت تفسیر و بازسازی سطح عوارض مربوطه از داده‌های لیدار است که در تحقیقات کنونی لیدار و الگوریتم‌های ارائه شده کمبود آن احساس می‌شود. (Zwally, schutz, 2002: 405-445)

۹- کاربرد سامانه لیدار جهت عملیات در جنگل:

از این سامانه در حفظ محیط زیست و جنگل‌داری نیز استفاده می‌شود، ارزیابی ترکیب و ساختار جنگل از فواصل دور بسیار مشکل است اما برای کمک به مدیریت جنگل نمایش اطلاعات مهم و ضروری می‌باشد. فناوری لیدار ابزار جدیدی برای جمع‌آوری و به‌کارگیری چنین اطلاعاتی است، به‌خصوص جهت انجام عملیات در جنگل توسط نیروهای عملیات ویژه اندازه‌گیری ارتفاع درختان اهمیت فوق‌العاده‌ای دارند، آنالیز ساختار موجود در تصاویر هوایی که از ترکیب داده‌های لیدار با داده‌های رقومی و تصاویر فتوگرامتری با دقت بالا بدست می‌آید امکان تفسیر لایه‌های مختلف گیاه، درخت، تراکم، درجه اختلال و سایر پارامترهای جنگل را با اعتماد بالا فراهم می‌آورد. یکی از کاربردهای آن در جنگل‌داری، استخراج مدل رقومی زمین^۱ DSM^۲ و DTM^۲ است که سامانه لیدار می‌تواند خصوصیات پوشش گیاهی جنگل را به صورت سه بعدی تهیه کند. (<http://lidar.usgs.gov/index.php>)

۱۰- تفاوت‌های لیدار هیدروگرافی و لیدار توپوگرافی:

- ۱- لیدار هیدروگرافی از دو بیم لیزری و لیدار توپوگرافی از یک بیم لیزری استفاده می‌کند.
- ۲- لیدار هیدروگرافی برای اندازه‌گیری عمق آب، از طول موج قرمز برای سطح آب و از طول موج آبی و سبز برای نفوذ در آب، اما لیدار توپوگرافی برای شناسایی اغلب اجسام از امواج مادون قرمز استفاده می‌کند.
- ۳- لیدار هیدروگرافی از فرکانس ۴۰۰ هرتز و لیدار توپوگرافی از فرکانس ۳۰۰۰۰ هرتز استفاده می‌کند.

1 -Digital Surface Model
2- Digital Terrain Model

سامانه لیدار و کاربردهای آن در عملیات دریایی..... ۱۱۲

۴- لیدار هیدروگرافی نیاز به قدرت بالا دارد، اما لیدار توپوگرافی با یک هواپیما یا بالگرد کوچک نیز قادر به انجام عملیات است.

به طور مثال یکی از کاربردهای مهم لیدار هیدروگرافی در اندازه گیری عمق آب است، که دقت این اندازه گیری بستگی به تیرگی یا شفاف بودن آب دارد.

(www.Ambercore.com, a white paper on lidar mapping:2)

۱۱- کاربرد در عملیات دریایی:

امروزه عملیات دریایی بر محور عملیات زیرسطحی می چرخد. در این راستا طراحان عملیات دریایی و سازه های زیرسطحی به دنبال راه هایی هستند که توسط ردیاب های صوتی طرف مقابل (دشمن) مورد کشف و شناسایی قرار نگیرند. این فرایند دوطرفه همیشه در جریان است. یکی از فناوری های که قابلیت تشخیص زیر دریا را بدون استفاده از امواج صوتی دارد، سامانه لیدار می باشد.

