بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

مدلسازی جو و شبیه‌سازی طیف انتشار رادارهای لیزری پالسی در کلاتر ابر

زهرا بهمه[۱]، حمیدرضا زنگنه[۲]
[۱و۲]دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
[1]z.bahmei@yahoo.com , [2]hrzangeneh@kashanu.ac.ir

چکیده – عملکرد سیستم‌های رادار لیزری پالسی تا حد زیادی تحت تأثیر شرایط نامناسب آب و هوایی و انواع مختلف کلاتر (ابر، مه، گرد و غبار و ...) قرار می‌گیرد. از آنجایی که پالس‌های لیزر ضمن انتشار در محیط کلاتری تا حد زیادی تضعیف می‌شوند بنابراین عملکرد این سیستم‌ها تا حد زیادی وابسته به طول موج لیزر می‌باشد. در این مقاله، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار PCModWin 4 لایه‌های بالایی سطح زمین (اتمسفر)، مدلسازی شده و سپس طیف انتشار امواج الکترومغناطیسی در کلاتر ابر با استفاده از این نرم‌افزار در طول موج‌های مختلف رسم می‌گردد و بهترین طول‌موج برای فاصله‌ی انتشار موردنظر انتخاب می‌شود. هدف از این پژوهش، پیدا کردن طول‌موجی با انتقال نزدیک به یک برای فاصله‌ی انتشار کمتر از ۱۰۰ متر می‌باشد که در رباتیک، هدایت لیزری، شناسایی و ... کاربرد دارد. مشاهده می‌گردد که بهترین طول موج برای انتشار پالس‌های لیزر در این فاصله، ۹۰۵ نانومتر است. علاوه بر اینکه در این طول‌موج، جذب نور در فاصله موردنظر تقریباً صفر است، نور لیزر نیز در این طول‌موج قابل رؤیت نیست که در کاربردهای ناوبری و هوانوردی حائز اهمیت است و همچنین کار با رادارهای لیزرهای پالسی با این طول‌موج از لحاظ تجاری مقرون به صرفه می‌باشد.

کلید واژه- رادار لیزری پالسی، کلاتر، طول‌موج بهینه، بیشینه انتقال، کمینه جذب

Atmosphere modeling and pulse laser radar transmission spectrum simulation in cloud clutter

Zahra Bahmeh[1], Hamid Reza Zangeneh[2]
[1,2] Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan, Iran
[1]z.bahmei@yahoo.com , [2]hrzangeneh@kashanu.ac.ir

Abstract- **Performance of pulse laser radar systems is extremely influenced by improper conditions of weather and different kinds of clutter (cloud, fog, smog and so on). Since laser pulses attenuate during propagation through cluttered environment therefore performance of these systems is dependent on laser wavelength. In this paper firstly, we use PCModWin4 software for modeling upper layers of atmosphere then electromagnetic wave transmission spectrum in cloud clutter are drawn in different wavelengths and the best wavelength for favorite distance of propagation is calculated and chosen. To find an optimum wavelength with a transmission close to one for a distance of propagation less than 100 meters (useful in robotic, laser guidance, detection and so forth) is purpose of this research. It is derived that the best wavelength for laser pulses propagation at this distance is 905 nanometers. The laser light in this wavelength is not visible and this is of foremost importance in navigation and aviation, meanwhile being commercially economical.**

Keywords: Pulse laser radar, Clutter, Optimum wavelength, High transmission, Low absorption

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

رادارهای لیزری پالسی کاربردهای فراوانی در زمینه‌های رباتیک، هدایت لیزری، شناسایی، لیدار، مسافت‌یاب لیزری، هوا فضا و... دارند. این سیستم از یک لیزر پالسی به عنوان فرستنده و یک آشکارساز به عنوان گیرنده تشکیل شده است. عملکرد این سیستم‌ها در محیط‌های کلاتری (ابر، مه، گرد و غبار و ...) تا حد زیادی کاهش یافته و وابسته به طول موج تابش الکترومغناطیسی است. ویژگی‌های اپتیکی ابرهای نزدیک سطح زمین توسط آ. کوخانووسکی[۱] بررسی شده است[۱, ۲]. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد بهترین طول موج برای انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط ابری $2.8\,\mu m$ می‌باشد[۱, ۲]. اما در این مطالعات فواصل انتشار پالس لیزر دقیقاً مشخص نشده‌اند و از طرفی این لیزرها از لحاظ تجاری مقرون به صرفه نیستند. برای کاربردهایی مانند هدایت لیزری، رباتیک، شناسایی و... که فاصله‌ی انتشار پالس لیزر کمتر از 100m است، بهتر است که در چیدمان رادار لیزری از لیزرهایی با طول‌موج‌هایی استفاده شود که بیشترین انتقال یا به بیان دیگر کمترین میرایی را داشته باشند و قابل رؤیت نباشند و همچنین از لحاظ تجاری هم مقرون به صرفه باشند. در این مقاله، شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار PCModWin 4 انجام شده است. نرم افزار PCModWin یک رابط گرافیکی توسعه‌یافته برای برنامه MODTRAN[۲] است که توسط شرکت Ontar ارائه شده است. MODTRAN یک برنامه قدرتمند برای توصیف مسیرهای جذب، پراکندگی و انتشار در جو است. این برنامه با همکاری مشترک spectral science Inc و US Air Force توسعه داده شده و برای مدلسازی انتشار امواج الکترومغناطیسی در بازه طیفی $0.2-100\,\mu m$ ارائه شده است[۳].

