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

شبیه سازی و بررسی تجربی کانال انتشار لیزر در مه در سیستم لیدار خودرو و بهینه سازی عملکرد سامانه لیداری

سید ایوب موسوی، ابوالحسن مبشری، مجتبی ارجمند

دانشگاه صنعتی مالک اشتر،پژوهشکده اپتیک و لیزر

a-moosavi@mut-es.ac.ir, mobashery59@yahoo.com, arjmand.mj@gmail.com

چکیده – در این مقاله به منظور افزایش کارایی سیستم لیدار اتومبیل‌های خودران، از تغییر شکل پالس دریافتی برای تشخیص موانع در حضور مه و دود استفاده شده و پاسخ محیط بصورت شبیه سازی و چیدمان تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در چیدمان تجربی، استفاده از یک باریکه خطی شده به جای روش اسکن چرخشی، پیچیدگی سیستم‌های اپتومکانیکی متداول لیدارهای خودرو را کاهش داده است. اپتیک مورد نیاز برای خطی سازی باریکه در میدان دور شبیه سازی و پس از ساخت بکار گرفته شده است. با استفاده از پالس‌های کوتاه نانوثانیه‌ای و پردازش شکل سیگنال دریافتی، تشخیص عابرین پیاده و دیگر موانع در هنگام مه شدید میسر است.

کلید واژه- پاسخ ضربه محیط پراکننده، پاول لنز، پروفایل خطی، لیدار خودرو

Simulation and experimental study of automotive LiDAR detection in presence of fog and performance improvements of the system

Seyed Ayoob Moosavi, Abolhasan Mobashery, and Mojtaba Arjmand

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

a-moosavi@mut-es.ac.ir, mobashery59@yahoo.com, arjmand.mj@gmail.com

Abstract- In order to improve automotive LiDAR system performance in detecting obstacles, under fog and smoke environment, the shape changing of received signal is studied. The impulse response of such environment is simulated and experimentally investigated. Usage of a fan shaped beam, instead of the rotationally scanning method, has reduced conventional optomechanical complexities. The required optics for generating line shape beam in far field is simulated and experimentally applied. Discrimination between pedestrians and other rigid targets during heavy fog is possible by using short (nanosecond) pulses and pulse shape analyzing in the receiver.

Keywords: Automotive LiDAR, impulse response of scattering media, Line laser, Powell lens

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]

مقدمه

امروزه سامانه‌های لیداری به کمک اتومبیل‌های خودران آمده و با ارسال و دریافت پالس‌های لیزری، وجود عابر یا مانع و فاصله‌ی آن تا اتومبیل را تخمین زده و به سیستم هدایت هوشمند و ترمزهای اضطراری کمک می‌کند. نیاز به یک سامانه اپتو مکانیکی برای جاروب محدوده مورد سنجش و از طرفی سیگنال‌های خطا ناشی از پس پراکندگی از عوامل محیطی مانند مه غلیظ، دود و غبار و قطرات پاشیده شده از دیگر اتومبیل‌ها در هنگام بارندگی از جمله چالش‌های این سامانه‌ها هستند[۱]. در این مقاله یک سامانه لیداری با زاویه ارسال و دریافت ۶۰° درجه معرفی شده است و با استفاده از یک پالس کوتاه، چگونگی تمایز عابر یا موانع سخت را در حضور مه بررسی و در نهایت چیدمان تجربی مربوطه ارائه شده است.

تئوری

سیستم‌های خطی تغییرناپذیر با زمان توسط یک تابع یکتا در حوزه زمان قابل توصیف هستند که به آن پاسخ ضربه سیگنال می‌گویند. بصورت کلی پاسخ ضربه بصورت $Y(t) = X(t) \otimes H(t)$ نوشته می‌شود که در آن Y(t) پاسخ دریافتی، X(t) سیگنال ورودی و H(t) پاسخ محیطی نامیده می‌شود. سیگنال‌های پیوسته به انتگرال کانولوشن نیاز دارند که بصورت $y(t) = \int_{-\infty}^{-\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau$ نمایش داده می‌شود [۲]. در یک سیستم لیداری توان دریافتی در روزنه ورودی در برخورد با یک مانع از فاصله R بصورت زیر تعریف می‌شود[۳].

$$P_R(R) = C_A \int_{t'=0}^{2R/c} P_T(t') H\left(R - \frac{ct'}{2}\right) dt' \qquad (۱)$$

که در آن P_T پالس ارسالی و C_A یک ضریب ثابت است که به اپتیک فرستنده و گیرنده، سطح مقطع مانع و درصد بازتاب آن وابسته است[۴]. در لیزرهای نیمه هادی و مدار راه‌انداز الکترونیکی امروزی، غالبا با پالس‌های به شکل $P_0 \sin^2(\frac{\pi}{2\tau_H})$ در واحد زمان برخورد می‌کنیم که در آن P_0 توان در قله پالس و τ_H نیم پهنای زمانی پالس است[۳]. در حالتی که پهنای پالس، قابل مقایسه با فاصله اندازه‌گیری باشد نمی‌توان آن‌را بصورت یک ضربه آنی در نظر گرفت.

