بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

محاسبه ضریب میرایی پخشی آب دریا با استفاده از روش مونت‌کارلو به‌منظور استفاده در طراحی سیستم‌های لیداری

سید علی اصغر عسکری[۱] و لاله رحیمی نژاد[۲]

۱-مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان (aliaskari@mut-ea.ac.ir)

۲-مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان (lalerahimi@mut-es.ac.ir)

چکیده – ارتباطات اپتیکی در زیر آب و عمق‌سنجی آب‌های کم‌عمق ساحلی توسط پالس‌های لیزری حوزه‌هایی هستند که در سال‌های اخیر توجه محققین و شرکت‌های فناوری را به‌خود جلب نموده‌اند. پراکندگی چندگانه در آب دریا پدیده‌ای است که به‌شدت انتشار پرتو لیزر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این راستا ضریب میرایی پخشی یکی از پارامترهای مهم در بررسی انتشار پرتوهای لیزری در آب دریا می‌باشد. در این مقاله با استفاده از روش آماری مونت-کارلو علاوه بر بررسی پارامتری مانند قطر لکه لیزری در اعماق مختلف برای آب‌های ساحلی و به‌نسبت تمیز دریا، ضریب میرایی پرتو لیزری به‌صورت تابعی از میدان دید سیستم لیداری محاسبه شده و درنهایت ضریب میرایی پخشی بدست می‌آید.

کلید واژه- آب دریا، پراکندگی چندگانه، روش مونت کارلو، ضریب میرایی پخشی،

Calculation of seawater diffuse attenuation coefficient using Monte-Carlo method for use in design of oceanic lidar systems

Ali Asghar Askari, and Lale Rahimi

Faculty of Applied Science, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan

Abstract- Today, underwater optical communication and shallow coastal water bathymetry using laser pulses are areas that have attracted the attention of many researchers and technology companies. Multiple scattering in seawater is a phenomenon that strongly affects laser beam propagation. In this regard, the diffuse attenuation coefficient is one of the important parameters in studying the propagation of laser beams in seawater. In this paper, using Monte Carlo statistical method, in addition to the investigation of laser beam diameter as a function of depth, beam attenuation coefficient as a function of field of view is calculated and finally, diffuse attenuation coefficient has been obtained for coastal and clean seawaters.

Keywords: Diffuse attenuation coefficient, Multiple scattering, Monte Carlo method, Seawater

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

در سال‌های اخیر، مطالعه سطوح بالایی دریاها و اقیانوس‌ها و نقشه‌برداری از مناطق کم‌عمق ساحلی با استفاده از سیستم‌های لیداری توجه طیف گسترده‌ای از محققان و شرکت‌های فناوری را به‌خود معطوف داشته است. در این راستا سامانه‌های مختلف کشتی‌پایه و هواپایه با قابلیت نصب بر روی انواع هواپیماها و بالگردها طراحی، ساخته و استفاده شده است.

در طراحی سیستم‌های لیداری با سکوهای مختلف و همچنین تحلیل داده‌های دریافتی، داشتن اطلاعات کافی از نحوه انتشار پرتو لیزری درون آب از اهمیت زیادی برخوردار است. محیط آب یک محیط بسیار پراکننده برای پرتوهای لیزری است. پدیده پراکندگی چندگانه یک پدیده معمول در انواع آب‌ها از آب‌های لنگرگاهی تا آب‌های ساحلی و به‌نسبت تمیز دور از ساحل محسوب می‌شود. پراکندگی چندگانه موجب می‌شود که قطر لکه لیزری حین انتشار درون آب به‌شدت افزایش یابد. این پدیده موجب کاهش شدت و محدود شدن عمق نفوذ پالس لیزری به‌چند ده‌متر در نواحی دور از ساحل و چندمتر در نواحی ساحلی می‌شود.

در بسیاری از مدل‌سازی‌های انتشار پرتو درون آب از معادله انتقال تابش[1] استفاده می‌شود. با این حال یافتن جوابی مناسب برای این معادله پیچیده دیفرانسیل-انتگرال به‌طور معمول دشوار است.

