بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه سیستان و بلوچستان،
زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : ۱-۲۵۱۴-۱۰-A

بررسی عملکرد دیود لیزری نیمرسانا به عنوان چشمه‌ی نوری سیستم لیداری با کاربرد خودروهای خود-ران

سید محسن ایزدیار، بهنام بهادری

گروه اپتیک، دانشکده علوم، دانشگاه خیام مشهد، SeyedMohsen.Izadyar@Gmail.com

چکیده - در این مقاله، عملکرد دیود لیزری نیمرسانا به عنوان چشمه‌ی نوری سیستم‌های لیداری با کاربرد در خودروهای خود-ران بررسی می‌شود. مهمترین عامل تاثیرگذار بر عملکرد سیستم لیداری، چشمه‌ی لیزری آن است. دیود لیزری نیمرسانا به دلیل مشخصات قابل‌توجهی که دارد، به عنوان چشمه نوری در سیستم لیداری انتخاب می‌شود. دیود لیزری نیمرسانا بر پایه‌ی معادلات آهنگ و با روش رنگ-کوتای مرتبه‌ی چهارم مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌شود. بررسی عملکرد و بهبود سیستم لیداری با تمرکز بر نرخ بیت گسیل پالس دیود لیزری تحقیق می‌شود. نشان داده می‌شود که لیزر نیمرسانا توانایی تولید نرخ بیت‌های kHz ۴۰۰ را برای استفاده در سیستم‌های لیداری با ۱۶ الی ۶۴ لیزر نیمرسانا و نیز، نرخ بیت‌هایی از مرتبه‌ی مگا هرتز را برای سیستم‌های لیداری تک لیزری با آینه‌ی چرخان دارد. تاثیر سرعت خودروی خود-ران نیز در عملکرد سیستم لیداری مورد بحث قرار می‌گیرد.

کلید واژه- خودروی خود - ران، دیود لیزری نیمرسانا، روش حل عددی رونگ - کوتای مرتبه‌ی چهارم، لیدار، معادلات آهنگ.

Investigation of Semiconductor Laser Diode Performance as an Optical Source of LIDAR System Used in Autonomous Cars

Seyed Mohsen Izadyar, Behnam Bahadory

Department of Optics, Faculty of Science, University of Khayyam.

Abstract- In this paper, performance of semiconductor laser diode as an optical source of LIDAR systems is investigated which is used in self-driving cars. The most effective factor on LIDAR system performance is the laser source. A semiconductor laser diode is chosen as optical source of LIDAR system due to its remarkable characteristics. The semiconductor laser diode is modeled and simulated based on rate equations using 4th order Runge–Kutta method. Performance and improvement of LIDAR system are investigated due to bit-rate of laser signal. It is shown that semiconductor laser is capable of producing 400 kHz bit-rate signals in LIDAR systems with 16 to 64 lasers, and mega hertz bit-rate signals for one laser LIDAR systems with rotating mirror. Finally, effect of autonomous car speed is discussed on LIDAR system performance.

Keywords: Fourth order Rounge-Kutta method, LIDAR, rate equations, self-driving cars, semiconductor laser diode.

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

مقدمه

اصطلاح وسیله‌ی نقلیه‌ی خود-ران، به خودروهایی گفته می‌شود که بتوانند بدون دخالت انسان، بخشی از بزرگراه، جاده‌های شهری و/یا خارج از جاده را طی کنند. یک خودروی خود-ران به واسطه‌ی حسگرهایش، از محیط پیرامون خود آگاهی کسب می‌کند. از مهمترین حسگرهای به کار گرفته شده در این خودروها، حسگر لیداری است [۱]. این حسگرها قادر به اندازه‌گیری مسافت با نرخ‌هایی بزرگتر از ۱۵۰ kHz هستند [۲] و به عنوان حسگرهای دور-برد با بردی بیش از ۲۵۰ m دسته‌بندی می‌شوند. در بین اجزای تشکیل دهنده‌ی سیستم لیداری، لیزر به تنهایی بر کل عملکرد آن تاثیر می‌گذارد. در نقشه‌برداری لیدار، کیفیت و واگرایی پرتوی لیزری مسئول تفکیک عرضی [x,y]، اعوجاج زمانی (timing jitter) و طول پالس کوتاه مسئول دقت طولی [z]، انرژی پالس لیزر پارامتری کلیدی برای دستیابی به بردهای بلند و نرخ‌های تکرار بالای پالس فراهم کننده‌ی اسکن سریعتر و خروجی داده‌های بیشتر هستند. موارد تاثیر گذار بر قدرت تفکیک لیدار عبارتند از: تعداد پالس در واحد سطح، سرعت خودرو، فاصله از شی مورد اسکن، میدان دید و نرخ گسیل پالس. دیودهای لیزری نیمرسانا[۱] (SLD) به علت اندازه‌ی کوچک، قیمت ارزان، عمر مفید طولانی، قابلیت اتکا و مصرف انرژی پایین، از رایج‌ترین چشمه‌های نوری در سیستم‌های لیداری هستند. در این مقاله، به بررسی عملکرد چشمه‌ی لیزری نیمرسانا برای سیستم لیداری با کاربرد در خودروهای خود-ران پرداخته می‌شود.