مانع سخت به مانعی اطلاق می‌شود که مشخصه زمانی یعنی پهنای پالس در برخورد با آن تغییر نکند مانند اشیا کنارجاده، دیگر ماشین‌ها و عابرین پیاده. چنین مانعی بصورت یک تابع دلتای دیراک در محل R_0 از منبع نوری قرار گرفته است و دارای ضریب پس پراکندگی β در میدان دید آشکارساز است. لذا تابع پاسخ آنها به صورت $H_{obstacle} = \beta\delta(R - R_0)$ تعریف می‌گردد[۳].

از طرف دیگر مانع نرم به پدیده‌ای اطلاق می‌گردد که دارای یک توزیع نفوذپذیر از ضرایب افت(α) و پراکندگی(β) در مسیر انتشار است و باعث پهن شدگی در پالس دریافتی می گردد. چنین محیطی اغلب به نام پاسخ کانال انتشار نامیده می‌شود. اگر پراکندگی چندگانه در نظر گرفته نشود، تابع پاسخ آن بصورت $H_{channel} = \beta(R) \times \exp(\alpha(R))$ تعریف می‌گردد. ضرایب α و β به جنس ذرات پراکننده (Q) ، قطر(D) و توزیع آنها وابسته است و از رابطه زیر استخراج می‌شود[۳].

$$\alpha \text{ or } \beta = \frac{\pi}{8} \int_{D=0}^{\infty} D^2 Q_{\alpha \text{ or } \beta}(D) N(D) dD \qquad (۲)$$

که $N(D)$ از رابطه ی زیر استخراج می‌گردد و پارامترهای ثابت آن($\alpha, \rho, \gamma, b \propto R_c$) در جدول (۱) ارائه شده است*.

$$N(D) = \gamma\rho b^{\frac{\alpha+1}{\gamma}} / \Gamma\left(\frac{\alpha+1}{\gamma}\right) \left(\frac{D}{2}\right)^{\alpha} e^{-b\left(\frac{D}{2}\right)^{\gamma}} \qquad (۳)$$

جدول۱: ضرایب توزیع پراکندگی[۳]

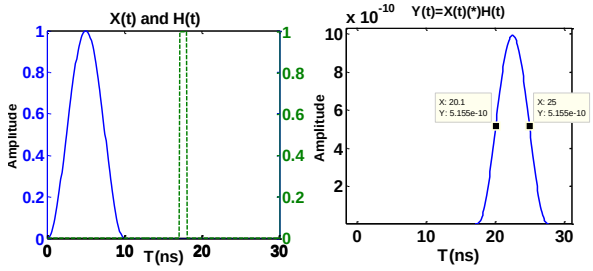
شرایط آب و هوایی	$\rho[cm^{-3}]$	α	γ	$R_C[\mu M]$
غبار	۱۰۰	۱	۰,۵	۰,۰۵
مه شدید	۲۰	۳	۱,۰	۱۰,۰۰
مه رقیق	۲۰	۳	۱,۰	۸,۰۰
اسپری شدید آب	۱۰۰	۶	۱,۰	۴,۰۰

*ضرایب مرتبط با دود بسته به نوع ماده ای که از آن تولید می‌گردد(مانند چوب،مواد نفتی و ...) بسیار متفاوت و متنوع است[۵].

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]

