بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

محاسبه ضریب واقطبش سیگنال لیدار در عبور از محیط پراکننده ابر

زهرا امرالهی بیوکی، پرویز پروین و علی بوالی

تهران، خیابان حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک

چکیده – چنانچه نور کاملا قطبیده لیدار به داخل یک محیط چگال نوری مانند ابر گسیل شود، پدیده پراکندگیهای چندگانه موجب کاهش درجه قطبش سیگنال نوری می گردد و نور بازگشتی به سیستم گیرنده لیدار، نیمه قطبیده و با درجه قطبش کمتر از یک خواهد بود. میزان این واقطبیدگی تابع خصوصیات محیط پراکننده می باشد. در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از الگوریتم شبیه سازی مونت-کارلو، واقطبش سیگنال نوری قطبیده لیدار در اثر عبور از داخل یک لایه ابر متشکل از قطرات آب، مورد بررسی قرارگیرد. بدین منظور دو حالت کلی قطبش خطی و قطبش دایروی برای نور فرودی به توده پراکننده، در نظر گرفته شده و نتایج به دست آمده برای این دو حالت، به ازاء مقادیر متفاوت قطر قطرات آب و نیز زوایای میدان دید گیرنده لیدار، با هم مقایسه گردیده است.

کلید واژه- پراکندگی، لیدار، مونت-کارلو، واقطبش

Calculation of the depolarization ratio for Lidar light transport into the scattering medium of a cloud

Zahra Amrollahi Biuki*, Parviz Parvin, and Ali Bavali

Department of Enery Engineering and Physics, Amir Kabir University of Technology, Hafez Street, Tehran, Iran

Abstract- When traveling through an optically thick medium, such as a cloud, multiple scattering from cloud particulates results in reduction of the degree of polarization of the incident Lidar signal. The returned signal to the Lidar receiver system will be partially-polarized(with a degree of polarization less than one). The amount of depolarization depends on the characteristics of the scattering medium. In this paper, we have made use of Monte-Carlo simulations to study the depolarization of an incident polarized Lidar beam traveling through a layer of water droplets cloud. For this purpose, we have considered two cases of linearly polarized and circularly polarized incident light beams and compared the simulation results of this two states for different values of water droplets diameter and detector field of view(FoV).

Keywords: scattering, Lidar, Monte-Carlo, depolarization

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

۱- مقدمه

سیستم لیدار وسیله مناسبی برای سنجش از دور و به دست آوردن اطلاعات در مورد اجسام موجود در فواصل دور میباشد. طرز کار به این صورت است که ابتدا یک پالس لیزر با طول موج مناسب به سمت محیط هدف گسیل و سپس از ذرات ماده (مانند قطرات آب و یا ذرات جامد معلق در جو) پراکنده می شود. بخشی از نور پراکنده شده توسط آشکارساز جمع آوری شده و در پردازشگر مورد آنالیز قرار میگیرد و از این طریق اطلاعاتی در مورد ویژگیهای ماده پراکننده به دست می آید. میتوان با ارسال نور قطبیده با قطبش معلوم به محیط و ثبت میزان تغییر قطبش در سیگنال بازگشتی به گیرنده لیدار، در مورد نوع و مشخصات ذرات پراکننده به اطلاعات مفیدی دست یافت. چنانچه سیگنال لیدار از یک محیط اپتیکی چگال و غلیظ نوری- نظیر ابر- بازگردد، همواره باید سهم پراکندگیهای چندگانه نیز در سیگنال بازگشتی لیدار لحاظ گردد. محیط غلیظ نوری به محیطی گفته می شود که توزیع ذرات در آن به حدی از چگالی نوری میرسد که موجب پراکندگیهای چندگانه فوتونها در مسیر انتشار نور می گردد. در اثر پراکندگیهای چندگانه درون محیط غلیظ اپتیکی، طول مسیر پیموده شده توسط فوتونها افزایش می یابد. در اثر هر پدیده پراکندگی، بسته به این که فوتون در چه زاویه ای پراکنده شود، بخشی از قطبش اولیه نور از دست میرود؛ لذا پراکندگیهای چندگانه و مکرر از ذرات محیط، باعث افزایش میزان واقطبیدگی سیگنال لیدار خواهد شد [1].