زیردریایی ها قادرند حدود سه چهارم سطح کره زمین را بدون آنکه توسط دشمن آشکار شوند، پیمایند؛ در حالی که زیردریایی ها معمولاً در صورت انتشار کوچک ترین اختلالی از قبیل گرمایی، الکترومغناطیسی، هیدرودینامیکی و بخصوص اکوستیکی آشکارسازی می شوند. انتشارات اکوستیکی، به لحاظ آشکارسازی اهمیت زیادی دارند؛ زیرا با سرعت بالا و در مسافت های طولانی منتشر می شوند و در فواصل طولانی قابل آشکارسازی^۱ و طبقه بندی^۲ می باشند. مخفی بودن اکوستیکی زیردریایی، بالاترین امتیاز به شمار می آید و به این دلیل تلاش های مستمری صورت می گیرد تا زیردریایی ها امروزه بدون کوچکترین علامت، بسیار ساکت^۳ و با قابلیت های بالا ساخته شوند. عوامل مختلفی وجود دارند که به این تلاش ها دامن می زنند که در زیر به چند مورد اشاره می شود:

اول، از زیردریایی های امروزی انتظار می رود که در آب های کم عمق و نزدیک سواحل حرکت نمایند. محل هایی مثل خلیج فارس، به گونه ای هستند که زمان حضور زیردریایی را در نزدیکی

1 - Detection
2 - Classification
3 - Quiet

۱۱۳..... فصلنامه علوم و فنون نظامی، سال هفتم، شماره ۱۷، تابستان ۱۳۸۹
دشمن افزایش می دهند. مأموریت در این محل ها از لحاظ اکوستیکی بسیار مشکل تر از گشت زنی
در آب های عمیق اقیانوس ها می باشد.

دوم، امروزه پردازش سیگنالی و فناوری حساسه ها با سرعت فزاینده ای در حال پیشرفت است.
تغییرات و پیشرفت های به دست آمده در زمینه محاسبات و ارتباطات، امکان پردازش و نمایش
حجم زیادی از اطلاعات حساسه ها را در یک کپسول ریز فراهم ساخته است. سامانه های چند
حساسه می توانند با ترکیب اطلاعات گوناگون برای آشکارسازی و دنبال کردن اهداف ساکت به-
کار روند. سامانه های سوناری DT^۱ برای آشکارسازی و ردیابی زیردریایی های دشمن از
حساسه های ناوهای سطحی، هویما، صدایاب زیر آبی^۲ و دیگر تجهیزات بهره می گیرند. سامانه های
سوناری DT یک سامانه سوناری فعال پیشرفته چند حساسه فرکانس پایین می باشد، که
زیردریایی های دشمن را آشکارسازی می کند. ترکیب اطلاعات مختلف از حساسه های گوناگون
باعث بهبود کارایی سامانه می شود.

بنابراین سامانه لیدار مناسب ترین ابزار جهت شناسایی زیردریایی در آب های کم عمق می باشد.

۱۲- کاربرد لیدار در اقیانوس شناسی و موانع موجود در این زمینه:

از لیدار در تحقیقات اقیانوس شناسی مانند بررسی عمق آب در نقاط مختلف، تعیین آلاینده های
موجود در آب و همچنین تصویربرداری از اجسام غوطه ور در آب می توان استفاده کرد. سامانه
لیداری که برای کارهای عمق سنجی استفاده می شود بر پایه برهم کنش، پراکندگی و جذب پرتو
نوری با حجم آب بنا نهاده شده است. در مورد تصویربرداری از اجسام زیر آب این عوامل نه
تنها کمک چندانی به فرایند تصویربرداری نمی کنند، بلکه خود نیز به عنوان یک مشکل اساسی
ظاهر می شوند. به عبارت دیگر مسأله اصلی که در مورد تصویربرداری زیر آب وجود دارد، مسأله
جذب و پراکندگی نور در محیط های آبی است. افزایش اطلاعات در زمینه پارامترهای مربوط به
میزان جذب و پراکندگی یا به عبارت دیگر خواص اپتیکی آب، توانایی سامانه در افزایش قدرت
تصویربرداری را افزایش می دهد. به همین دلیل مطالعات زیادی در زمینه خواص اپتیکی آب و
بررسی تابع گسترش نقطه ای (PSF)^۳ و رابطه آن با تابع گسترش (BSF)^۴ صورت گرفته

-
- 1 - Distant Thunder
 - 2 - Sonobuoys
 - 3- Point Spread Function
 - 4 -Beam Spread Function

سامانه لیدار و کاربردهای آن در عملیات دریایی ۱۱۴
است. در حالت کلی خواص اپتیکی آب را می توان به دو دسته تقسیم کرد: ظاهری و ذاتی.