مدلسازی جو

برای مدلسازی جو، داده‌های رادیوسوند برای منطقه مورد-نظر(ایستگاه هواشناسی شیراز در تاریخ ۲۶ مارس ۲۰۱۹) از سایت دانشگاه وایومینگ[۳] دانلود می‌شود و در کارت مربوط به این داده‌ها بارگذاری می‌گردد. داده‌های رادیوسوند شامل ارتفاع، فشار، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و... می-باشد. با استفاده از این داده‌ها پارامترهای دیگر مثل ارتفاع پایه و ارتفاع بالای ابر و میزان محتوای آب مایع (LWC)[۴] ابر را در ارتفاع‌های مختلف به دست آورده و در نرم‌افزار PCMODWIN 4 وارد شده‌است[۴, ۵]. از جمله پارامترهای دیگر که می‌بایست در نرم‌افزار ثبت شود، ضریب خاموشی (σ_{ext}) و جذب (σ_{abs}) و فاکتور عدم تقارن (g) در طول-موج‌های مختلف است که با استفاده از معادلات پراکندگی مای[۵] به صورت زیر محاسبه می‌شود[۲, ۶, ۷]:

$$\sigma_{ext} = N\int Q_{ext}(\lambda,a)\,f(a)\pi a^2 da \qquad (۱)$$

a، شعاع قطرات ابر و $f(a)$ ، تابع توزیع شعاع ذرات ابر، N ، غلظت ذرات ابر و Q_{ext}، بازدهی خاموشی است.

$$\sigma_{scat} = N\int Q_{scat}(\lambda,a)\,f(a)\pi a^2 da \qquad (۲)$$

$$\sigma_{abs} = \sigma_{ext} - \sigma_{scat} \qquad (۳)$$

در معادله‌ی (۲)، Q_{scat} بازدهی پراکندگی و در معادله (۴)، a_n و b_n ضرایب مای نامیده می‌شوند[۶, ۷].

---

۱ A. Kokhanovosky
۲ MODerate resolution atmospheric TRANsmission
۳ Wyoming
۴ Liquid Water content
۵ Mie

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

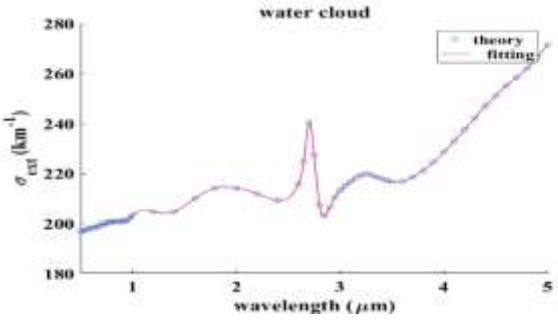
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

$$g=\langle\cos\theta\rangle=\frac{4}{x^2Q_{scat}}\{\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n(n+2)}{(n+1)}Re(a_na_{n+1}^*+b_nb_{n+1}^*)+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2n+1}{n(n+1)}Re(a_nb_n^*)\} \quad (۴)$$