روش مونت‌کارلو که یک روش مبتنی بر آمار و احتمال است، بعنوان یک روش شناخته شده و مطمئن در شبیه‌سازی بسیاری از پدیده‌های فیزیکی مورد استفاده قرار گرفته است. در سال‌های اخیر نیز شبیه‌سازی انتشار نور در محیط‌های پراکننده‌ای مانند آب به‌منظور بررسی ارتباطات نوری زیر آب و بافت‌های بیولوژیکی توسط این روش آماری انجام شده است[۱-۳].

در این مقاله با استفاده از روش مونت‌کارلو انتشار پرتوهای لیزری درون آب دریا مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌کمک این شبیه‌سازی‌ها قطر لکه لیزری در اعماق مختلف آب دریا و میزان اتلاف انرژی محاسبه می‌شود. همچنین ضریب میرایی به‌صورت تابعی از میدان دید بخش گیرنده یک سیستم لیداری نوعی کشتی‌پایه مورد بررسی قرار خواهد گرفت و در نهایت ضریب میرایی پخشی آب دریا که پارامتری مهم در طراحی سیستم‌های لیداری محسوب می‌شود، محاسبه خواهد شد. محاسبه ضریب میرایی پخشی و همچنین داشتن اطلاعات در مورد وابستگی میزان اتلاف به میدان دید سیستم گیرنده لیدار بخصوص در سیستم‌های کشتی‌پایه که فاصله سامانه تا سطح آب بسیار کم است، کمک شایانی در طراحی، بهینه‌سازی و ساخت این سامانه‌ها خواهد نمود.

روش مونت-کارلو در آب

به‌منظور شبیه‌سازی انتشار پرتو لیزری توسط روش مونت-کارلو از مفهوم بسته‌های فوتونی استفاده می‌شود. بدین معنی که تعداد بسیار زیادی بسته فوتونی درنظر می‌گیریم و انتشار تک‌تک آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این‌صورت مراحل شبیه‌سازی به‌قرار زیر است:

الف-شبیه‌سازی لکه لیزری اولیه: برای این‌منظور با توجه به شکل لکه (در اینجا گاوسی)، قطر و زاویه واگرایی لیزر و با استفاده از اعداد تصادفی موقعیت و زاویه انتشار اولیه هریک از بسته‌های فوتونی را تعیین می‌کنیم. در این مرحله به هرکدام از بسته‌های فوتونی وزن ۱ اختصاص می‌یابد.

[1] Radiative Transfer Equation (RTE)

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

ب: در این مرحله لازم است که هریک از بسته‌های فوتونی را انتشار دهیم. طول مسیر انتشار، l، توسط رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$l = -\frac{1}{\alpha}\ln(q) \qquad (۱)$$

که q یک عدد تصادفی از یک توزیع یکنواخت در بازه [۰- ۱] و α ضریب میرایی پرتو در آب هستند.

ج-هرکدام از بسته‌های فوتونی پس از طی مسیری که در بخش قبل محاسبه شد، به یک مرکز پراکننده برخورد می‌کنند و پراکنده می‌شوند. محاسبه زاویه پراکندگی توسط تابع فاز پراکندگی، $\tilde{\beta}(\theta_s,\varphi)$، انجام می‌شود. تابع فاز پراکندگی در آب مستقل از زاویه سمتی، φ است، در این‌صورت زاویه قطبی پراکندگی، θ_s، از رابطه زیر و با استفاده از تابع توزیع تجمعی، $P(\theta)$، قابل محاسبه است:

$$P(\theta_s) = \int_0^{\theta_s} 2\pi\tilde{\beta}(\theta')\sin\theta' d\theta' = q \qquad (۲)$$