خواص اپتیکی ذاتی (IOPs)^۱ ویژگی هایی هستند که تنها به محیط وابسته هستند و مستقل از میدان نوری محیط پس زمینه هستند. دو نمونه اساسی از خواص اپتیکی ذاتی عبارتند از ضریب جذب و تابع پراکندگی حجمی. از دیگر خواص اپتیکی ذاتی می توان به ضریب خاموشی و توان بازتابش تک پراکندگی اشاره کرد. خواص اپتیکی ظاهری که معمولاً استفاده می شود عبارتند از انعکاس تابش، کسینوس های میانگین و تغییرات توابع میرائی.

یکی از اولین کارهای انجام شده در زمینه اپتیک اقیانوسی به سال ۱۹۶۳ بر می گردد که توسط دانتلی تحت عنوان نور در دریا^۲ منتشر شد و پس از آن کتاب های دیگری توسط مرتن در سال ۱۹۷۰ و توسط اسمیت در سال ۱۹۸۴ منتشر شد که تصویربرداری زیر آب را مورد بررسی قرار می داد. در دهه ۱۹۹۰ بیشتر مسائل مربوط به پراکندگی در محیط های آبی و همچنین پیشرفت های تکنولوژیکی در زمینه پردازش تصویر و دستگاه های تصویرنگاری مورد بحث قرار گرفتند.
(www.Ambercore.com, a white paper on lidar mapping:3-6)

نتیجه گیری:

لیدار مشابه اصول رادار کار می کند که بعضی اوقات نیز رادار لیزری نامیده می شود. اختلاف اصلی بین لیدار و رادار در واقع نوع طول موج های تابشی مورد استفاده است. رادار طول موج های ناحیه رادیویی را استفاده می کند در حالی که لیدار طول موج های لیزری را به کار می برد. لیدار به عبارت ساده نوعی دستگاه لیزری سنجش است. از این دستگاه در موارد متعددی استفاده می شود. یکی از مهم ترین موارد کاربرد لیدار، نقشه برداری، سنجش مشخصات ابرها شامل فاصله، ضخامت، میزان رطوبت ابر و همچنین عملیات ضدزیردریایی می باشد. از سامانه لیدار جهت جمع آوری اطلاعات توپوگرافی نیز استفاده می شود. اگر اطلاعاتی که لیدار به ما می دهد با یک سری اطلاعات اضافی که از عکس برداری هوایی به دست می آید، ضمیمه شود، قابل فهم تر خواهد بود. در مباحث مربوط به رزم ضدزیرسطحی از دو نوع سامانه صوتی و غیر صوتی استفاده می شود

1- Inheritance Optical Properties
2- Light in the sea

۱۱۵..... فصلنامه علوم و فنون نظامی، سال هفتم، شماره ۱۷، تابستان ۱۳۸۹
که از زیرمجموعه‌های سامانه صوتی می‌توان به سونار و بویه‌های سوناری (سونوبوی) اشاره کرد.
لیدار و رادار هم از زیرمجموعه‌های مهم سامانه غیر صوتی به شمار می‌روند.

سامانه لیدار نسبت به سونار قابلیت شناسایی و مانور بیشتری را برای شناسایی اجسام زیر آب فراهم می‌کند، اما به کارگیری مؤثر این سامانه نیازمند شناسایی خواص اپتیکی آب و به کارگیری تکنیک‌های مناسب پردازش تصویر و کنترل سامانه‌ها است. در صورت فراهم بودن این امکانات این سامانه قابلیت تصویربرداری با وضوح بالا و تعیین عمق اجسام و موانع موجود در آب را با قدرت تفکیک بسیار بالایی دارد.

