بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

اندازه‌گیری نسبت سیگنال به نوفه در لیدار

هادی برزویی[۱]، حمیدرضا خالصی‌فرد[۲]

[۱]دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده علوم، گروه فیزیک

[۲]دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، دانشکده فیزیک

چکیده – در این مقاله روشی برای اندازه‌گیری نسبت سیگنال به نوفه (س.ب.ن) در لیدار ارایه شده است. در این روش، نوفه پس‌زمینه، نوفه جریان تاریک و نوفه گرمایی از داده‌های انتهای سیگنال محاسبه شده‌اند و نوفه ناشی از سیگنال برحسب مقدار ولتاژ سیگنال محاسبه شده است. نوفه ناشی از سیگنال توسط ضریب تبدیل نوفه به ولتاژ سیگنال مربوط می‌شود که ضریب تبدیل نوفه از نسبت انحراف معیار نوفه پس‌زمینه به میانگین نوفه پس‌زمینه محاسبه شده است. با این روش نسبت س.ب.ن برای هر رشته داده به‌طور مستقل قابل اندازه‌گیری است. نسبت س.ب.ن برای ۱۵۰ و ۱۵۰۰ میانگین زمانی به‌ترتیب در ارتفاع‌های ۴ و ۶ کیلومتر به ۱۰ رسیده است.

کلید واژه- لیدار، نوفه شلیک، توزیع پواسونی، توزیع گوسی، نسبت سیگنال به نوفه.

Measurement of signal to noise ratio in Lidar

Hadi Borzouei[۱], HamidReza Khalesifard[۲]

[۱]Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS)

[۲]Physics group, Department of Sciences, Hakim Sabzevari University

Abstract- An experimental method for measurement of signal to noise ratio (SNR) in Lidar application has been reported. The background, dark current and thermal noises have been calculated from the signal tail. The shot noise of the signal is calculated from the multiplication of signal voltage to noise scale factor. The noise scale factor is estimated from the linear relation between variance and mean of the background noise. The SNR of ۱۵۰ and ۱۵۰۰ temporal averaged signals is equaled to۱۰ at a height of ٤ and ٦ km respectively.

Keywords: Lidar, Shot noise, Poisson distribution, Gaussian distribution, Signal to noise ratio.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]

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

۱- مقدمه

در چند سال اخیر، استفاده از لیدار برای فاصله‌یابی و تشخیص هواویزهای جوی رایج شده است. الگوریتم‌هایی که برای بازیابی اطلاعات از داده‌های لیدار استفاده می‌شوند به میزان آمیختگی اطلاعات با خطا حساس هستند و باید داده‌ی صحیح از داده خطا با دقت مناسبی تشخیص داده شود. کمترین حد مجاز نسبت سیگنال به نوفه (س.ب.ن) باید برابر ۱۰ باشد تا اطلاعات قابل اعتمادی از داده‌های لیدار استخراج شود [۱،۲]. به هر داده خطا یا اشتباهی که باعث کاهش دقت در داده اندازه‌گیری و یا خراب شدن داده‌ی سالم شود نوفه می‌گویند [۲-۴]. روش‌های تجربی مختلفی برای تعیین نسبت س.ب.ن وجود دارد [۴-۷].

۲- روش محاسبه نسبت سیگنال به نوفه

توان اپتیکی رسیده به ورودی تلسکوپ لیدار با عبور از اپتیک گیرنده لیدار به آشکارسازها رسیده و بعد از تقویت به ولتاژ تبدیل می‌شود. ولتاژ ناشی از پس‌پراکندگی جو V_s، با ولتاژ نوفه V_n(نوفه پس‌زمینه V_b، نوفه جریان تاریک V_d و نوفه گرمایی V_t) آمیخته شده و ثبت می‌شود.

$$V = V_s + V_n = V_s + (V_b + V_d + V_t) \qquad (۱)$$

نوفه‌های جریان تاریک و نوفه گرمایی برای یک دستگاه مشخص ثابت هستند اما نوفه پس‌زمینه با تغییر شدت پس‌زمینه آسمان تغییر می‌کند. از این رو، ولتاژ نوفه به دو قسمت نوفه ثابت (ولتاژ نوفه جریان تاریک و نوفه گرمایی) و متغیر V_b(نوفه پس‌زمینه)تقسیم می‌شود [۷و۸] .