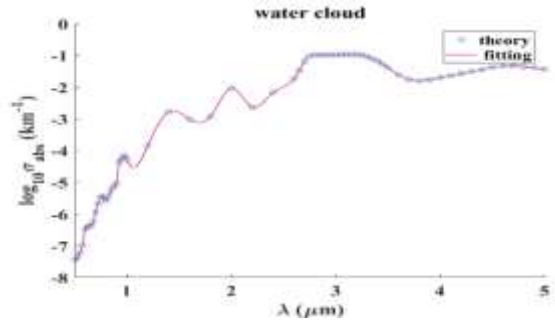
در این شبیه‌سازی شعاع قطرات ابر مطابق با داده‌های راداری ماهواره‌ی آکوا[۶] در تاریخ مارس ۲۰۱۹، بین $4-40\,\mu m$ در نظر گرفته شده است. نمودارهای ضریب خاموشی و جذب و فاکتور عدم تقارن بر حسب طول موج به ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) و (۳) نشان داده شده است. مقدار ستونی بخار آب برحسب g/cm^2 در سایت آئرونت[۷] نشان داده شده است. در این سایت ابتدا از روی نقشه نزدیکترین ایستگاه نزدیک به شیراز (دانشگاه کویت)[۸] را انتخاب کرده و برای تاریخ ۲۶ مارس ۲۰۱۹ مشاهده می‌شود که مقدار آن $1.55\,g/cm^2$ است. سپس این داده‌ها را نیز در نرم‌افزار در کارت مربوطه ثبت می‌شود. از جمله گازهای دیگر که سالانه به طور محسوس تغییر می‌کنند، دی‌اکسیدکربن و ازن می‌باشند که غلظت CO_2 در سال ۲۰۱۹، 400.900 ppmv[۹] و غلظت O_3 در آسمان شیراز که در عرض جغرافیایی بین $30^\circ N-60^\circ N$ قرار دارد، 356.50DU[۱۰] تخمین زده شده است. این داده‌ها نیز در کارت‌های مربوط به آن‌ها نیز وارد می‌شود. انواع گازهای دیگر مثل HNO، CH_4، SO_2، NO و ... سالیانه تغییر چندانی نمی‌کنند و از پیش‌فرض‌های خود نرم‌افزار در مدلسازی اتمسفر استفاده شده است. علاوه بر مقدار غلظت گازها و آیروسل‌ها، می‌بایست فاکتور عدم تقارن آیروسل نیز در نرم‌افزار نیز ثبت شود که در سایت آئرونت نمایش داده شده است. بعد از واردکردن این پارامترها، ارتفاع مشاهده‌گر(لیزر) و هدف و زاویه‌ی زنیت[۱۱] مشخص می‌شود و برنامه اجرا می‌شود. در این نرم‌افزار نمودار انتقال بر حسب طول موج از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود[۳].

$$\begin{aligned}\bar{\tau}_{\Delta\nu}(\nu)=&\bar{\tau}_{\Delta\nu}(\nu)(line\,absorption)+\\&\bar{\tau}_{\Delta\nu}(\nu)(continuum)+\bar{\tau}_{\Delta\nu}(\nu)(\mathrm{R}\,ayleigh)\\&+\bar{\tau}_{\Delta\nu}(\nu)(aerosol)\end{aligned} \quad (۵)$$

در فرمول فوق برای محاسبه انتقال کل، جذب خطی و



جذب پیوسته مولکول‌ها و پراکندگی مولکولی (رایلی) و

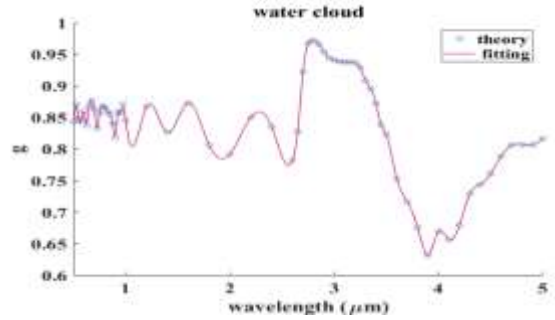


پراکندگی آیروسل‌ها در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش بعدی به طور مفصل و جامع توضیح داده شده است.