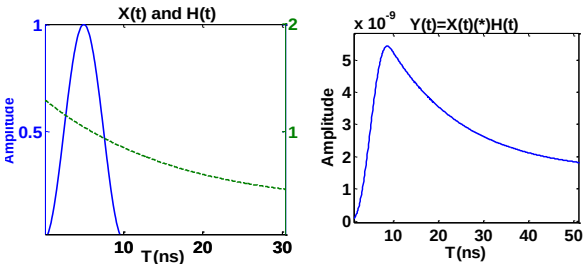
شبیه سازی

در شبیه سازی زیر که در نرم افزار متلب انجام شده است کانولوشن پالس ورودی و پاسخ کانال انتشار، شامل مه و یک مانع سخت، بررسی شده است. ابتدا یک پالس رونده در جهت محور x و یک هدف سخت را که با فاصله‌ی معین از آن قرار گرفته بررسی می‌کنیم. در سیستم لیدار اتومبیل، یک پالس لیزری در فاصله کوتاه حدود ۱۰ متر با سرعت نور منتشر شده و دریافت می‌گردد. لذا بایستی پهنای فضایی پالس خیلی کمتر از محدوده‌ی اندازه گیری باشد. در شبیه‌سازی از یک لیزر دیود با طول‌موج ۸۵۰ نانومتر، پروفایل زمانی به شکل Sin^2 و نیم‌پهنای (FWHM) ۵ نانوثانیه‌ای استفاده شده است. پالسهای نازک‌تر نیز می‌تواند استفاده شود به شرطی که از لیزرهای میکروچیپ و ملاحظات طراحی مدار الکترونیک گیرنده و فرستنده گیگا هرتزی لحاظ گردد.

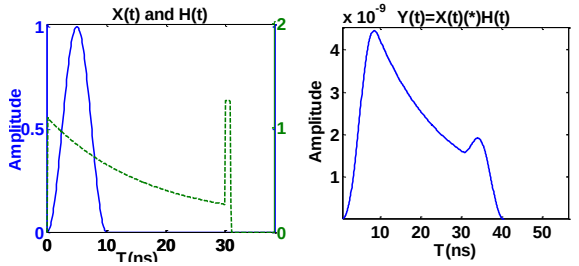


شکل۱: چپ: شکل پالس و پاسخ محیط، راست: حاصلضرب کانولوشن

در سمت چپ شکل(۱)، پالس ارسالی و پاسخ یک مانع در فاصله ۵ متری که بصورت تابع دلتا (برای نمایش مانع سخت یک پهنای جزئی درشکل درنظر گرفته شده) است و در سمت راست کانولوشن پالس ورودی و پاسخ محیط، بدون پهن شدگی، مشاهده می‌شود. اگر یک پالس رونده در جهت محور x به یک پاسخ نرم مانند توزیع یکنواخت مه به ازای مقادیر نوعی $\beta = 0.3$ و $\alpha = 0.1$ برخورد کند، جواب حاصل بصورت یک سیگنال پهن شده همراه با یک دنباله مطابق شکل (۲) خواهد بود. در سناریوی دوم یک پالس رونده در جهت محور x و یک مانع صلب موجود در مه بررسی شده است. همانطور که انتظار می‌رود پهن‌شدگی‌های پالس تا ۳۰ نانومتر بسته به ضرایب افت و پراکندگی در سیگنال دریافتی حاصل از شبیه سازی مشاهده می‌شود.



شکل۲: پاسخ محیط مه پیوسته و سیگنال دریافتی از این محیط



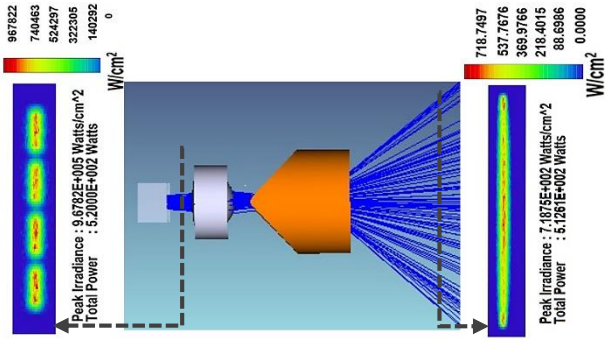
شکل۳: پاسخ محیط مه و مانع صلب مخفی شده در فاصله ۹m

همچنین در حالتی که یک مانع در مه وجود دارد یک قله ثانویه در سیگنال دریافتی مشاهده می‌گردد. در بسیاری از سیستم‌های لیداری که پردازش آنها بر حسب فقط شدت سیگنال دریافتی در فواصل مختلف باشد، در هنگام مه یا دود کاملا خاموش می‌گردند. اما با استفاده از یک پالس کوتاه، به شرط پردازش پالس‌های دریافتی و استفاده از یک بانک اطلاعاتی از شکل پالس در سناریوهای مختلف ، سیستم لیداری قابلیت تمایز عابر یا موانع سخت را در حضور مه نیز خواهد داشت.

به منظور ایجاد پروفایل خطی، خروجی لیزر توسط نرم افزار اپتیکی زیمکس شبیه سازی شد. پس از قرار گیری لیزر در کانون یک لنز غیر کروی با فاصله کانونی موثر ۴ mm، یک لنز با پروفایل سطح مخروطی[۶] در جلوی آن قرار می‌گیرد که در میدان دور، پروفایل لیزر به یک خط با زاویه واگرایی ۶۰ درجه و با اختلاف توان کمتر از ۲۰٪ در طول خط لیزر می‌رسد. در شکل (۴) چیدمان اپتیک فرستنده، نمایه لیزر و نمایه میدان دور آن مشاهده می‌شود. بایستی توجه داشت

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]

که برای جبران کاهش چگالی توان برتابش در توزیع خطی بایستی از لیزرهای با توان بالاتر از لیزرهای متداول در این نوع کاربرد استفاده کرد.