$$V_n = V_b + DC \qquad (۲)$$

نسبت س.ب.ن با نسبت ولتاژ داده بدون نوفه به عدم قطعیت در اندازه‌گیری ولتاژ تعریف می‌شود[۱] ،

$$SNR = \frac{V_s}{\Delta V} = \frac{\xi \eta G M P(z)}{\sqrt{\Delta V_s^2 + \Delta V_b^2 + \Delta V_d^2 + \Delta V_t^2}} \qquad (۳)$$

که P توان پس‌پراکنده شده از جو، ξ ضریب عبوردهی قطعه‌های اپتیکی دستگاه (تلسکوپ تا گیرنده الکترونیک)، η پاسخ‌دهی طیفی کاتد آشکارساز، G ضریب تقویت ولتاژی آشکارساز (با مقاومت ۵۰ اهم)، M ضریب تقویت جریان است. عدم قطعیت در اندازه‌گیری شامل خطای دستگاهی در تعیین دقیق ولتاژ و محدودیت فیزیکی در تعیین دقیق تعداد فوتون پس‌پراکنده شده می‌شود. انحراف معیار ناشی از افت و خیز آماری در تعیین تعداد فوتون رسیده به لیدار ΔV_s^2 برحسب ولتاژ و ΔV_b^2 ، ΔV_d^2 و ΔV_t^2 به‌ترتیب انحراف معیار نوفه‌های پس‌زمینه، جریان تاریک و گرمایی هستند. انحراف معیار نوفه‌ها از رابطه‌های نظری زیر به‌دست می‌آیند [۱]،

$$\Delta V_s^2 = 2qG^2FM^2\eta\xi P(z)B \qquad (۴الف)$$

$$\Delta V_b^2 = 2qG^2FM^2\eta\xi P_b B \qquad (۴ب)$$

$$\Delta V_d^2 = 2qG(I_{ds} + FM^2 I_{db})R_{load}B \qquad (۴ج)$$

$$\Delta V_t^2 = 4KTR_{load}B \qquad (۴د)$$

که q بار الکترون آزاد، F ضریب تقویت داخلی نوفه، B پهنای باند الکترونیک دریافت کننده، T دمای محیط به کلوین، K ثابت بولتزمن، R_{load} مقاوت قرارگرفته در مسیر جریان، I_{ds} و I_{db} به‌ترتیب جریان نشتی سطحی و حجمی در آشکارساز هستند [۵].

با توجه به رابطه‌های (۴الف و ۴ب) عدم قطعیت در ولتاژ سیگنال و انحراف معیار نوفه پس‌زمینه با میانگین سیگنال و میانگین نوفه پس‌زمینه رابطه خطی دارند[۷]،

$$\Delta V_b^2 = \gamma V_b, \quad \Delta V_s^2 = \gamma V_s \qquad (۵)$$

شیب این رابطه خطی از الکترونیک آشکارساز و مشخصه‌های داخلی آن ناشی می‌شود. شیب این خط با γ مشخص شده و ضریب تبدیل نوفه نامیده می‌شود. برای تعیین س.ب.ن باید ضریب تبدیل نوفه اندازه‌گیری شود،

$$\gamma = 2qGFM \qquad (۶)$$

انحراف معیار نوفه پس‌زمینه آسمان در مخرج کسر (۴) با مقدار میانگین نوفه جاگزین می‌شود. انحراف معیار نوفه‌ی کل حاصل‌جمع انحراف معیار نوفه گرمایی، نوفه جریان تاریک و ضریبی از میانگین نوفه پس‌زمینه خواهد بود، که اگر اثر دو نوفه جریان تاریک و نوفه گرمایی با تک جمله $(\Delta V_{t,d})^2$ بیان شود، انحراف معیار نوفه کل خواهد شد،

$$\Delta V_n^2 = \gamma V_b + \Delta V_d^2 + \Delta V_t^2 = \gamma V_b + \Delta V_{d,t}^2 . \qquad (۷)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]