۲- پراکندگیهای چندگانه در لیدار

معادله لیدار کشسان پس پراکنده (تک پراکننده) به صورت زیر نوشته می شود:

$$P(z) = \frac{K(z)}{z^2}\beta(z)e^{-2\tau(z)} \qquad (۱)$$

که در آن:

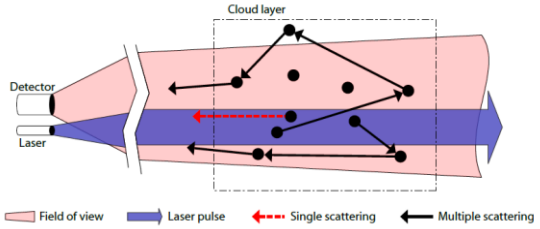
$P(z)$: توان رسیده از برد z ضریب

$\kappa(z)$: مربوط به هندسه و همپوشانی ضریب پس

$\beta(z)$: پراکندگی عمق نوری در برد

$\tau(z) = \int \alpha(z)dz$: z ضریب خاموشی: $\alpha(z)$.

برای استفاده از این معادله، معمولا فرض می شود که فوتونهای بازگشتی به گیرنده لیدار تنها یک بار پراکنده شده اند و از سیگنال دریافتی در اثر فوتونهای چندین بار پراکنده شده، صرف نظر می شود. حال چنانچه میدان دید گیرنده لیدار، به اندازه کافی بزرگ باشد، به نحوی که فوتونهای چندین بار پراکنده شده در داخل محدوده میدان دید آشکارساز قرارگیرند، باید سهم آنها را نیز در سیگنال دریافتی لیدار ثبت نمود[1] .



شکل۱: مسیرهای پراکندگی فوتونها در داخل یک لایه ابر- پراکندگی تک و چندگانه (خطوط قرمز و مشکی) از ذرات ابر (دایره های مشکی) اتفاق می افتد و در داخل میدان دید گیرنده لیدار (ناحیه صورتی رنگ) قرار میگیرد [2].

شایان ذکر است که پراکندگی های متعدد به تغییر قطبش نور فرودی لیدار منجر می شود. یعنی چنانچه موج نوری کاملا قطبیده با قطبش معین به داخل محیط پراکننده ارسال شود، نور بازگشتی به سیستم گیرنده لیدار، به میزان مشخصی واقطبیده خواهد شد که مقدار این واقطبیدگی تابع خصوصیات محیط پراکننده میباشد.

۱-۲- ماتریس پراکندگی

استوکس (۱۸۵۵) نشان داد که همواره میتوان حالت قطبش یک باریکه نوری را با استفاده از ۴ پارامتر که به صورت مولفه های یک ۴-بردار در کنار هم قرار گرفته اند، نشان داد:

$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \qquad (۲)$$

هنگامی که یک موج نوری با قطبش دلخواه از داخل یک محیط پراکننده عبور میکند، بردار استوکس نور خروجی از حاصل ضرب ماتریس مولر پراکندگی در بردار استوکس نور فرودی به دست می آید:

$$\begin{bmatrix} \acute{I} \\ \acute{Q} \\ \acute{U} \\ \acute{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \qquad (۳)$$

مولفه های ماتریس پراکندگی (m_{ij})، تابع زاویه پراکندگی

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

(θ) میباشند. در بررسی پراکندگی نور لیزر از قطرات آب در داخل محیط ابرها، میتوان از ماتریس پراکندگی می (Mie) استفاده نمود. مولفه های این ماتریس از نظریه پراکندگی می به دست می آید [3] .

۲-۲- شبیه سازی پراکندگی های چندگانه نور قطبیده در داخل محیط پراکننده

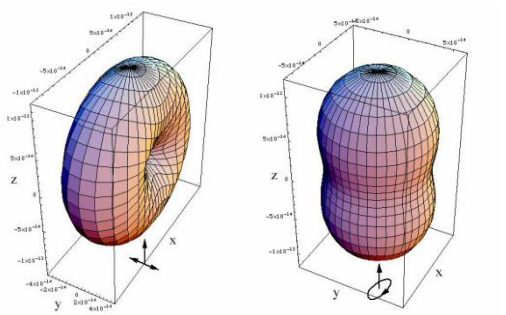
در شبیه سازی مونت کارلو، هر بار یک فوتون در نظر گرفته شده و با کمک نمونه گیری های تصادفی از توزیع های احتمال معین، در محیط منتشر می شود. قطبش فوتونها نسبت به یک صفحه مبنا تعریف می شود که هنگام وقوع هر پدیده پراکندگی، این صفحه مبنا -با به کارگیری زوایای اویلر- دوران می یابد تا بر صفحه پراکندگی منطبق شود و بتوان قطبش نور را حین عبور از داخل محیط، به طور مستمر پی گیری نمود. قبل از وقوع هر پراکندگی، فوتون به میزان طول تصادفی S در داخل محیط پیش میرود که این طول از روی تابع احتمال زیر نمونه گیری می شود:

$$p(s) = e^{-\kappa.s} \qquad (۴)$$

در رابطه فوق، κ ضریب خاموشی میباشد. برای هر پدیده پراکندگی، یک زاویه پراکندگی θ و یک زاویه دوران صفحه پراکندگی(ϕ) باید انتخاب شود. تابع احتمال مربوط به نمونه گیری این زوایا توسط تابع فاز $P(\theta,\phi)$ تعریف می شود. تابع فاز پراکندگی می بر حسب پارامترهای استوکس نور فرودی و مولفه های ماتریس پراکندگی می به صورت زیر تعریف می شود:

$$P(\theta,\phi) = m_{11}(\theta)I + m_{12}(\theta)[Qcos2\phi + Usin2\phi] \qquad (۵)$$

در شکل ۲ تابع فاز می برای نور قطبیده فرودی با قطبش خطی و دایروی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، تابع فاز می برای نور فرودی با قطبش خطی به زاویه سمتیϕ بستگی دارد در حالی که تابع فاز برای نور دارای قطبش دایروی، نسبت به محور z متقارن است[4,5] .



شکل۲: سمت چپ: تابع فاز پراکندگی می برای نور قطبیده خطی و سمت راست: تابع فاز پراکندگی می برای نور قطبیده دایروی [5]

برای نمونه گیری از تابع فاز، از روش رد و پذیرش (rejection) استفاده می شود، به این صورت که ابتدا سه عدد تصادفی α ، β و γ در بازه های $\alpha\in(0,\pi)$ و $\beta\in(0,2\pi)$ و $\delta\in(0,P(0,0))$و به طور یکنواخت نمونه گیری میشوند. آنگاه چنانچه $\delta<P(\alpha,\beta)d\Omega$ باشد، $\theta=\alpha$ و $\phi=\beta$ خواهد بود، در غیر این صورت هر سه نمونه گیری مجددا انجام خواهد شد. پس از هر پراکندگی، بردار استوکس جدید فوتون، با استفاده از ماتریس پراکندگی می، به دست می آید و صفحه مبنای قطبش، به روز می شود. سرانجام هنگامی که فوتون به مرزهای محیط برسد، فرآیند فوق برای آن خاتمه می یابد و یک مسیر فوتونی جدید از ابتدا آغاز می شود. این فرآیند برای تعداد بسیار زیادی فوتون تکرار شده و در نهایت، بردار استوکس برآیند برای فوتونهای بازتابیده به سمت آشکارساز لیدار، محاسبه می گردد [5].

۲-۳- ضرایب واقطبش سیگنال بازگشتی به لیدار

تغییر میزان قطبیدگی نور پس از خروج از محیط پراکننده، با ضریب واقطبش (δ) نشان داده می شود. مقدار عددی پارامتر δ در سیستم لیدار واقطبش، میزان واقطبیدگی سیگنال بازگشتی به گیرنده لیدار را پس از عبور از یک توده پراکننده نشان می دهد و میتواند به عنوان معیاری برای سنجش از دور و تشخیص انواع ذرات معلق در اتمسفر به کار گرفته شود. پدیده پراکندگیهای چندگانه (متوالی) در محیطهای چگال نوری، باعث افزایش عددی ضریب واقطبش سیگنال لیدار می گردد [6]. چنانچه نور فرودی اولیه لیدار به محیط پراکننده، دارای قطبش خطی باشد، ضریب واقطبش خطی لیدار، بر حسب پارامترهای استوکس نور بازگشته به گیرنده لیدار، به صورت زیر تعریف می شود:

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

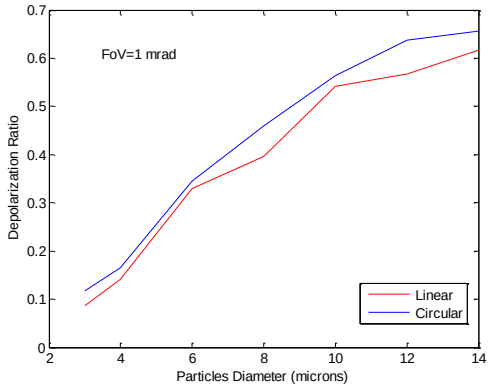
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

$$\delta_L = \frac{I-Q}{I+Q} \quad (۶)$$

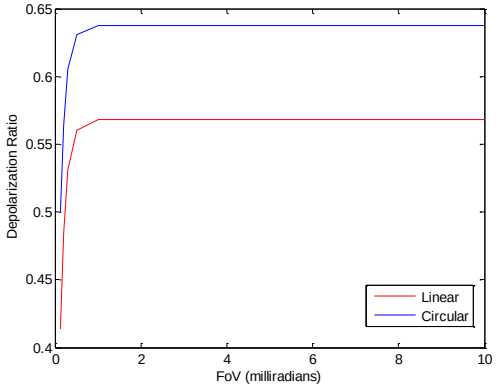
و در صورتی که سیگنال اولیه با قطبش دایروی به محیط ارسال شود، آنگاه ضریب واقطبش دایروی را طبق تعریف زیر خواهیم داشت[7] :