عملیات در آب‌های ساحلی یکی از چالش‌هایی است، که نیروی دریایی در جنگ آینده با آن مواجه است. بنابراین جهت اجرای عملیات در این آب‌ها شناسایی زیردریایی‌های دشمن از اهمیت خاصی برخوردار است. از آنجایی که زیردریایی‌های امروزی کم‌ترین انتشار الکترونیکی، مغناطیسی و صوتی را از خود دارند، با استفاده از سامانه لیدار می‌توان به راحتی این واحدها را شناسایی نمود.

از عملیات‌های مهم دیگر که نیروی دریایی با آن در آینده روبرو می‌باشد، عملیات آبخاکی است. در این عملیات شناسایی دقیق سواحل توسط دشمن از جمله اقداماتی است که نیروهای ویژه قبل از شروع عملیات می‌بایستی انجام دهند، بنابراین یکی از سامانه‌هایی که می‌توان به وسیله آن واحدهای دشمن را در حال نزدیک شدن به سواحل شناسایی کرد، سامانه لیدار است.

روند توسعه و توانایی سامانه لیدار در جمع‌آوری داده‌های مکانی با سرعت و دقت بالا باعث شده است، این روش جایگزین روش‌های سنتی اخذ و جمع‌آوری داده‌های مکانی گردد. نیاز فتوگرامتری و سنجش از دور به تصاویر فضایی و تلفیق داده‌های لیدار با تصاویر فضایی، در آینده نزدیک می‌تواند منجر به ایجاد تحولات بسیار در زمینه تولید داده‌های مکانی گردد. با توجه به کاربردهای فراوان سامانه لیدار در هیدروگرافی، توسعه شهری، استخراج نفت، جنگل‌داری و به خصوص عملیات نظامی در جهت کسب اطلاعات از خصوصیات زمین و دریا در عملیات‌های ضدزیردریایی، آبخاکی، هلی‌برن و ... باعث شده است ابزار ایده‌آلی برای اندازه‌گیری عمق آب‌های سطحی و ارتفاع زمین‌های اطراف سواحل گردد و تنها سامانه‌ای است که می‌تواند در یک عملیات هر دو اطلاعات هیدروگرافی و توپوگرافی را جمع‌آوری کند.

منابع:

الف) منابع فارسی:

- ۱- آقایی، جعفری؛ ابوالفضل، جواد (بهار ۱۳۸۶). معرفی سیستم لیدار، فصل نامه سپهر، نشریه سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، دوره شانزدهم، شماره ۶۱.
- ۲- صادقیان، سعید؛ ولدان زوج، محمد جواد (آبان ۱۳۸۷). سیستم لیدار و کاربردهای آن. ماهنامه فضا، سازمان فضایی ایران، سال چهارم، شماره ۳۴.
- ۳- طحانی، غلامرضا (۱۳۸۹). تجهیزات و فناوری در عملیات دریایی. انتشارات معاونت آموزش دافوس آجا.

ب) منابع لاتین:

- 1- Baltsavias, E. (1999). "A comparison between photogrammetry and laser scanning," ISPRS JPRS, vol. 54.
- 2- Zwally, H.J, Schutz B., Abdalati W., Abshire J., Bentley C., Brenner A., Bufton J., Dezio J., Hancock, D. Herring T., Minster B., Quinn K., Palm S., Spinhirne J., Thomas R. (2002) "ICE Sat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land," Journal of Geodynamics, vol. 34.

پ) سایت های اینترنتی:

- 1- <http://www.csc.noaa.gov/products/sccoasts/html/tutlid.html> .
- 2- http://www.csc.noaa.gov/crs/rs_apps/sensors/lidar.htm.
- 3- <http://www.lidar.cr.usgs.gov>.
- 4- <http://lidar.usgs.gov/index.php>.
- 5- www.ambercore.com.