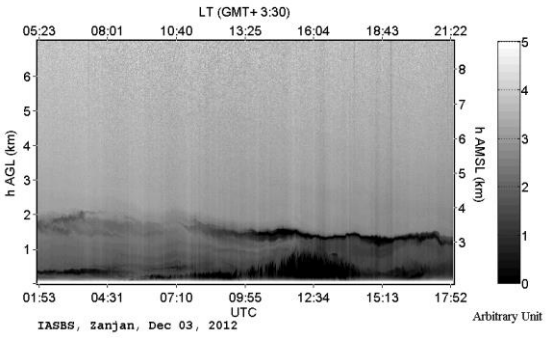
میانگین ولتاژ نوفه پس‌زمینه از رابطه (۲) محاسبه و در رابطه (۷) قرار داده می‌شود. انحراف معیار نوفه کل برحسب میانگین نوفه کل، نوفه ثابت و مجموع انحراف معیار نوفه‌های گرمایی و جریان تاریک به‌دست می‌آید،

$$\Delta V_{\mathrm{n}}^{2} = \gamma V_{\mathrm{n}} + \left(\Delta V_{\mathrm{d,t}}^{2} - \gamma \mathrm{DC}\right). \qquad (۸)$$

ولتاژ DC که حاصل‌جمع ولتاژ نوفه جریان تاریک و نوفه گرمایی است در ضریب تبدیل نوفه (که مقدار ثابتی است) ضرب شده است. اکنون رابطه‌ای خطی بین انحراف معیار کل نوفه و اندازه کل نوفه به‌دست می‌آید.

۳- اندازه‌گیری نسبت سیگنال به نوفه

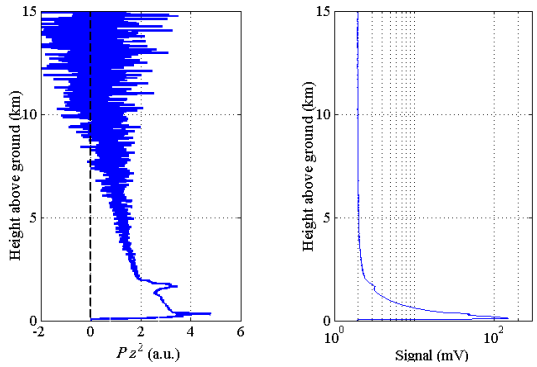
برای اندازه‌گیری نسبت سیگنال به نوفه از داده‌های تحول زمانی لیدار ۴ کاناله دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان در طول‌موج ۵۳۲ nm با قطبش موازی استفاده شده است[۸].



شکل ۱: سری زمانی-فضایی داده‌های لیدار برای قطبش موازی در طول موج ۵۳۲nm از داده‌های لیدار ۴-کاناله‌ی دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان. تحول جوی در تاریخ ۳-دسامبر-۲۰۱۲ () از ساعت ۰۱:۵۰ تا ۱۷:۵۵ (۰۵:۲۰ تا ۲۱:۲۵ به وقت محلی) رخداده است.

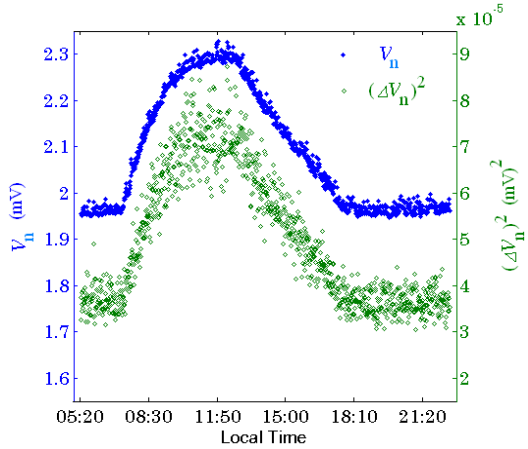
شکل ۱ تحول زمانی در تاریخ ۳-دسامبر۲۰۱۲ از ساعت ۰۵:۲۲ تا ۲۱:۲۲ به وقت محلی را نمایش می‌دهد. محور عمودی سمت چپ ارتفاع از سطح زمین، محور عمودی سمت راست ارتفاع از سطح دریا، محور افقی بالا وقت محلی و محور افقی پایین زمان وقوع پدیده به وقت گرینویچ را نمایش می‌دهد.