$$\delta_C = \frac{I+V}{I-V} \quad (۷)$$

در شکلهای ۳ و۴، به ترتیب، تغییرات ضریب واقطبش خطی و دایروی سیگنال لیدار بازگشتی از یک لایه ابر به ضخامت ۱۰۰ متر، بر حسب قطر قطرات آب و مقادیر زاویه میدان دید گیرنده لیدار، نشان داده شده است. این نتایج از شبیه سازی مونت-کارلو برای یک سیستم فرضی لیدار ماهواره ای که در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری زمین قرار گرفته، به دست آمده است.



شکل ۳: تغییرات ضریب واقطبش خطی و دایروی برحسب قطر ذرات برای یک لایه ابر به ضخامت ۱۰۰ متر و چگالی عددی (cm^{-3}) ۲۰۰ و به ازاء میدان دید ۱ میلی رادیان



شکل ۴: تغییرات ضریب واقطبش خطی و دایروی برحسب زاویه میدان دید گیرنده لیدار برای یک لایه ابر به ضخامت ۱۰۰ متر و چگالی عددی (cm^{-3}) ۲۰۰ و متشکل از قطرات آب به قطر ۱۲ میکرون

واضح است که همواره مقدار عددی ضریب واقطبش دایروی از ضریب واقطبش خطی بزرگتر است. لذا به نظر میرسد که استفاده از نور قطبیده با قطبش دایروی ابزار مناسبتری جهت تشخیص ذرات پراکننده مختلف در اختیار ما قرار دهد [8].

۳- نتیجه‌گیری

همانطور که در شکلهای ۳ و ۴ مشاهده می شود، با ازدیاد قطر قطرات آب در داخل لایه ابر، مقدار عددی ضریب واقطبش افزایش می یابد، زیرا با بزرگتر شدن قطرات آب، عمق نوری نیز افزایش می یابد. لذا تعداد دفعات پراکندگی فوتونها افزایش یافته و متعاقبا درجه قطبش کاهش می یابد. همچنین میبینیم که هر چه زاویه میدان دید سیستم گیرنده لیدار بزرگتر باشد، ضریب واقطبش حاصل نیز بزرگتر خواهد بود، که این به دلیل بازگشت تعداد بیشتری از فوتونهایی که بیش از یک بار پراکنده شده اند، به سمت تلسکوپ لیدار میباشد. شایان توجه است که با رسیدن زاویه میدان دید به حدود ۲ میلی رادیان، ضریب واقطبش به حداکثر مقدار خود رسیده و پس از آن ثابت میشود، این بدان معناست که فوتونهایی که به فواصل دوری از لیدار پراکنده شده اند، با احتمال بسیار کمی به سمت تلسکوپ، پس پراکنده خواهند شد و عملا این فوتونها سهمی در توان بازگشتی به لیدار نخواهند داشت.

مراجع

[1] C. Weitcamp , *Lidar: Range Resolved Optical Remote Sensing of the Atmospherer*, p. 43, Springer, 2005.

[2] C. Rolft, “Lidar observations of natural and volcanic ash-induced Cirrus clouds”, Ph. D. Dissertation, 2012.

[3] C. Bohren and D. Huffman , *Absorption and scattering of light by small particles*, John Wiley and Sons, 1983.

[4] S. Bartel, A. H. Hielscher, “Monte Carlo simulations of the diffuse backscattering Mueller matrix for highly scattering media”, Applied Optics, Vol. 39, p. 1580, 2000.

[5] J. Ramella Roman, S. Prahl, “Three Monte Carlo programs of polarized light transport in to scattering media”, Optics. Express, Vol. 13, No. 12, pp. 148-163, 2005.

[6] H. Okamoto, “Depolarization Ratio of Clouds Measured by Multi-Field of View Multiple Scattering Polarization Lidar”, Conference paper, 2015.

[7] Gilles Roy, Nathalie Roy, “Relation between circular and linear depolarization ratios under multiple-scattering conditions”, Applied Optics, Vol. 47, No. 35, 94875, 2008.

Y. You, G. W. Kattawar, “Sensitivity of depolarized lidar signals to cloud and aerosol particle properties”, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, Vol. 100, 470-482, 2006.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]