زوایای پراکندگی محاسبه شده نسبت به راستای بسته فوتونی قبل از پراکندگی می‌باشند. این دستگاه مختصات که در هر پراکندگی نیز وضعیت آن تغییر می‌کند به دستگاه مختصات محلی معروف است. بنابراین با یک چرخش مناسب لازم است که زوایا یا کسینوس‌های هادی در دستگاه مختصاب ثابت محاسبه شوند. در دستگاه مختصات ثابت کسینوس‌های هادی به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$u' = u\cos\theta_s + \sin\theta_s(w.\cos\psi.\cos\Delta\psi_s - \sin\psi.\sin\Delta\psi_s) \qquad (۳)$$

$$v' = v\cos\theta_s + \sin\theta_s(w.\sin\psi.\cos\Delta\psi_s + \cos\psi.\sin\Delta\psi_s) \qquad (۴)$$

$$w' = w\cos\theta_s - \sin\theta_s\sin\theta.\cos\Delta\psi_s \qquad (۵)$$

که (u,v,w) کسینوس‌های هادی دستگاه مختصات محلی، ψزاویه سمتی قبل از پراکندگی و $\Delta\psi_s$ تغییر در زاویه سمتی در اثر پراکندگی است که عددی تصادفی بین ۰ و ۱ است.

د-در هر پراکندگی که برای بسته فوتونی اتفاق می‌افتد، وزن بسته فوتونی کاهش می‌یابد. روش‌های مختلفی برای درنظر گرفتن کاهش وزن در روش مونت-کارلو وجود دارد که معمول‌ترین آنها اختصاص وزن جدید برمبنای آلبدو پراکندگی تک‌گانه[۲] است. در این روش وزن بسته فوتونی در این ضریب ضرب شده تا وزن جدید محاسبه گردد.

ه-پس از انتشار تمامی بسته‌های فوتونی، میزان اتلاف انرژی از محاسبه مجموع وزن نهایی به مجموع وزن اولیه بدست می‌آید.

شبیه‌سازی‌ها و نتایج

پارامترهای مورد استفاده در بررسی انتشار پرتوهای لیزری در محیط آب توسط روش مونت-کارلو در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی

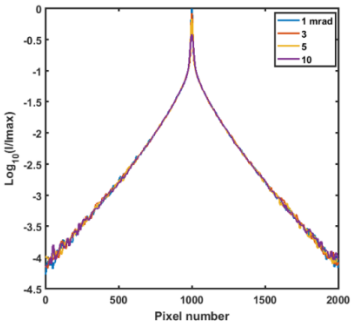
H(m)	d(mm)	θ_d(mrad)	α(1/m)	N
۱۰	۲	۳	۰/۰،۴۷/۱۶۵	$۱۰^۹$

در جدول بالا، H، d، θ_d و N به‌ترتیب ارتفاع سامانه از سطح آب، قطر لکه خروجی لیزر، واگرایی لیزر و تعداد بسته‌های فوتونی هستند. ضرایب میرایی پرتو درنظر گرفته شده به‌ترتیب اندازه، مربوط به آب‌های به‌نسبت تمیز دور از ساحل و آب‌های ساحلی می‌باشند. برای شبیه‌سازی‌ها از تابع فاز هنیه-گرینشتین[۳][۴] استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان دهنده این است که قطر لکه در اعماق مختلف به زاویه واگرایی لیزر و همچنین قطر اولیه وابستگی چندانی ندارد. بعبارتی میزان پراکندگی در آب آن‌چنان زیاد است که زاویه و قطر اولیه

[2] Single scattering albedo
[3] Henyey-Greenestein

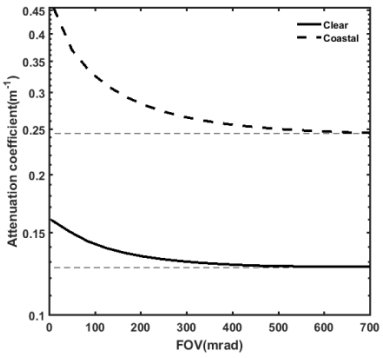
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

چندان مهم نمی‌باشند. در شکل ۱، شکل شدت بهنجار شده (در راستای قطر لکه) در عمق ۲۰ متری آب ساحلی برای واگرایی‌های مختلف پرتو لیزر نشان داده شده است. اندازه هر پیکسل ۱/۵ سانتی‌متر است. همانطور که ملاحظه می‌شود، پراکندگی چندگانه در آب چنان تاثیری دارد که توزیع شدت در عمق ۲۰ متری مستقل از زاویه واگرایی اولیه لیزر است.