الف ب



شکل ۲: الف) میانگین ۱۵۰ شلیک متوالی (داده‌های ابتدای سری زمانی) که توسط آشکارساز دریافت شده در اسیلوسکوپ به ولتاژ تبدیل شده و در رایانه ثبت شده است. ب) داده‌ی ثبت شده بعد از کسر نوفه در مربع فاصله ضرب شده است.

در این تحول، بسامد لیزر فرستنده ۲ هرتز بوده و ۱۶ ساعت متوالی داده ثبت شده است. در طول این مدت، ۱۶۲هزار شلیک انجام شده و به همین تعداد داده دریافت شده است. برای افزایش نسبت س.ب.ن، رسم تصویر و کاهش حجم داده‌ها، هر۱۵۰ شلیک متوالی میانگین گیری شده و تعداد داده‌ها به ۱۰۸۰ رشته داده کاهش یافته است. هر رشته داده پس‌پراکندگی تضعیف شده را برحسب ارتفاع ارایه می‌دهد. نمونه‌ای از یک رشته داده با میانگین ۱۵۰ شلیک متوالی در شکل ۲ رسم شده است.



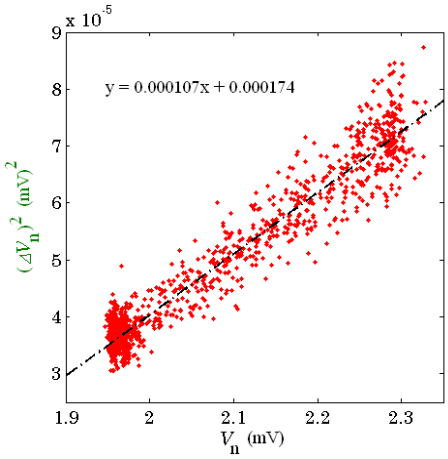
شکل ۳: (نقطه آبی توپر) میانگین نوفه کل برای هر رشته از داده، (نقطه سبز توخالی) انحراف معیار نوفه کل برای هر رشته از داد.

تفکیک فضایی نقاط در هر رشته داده، ۵/۷ متر است و در هر رشته داده، ۴۰۰۰ نقطه داده‌برداری وجود دارد که معادل داده‌برداری تا ارتفاع ۳۰ کیلومتر است. از داده‌های بالاتر از ۱۵ کیلومتر برای محاسبه س.ب.ن استفاده شده است. تعداد نقاط ثبت شده در این بازه فضایی، ۲۰۰۰ نقطه است. میانگین این ۲۰۰۰ هزار نقطه‌ی انتهایی در

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]

رشته داده، محاسبه شده و به‌عنوان میانگین ولتاژ نوفه در زمان وقوع رشته داده ثبت می‌شود. برای همین نقاط، انحراف معیار از مقدار میانگین نیز محاسبه می‌شود.

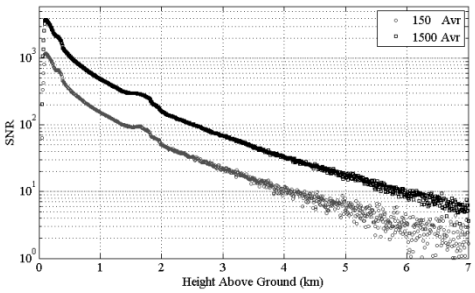
در شکل ۳ میانگین و انحراف معیار نوفه کل برحسب تحول زمانی در یک نمودار رسم شده‌اند. محور افقی تحول زمانی، محور عمودی سمت چپ مقدار میانگین نوفه کل و محور عمودی سمت راست انحراف معیار نوفه کل را نمایش می‌دهد. با روشن شدن هوا میانگین و انحراف معیار نوفه کل افزایش می‌یابد، حدود ظهر به بیشترین مقدار خودش رسیده و رو به شب کاهش می‌یابد.