شکل ۱: ضریب خاموشی برحسب طول‌موج

شکل ۲: ضریب جذب برحسب طول‌موج

شکل ۳: فاکتورعدم تقارن برحسب طول‌موج



۶ Aqua

۷ AERONET (AERosol RObatic NETwork)

۸ Kuwait university

۹ Parts per million by volume

۱۰ Dobson Unit

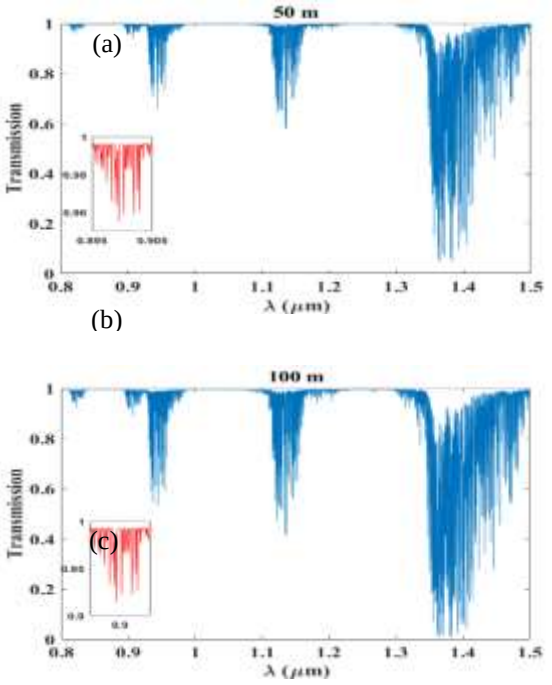
۱۱ Zenith angle

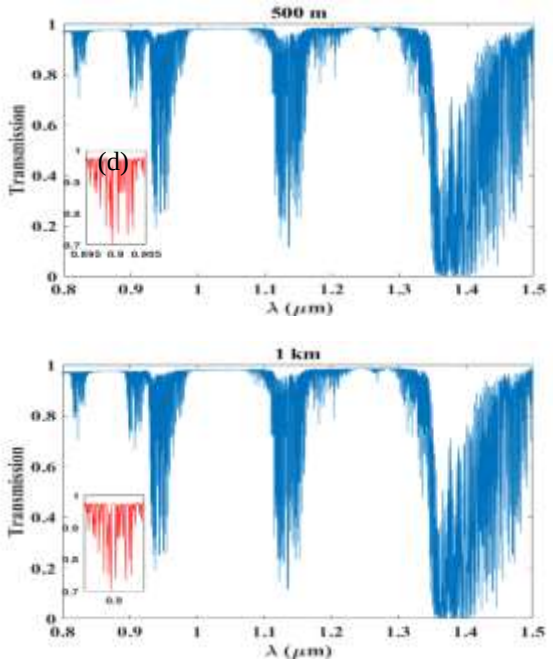
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

شبیه‌سازی انتشار امواج الکترومغناطیسی در ابر

ارتفاع پایه‌ی ابر در این شبیه‌سازی 2.098 km و ضخامت آن 2.102 km است. مشاهده‌گر یا لیزر در داخل ابر و در ارتفاع 2.5 km و زاویه‌ی زنیت صفر درجه قرار داده شده است، یعنی مسیر انتشار، عمودی و به سمت بالای مشاهده‌گر است و کل مسیر در ابر قرار گرفته است. طیف انتقال بر حسب طول موج برای مسیرهای انتشار 50m، 100m، 500m و 1km به ترتیب در شکل‌های (4a)، (4b)، (4c) و (4d) مشاهده می‌شود، با توجه به شکل‌های (4a) و (4b) در فاصله‌های کمتر از 100m، انتقال برای طول موج‌های $0.9\mu m$، $1\mu m$ و $1.2\mu m$ تقریباً 0.9 است و براساس شکل‌های (4c) و (4d) در فاصله‌های بیشتر از 100m برای طول موج $0.9\mu m$ نزدیک به 0.7 و برای طول موج‌های $1\mu m$ و $1.2\mu m$، نزدیک به 0.9 است. در کاربردهای رباتیک، هدایت لیزری، مسافت‌یاب لیزری و دیگر کاربردها که فاصله‌ی انتشار پالس لیزر کمتر از 100m است، علاوه بر پارامتر انتقال، هزینه ساخت و غیر قابل رویت بودن نیز مهم و حائز اهمیت است. بنابراین برای فاصله‌ی کمتر از 100m از بین این سه طول موج، طول موج $0.9\mu m$ بهترین گزینه برای رادارهای لیزری پالسی است، با توجه به اینکه لیزر در





شکل ۴: انتقال برحسب طول موج برای فاصله‌های (a) 50m، (b) 100m، (c) 500m و (d) 1km

این طول موج، شامل هر سه پارامتر ذکر شده (انتقال نزدیک به یک، هزینه ساخت پایین و نامرئی) است.

نتیجه‌گیری

با توجه به شبیه سازی‌های انجام شده، طول موج $0.9\mu m$ یا به بیان دیگر لیزرهای دیودی $905nm$، بهترین نماینده برای رادارهای لیزری پالسی برای فواصل انتشار کمتر از 100m هستند. این لیزرها علاوه بر اینکه در این فاصله کمترین میرایی را دارند، همچنین نامرئی و از لحاظ تجاری مقرون به صرفه می‌باشند.

مراجع

[1] Kokhanovsky, A., *Optical properties of terrestrial clouds.* Earth-Science Reviews, 2004. **64**(3-4): p. 189-241.
[2] Kokhanovsky, A.A., *Cloud optics*. Vol. 283. 2006: Springer.
[3] McClatchey, R., et al., *Optical properties of the atmosphere (revised)*. 1971, AIR FORCE CAMBRIDGE RESEARCH LABS HANSCOM AFB MA.
[4] Salonen, E. and S. Uppala, *New prediction method of cloud attenuation.* Electronics Letters, 1991. **27**(12): p. 1106-1108.
[5] Chakraborty, S. and A. Maitra, *A comparative study of cloud liquid water content from radiosonde data at a tropical location.* International Journal of Geosciences, 2012. **3**(01): p. 44.
[6] Bohren, C.F. and D.R. Huffman, *Absorption and scattering of light by small particles*. 2008: John Wiley & Sons.
[7] Ishimaru, A., *Wave propagation and scattering in random media*. Vol. 2. 1978: Academic press New York.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.