شکل ۱: شدت بهنجارشده (قطری) در عمق ۲۰ متری به‌ازای ضریب‌های واگرایی مختلف پرتو لیزر در آب ساحلی.

به‌منظور بررسی وابستگی ضریب میرایی به میدان‌دید سیستم گیرنده لیدار، میزان توان از لکه لیزری که توسط سیستم گیرنده لیدار تحت پوشش قرار می‌گیرد، در اعماق مختلف و برای میدان‌دیدهای متفاوت محاسبه شده است. ضریب میرایی در هر میدان‌دید شیب منحنی لگاریتمی توان برحسب عمق می‌باشد که در شکل ۲ برای دو نوع آب دریا محاسبه شده است.



شکل ۲: تغییرات ضریب میرایی برای آب‌های ساحلی (منحنی خط‌چین) و دور از ساحل (منحنی خط‌پر) با میدان‌دید گیرنده لیدار.

همانطور که مشاهده می‌شود در میدان دیدهای بسیارکم ضریب میرایی مقدار زیادی دارد و در هر دو نوع آب برابر با ضریب میرایی پرتو است. با افزایش میدان دید، ضریب میرایی به مقادیر ۰/۱۲۷ و ۰/۲۴۴ برمتر به‌ترتیب برای آب‌های دور از ساحل و ساحلی کاهش می‌یابد، چراکه قسمت بیشتری از پرتوهای پراکنده شده در میدان‌دید سیستم قرار می‌گیرند. بنابراین برای یک سامانه کشتی‌پایه برخلاف سامانه هواپایه لازم است که میدان دید تلسکوپ گیرنده مقدار زیادی انتخاب شود تا درنهایت ضریب‌میرایی به مقدار میرایی پخشی میل نماید.

نتیجه‌گیری

انتخاب میدان‌دید مناسب با توجه به ضریب میرایی پخشی در سیستم‌های لیداری با وجود پراکندگی زیاد پالس‌های لیزری در آب از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مقاله با استفاده از روش آماری مونت-کارلو انتشار پرتوهای لیزری در آب در حضور پراکندگی چندگانه مورد بررسی قرار گرفته‌است. استفاده از این روش امکان محاسبه ضریب میرایی به‌صورت تابعی از میدان‌دید و محاسبه ضریب میرایی پخشی را فراهم می‌نماید.

مرجع‌ها

[1] G. Carles, P. Zammit, A. R. Harvy, "Holistic Monte-Carlo optical modelling of biological imaging", Sci. Rep., Vol. 9, No. 1, pp. 1-11, 2019.

[2] Y. Mao, et al., "Monte Carlo-based performance analysis for underwater continuous-variable quantum key distribution", Appl. Sci, Vol. 10, No. 17, pp. 1-12, 2020.

[3] L. Qun, et al. "A Semianalytic Monte Carlo Simulator for Spaceborne Oceanic Lidar: Framework and Preliminary Results", *Remote Sensing*, Vol. 12, No. 17, pp. 1-16, 2020.

[4] Z. Jianing, "On sampling of scattering phase functions", Astronomy *and Computing*, Vol. 29, pp. 1-8, 2019.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

با سلام و احترام،
در پاسخ به سوالات داور محترم:
۱-انطباق منحنی های مختلف شکل ۱ به این دلیل است که پراکندگی چندگانه در آب پدیده غالب است و قطر لکه در اعماق زیاد به زاویه واگرایی اولیه پرتو لیزر وابستگی نشان نمی دهد.
۲-انتخاب مقدار زیاد برای میدان دید به این دلیل است که سامانه درنظر گرفته شده یک سامانه کشتی پایه با فاصله کم از سطح آب است و از آنجاییکه قطر لکه در آب بواسطه پراکندگی چندگانه خیلی زیاد است، لازم است که میدان دید بسیار بزرگ انتخاب شود تا فوتون‌های پراکنده شده را دربرگیرد. این میدان دید در یک سامانه هواپایه بواسطه فاصله زیاد از سطح آب کاهش می‌یابد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]