شکل ۴: شیب مربع انحراف معیار نوفه برحسب میانگین نوفه، ضریب تبدیل نوفه را مشخص می‌کند.

در شکل ۴ مربع انحراف معیار نوفه کل برحسب میانگین نوفه کل رسم شده است. شیب خط، ضریب تبدیل نوفه (γ) را مشخص می‌کند. برای اندازه‌گیری نسبت س.ب.ن، نوفه کل از میانگین ۲۰۰۰ نقطه انتهایی رشته داده محاسبه شده و از ولتاژ کل داده کاسته می‌شود تا ولتاژ بدون نوفه (V_s) ایجاد شود.

شکل ۵ نسبت سیگنال به نوفه اندازه‌گیری شده برای داده‌های لیدار را نمایش می‌دهد. نسبت س.ب.ن برای میانگین ۱۵۰ و ۱۵۰۰ سیگنال متوالی محاسبه شده است.



شکل ۵: نسبت سیگنال به نوفه برای داده‌های لیدار در شب‌هنگام. (رنگ خاکستری) نسبت س.ب.ن برای میانگین ۱۵۰ شلیک متوالی و (رنگ سیاه) نسبت س.ب.ن برای میانگین ۱۵۰۰ شلیک متوالی است.

۴- نتیجه‌گیری

برای تعیین نسبت سیگنال به نوفه در لیدار باید داده‌برداری در نزدیکی صبح یا غروب انجام شود تا شدت پس‌زمینه آسمان تغییر ملایمی داشته باشد. خطا در اندازه‌گیری سیگنال از ولتاژهای انتهایی هر رشته داده و ولتاژ سیگنال محاسبه می‌شود. نسبت س.ب.ن در کانال ۵۳۲nm با قطبش موازی بعد از ۱۵۰ میانگین‌گیری زمانی در ارتفاع ۴ کیلومتری به ۱۰ رسیده است و بعد از ۱۵۰۰ میانگین زمانی در ارتفاع ۶ کیلومتری به ۱۰ رسیده است.

۵- مراجع

[۱] Rocadenbosch F., Comeron A., Pineda D., *Assessment of Lidar Inversion Errors for Homogeneous Atmospheres*, **Appl. Opt.** ۳۷ (۱۹۹۸) ۲۱۹۹-۲۲۰۶.

[۲] Reba M, Mohd N., Rocadenbosch F., Sicard M., *A straightforward signal-to-noise ratio estimator for elastic/Raman lidar signals*, **Proc. SPIE**, ٦٣٦٢ (۲۰۰٦).۱-۱۲.

[۳] Acharya Y.B., Sharma S., Chandra H., *Signal induced noise in PMT detection of lidar signals*, **Measurement,** ۳٥ (۲۰۰٤) ۲٦۹-۲۷٦.

[٤] Zhou C., Xie J., *Method and analysis of calculating signal-to-noise ratio in lidar sensing*, **SPIE**, ٥٨٣٢ (۲۰۰٥).

[٥] Agishev R., Gross B., Moshary F., Gilerson A., Ahmed S., *Simple approach to predict APD/PMT lidar detector performance under sky background using dimensionless parametrization*, **Opt. & Laser Eng.,** ٤٤ (۲۰۰٦) ۷۷۹-۷۹٦.

[٦] Measures R., *Laser Remote Sensing FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS*, John Wiley and Sons, ۱۹۸٤.

[۷] Liu Z., Hunt W., Vaughan M., Hostetler C., McGill M., Powell K., Winker D., Hu Y., *Estimating random errors due to shot noise in backscatter lidar observations*, **Appl. Opt.** ٤٥ (۲۰۰٦).

[۸] برزویی ه، مرادحاصلی ر، خالصی‌فرد ح، *اندازه گیری نمایه خاموشی هواویزهای جو زنجان با استفاده از لیدار رامان*، ***کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران به همراه پنجمین کنفرانس مهندسی فوتونیک ایران***. دانشگاه سیستان و بلوچستان, نوزدهمین (۱۳۹۱).

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]