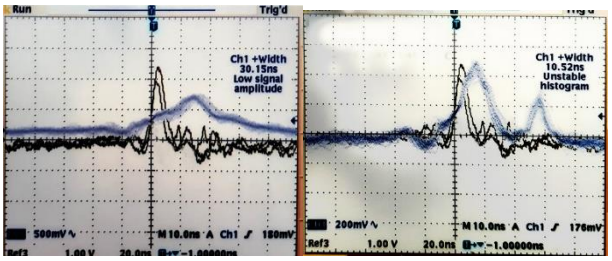


شکل۴: چیدمان اپتیک خطی ساز و پروفایل لیزر قبل و بعد از اپتیک خطی ساز

چیدمان تجربی

در چیدمان آزمایشگاهی از یک لیزر دیود ۴ کاناله پالسی در طول موج ۹۰۰ نانومتر و توان قله ۵۲۰ وات استفاده شده است که درایور طراحی شده آن قابلیت تولید جریان ۱۶۰ آمپر مورد نیاز با پهنای پالس ۵ نانوثانیه را دارد. اپتیک فرستنده مطابق شبیه سازی شکل (۴) و گیرنده سامانه از یک لنز به قطر۲۵mm و فاصله کانونی ۲۰mm برای جمع‌آوری فوتون‌های پس‌پراکنده تشکیل شده است. نور دریافتی روی آرایه‌ای از آشکارسازها از نوع PIN با دو طبقه مدار تقویت سیگنال متمرکز شده و بسته به زاویه‌ی دریافت نور، سمت قرارگیری مانع مشخص می‌شود.

به منظور ایجاد محیط‌های مه و دود از مجموعه‌ای از دستگاه‌های تولید بخار سرد و همچنین مواد دودزا استفاده شد که اطلاعات کاملی از گستره قطر ذرات و توزیع آنها در دست نیست(تقریبا در محدوده nm ۱۰۰۰-۳۰). در شکل (۵) پهن شدگی سیگنال(نمودار آبی) دریافتی از مه نسبت به سیگنال دریافتی از یک جسم صلب(نمودارهای مشکی) در خروجی گیرنده قابل مشاهده است. این منحنی‌ها توسط اسیلوسکوپ۲۰۰مگاهرتزی دریافت و نمایش داده شده است. در نمودار سمت راست، سیگنال دریافتی، دارای دو قله پهن شده است که قله اول مربوط به پراکندگی از مه و قله دوم مربوط به مانع سخت است.



شکل ۵: سیگنالهای دریافتی پهن شده در پراکندگی از مه. در شکل سمت راست قله اول مربوط به مه و قله دوم مانع سخت در فاصله ۶ متری است.

بحث و نتیجه‌گیری

استفاده از پروفایل خطی در این سیستم لیداری و دریافت در میدان دید °۶۰، لزوم استفاده از روش‌های جاروبی را در این سامانه مرتفع ساخت؛ همچنین پهن‌شدگی ۵ تا ۳۰ نانوثانیه‌ای در سیگنال دریافتی را با یک مدار صافی زمانی تشخیص داده و آن‌را به موانع نرم مانند پراکندگی از مه و دود نسبت دادیم. خطی‌سازی نمایه خاص لیزر، توسط یک مجموعه لنز غیرکروی و مخروطی انجام شد. کاهش چگالی توان لیزر به علت خطی شدن را با استفاده از لیزر دیود با توان بالاتر، ولی مقرون به صرفه، و همچنین استفاده از دو طبقه مدار تقویت سیگنال، جبران کردیم که در محدوده زیر ده متر قابلیت تشخیص موانع را داشته باشد .

مرجع‌ها

[1] Y Li, J Ibanez-Guzman, "LiDAR for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems", IEEE Signal Processing Magazine, 2020.

[2] Alan Oppenheim, *Signals and Systems*, Pearson; 2nd edition, 1996.

[3] R. Rasshofer et al, "Influences of weather phenomena on automotive laser radar systems", BMW Group Research & Technology, Hanauer Str. 46, 2011.

[4] CS Fox, *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook*, SPIE Press, 1993.

[5] Vilar, R. Lavrov "Estimation of required parameters for detection of small smoke plumes by lidar at 1.54 µm", Appl Phys B 71, 225–229, 2000.

[6] https://laserlineoptics.com/powell_primer

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]