معادلات آهنگ حاکم بر دیود لیزری نیمرسانا

رفتار SLD با استفاده از معادلات آهنگ مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌شود [۳]. فرض می‌شود چگالی الکترون‌ها در نوار رسانش با چگالی حفره‌ها در نوار ظرفیت یکسان باشند. در نتیجه، معادلات آهنگ برای چگالی حامل‌های الکتریکی N و چگالی فوتون‌های S نوشته می‌شوند:

$$\frac{dN}{dt}=\frac{I(t)}{qV_a}-g_0\frac{(N-N_0)S}{1+\varepsilon S}-\frac{N}{\tau_n} \qquad (۱)$$

$$\frac{dS}{dt}=\Gamma g_0\frac{(N-N_0)S}{1+\varepsilon S}-\frac{S}{\tau_p}+\frac{\Gamma\beta}{\tau_n}N \qquad (۲)$$

که I جریان تزریقی، q بار الکتریکی واحد، V_a حجم ناحیه‌ی فعال لیزر، g_0 ضریب بهره‌ی دیفرانسیلی، N_0 غلظت حامل‌های شفاف، ε ضریب اشباع بهره، τ_n طول‌عمر حامل‌ها، τ_p طول‌عمر فوتون‌ها، Γ فاکتور محبوس‌سازی اپتیکی و β فاکتور جفت‌شدگی گسیل خودبه‌خودی هستند. دو طول‌موج گسیلی ۱/۵ μm و ۹۰۵ nm به عنوان خروجی برای دیود لیزری در نظر گرفته می‌شوند.

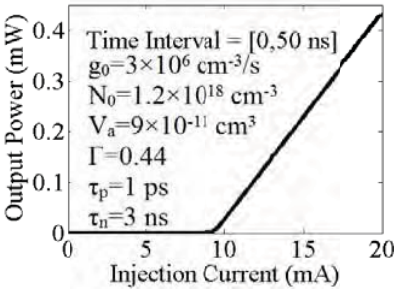
چشمه‌ی لیزری ایمن در سیستم‌های لیداری با کاربرد خودروهای خود-ران باید در مد پالسی عمل کند، به اندازه‌ی کافی قوی باشد تا بتواند عابری با لباس تیره را که در فاصله‌ی ۱۰۰ m است، شناسایی کند، در دمای ۴۰- تا ۸۵ درجه‌ی سیلیسیوس کار کند و پالس‌هایی سازگار با دقت اندازه‌گیری مسافت ۱۰ cm گسیل کند. در این مقاله، بررسی عملکرد و بهبود سیستم لیداری با توجه به نرخ بیت گسیل پالس SLD انجام می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی

معادلات (۱) و (۲) را نمی‌توان به صورت تحلیلی حل کرد و از روش عددی رونگ - کوتای مرتبه‌ی چهارم برای حل عددی آن‌ها استفاده می‌شود. برای اعتبارسنجی مدل معرفی شده، در شکل ۱ منحنی مشخصه‌ی P-I در طول موج ۱/۵ μm نشان داده می‌شود. برخی مقادیر شبیه‌سازی در شکل نشان داده شده‌اند. همان‌طور که می‌توان دید، تطابق خوبی با نتایج [۳] وجود دارد. با توجه به شکل، می‌توان دید که جریان آستانه‌ی SLD حدود ۹ mA است.

[۱] Semiconductor Laser Diode

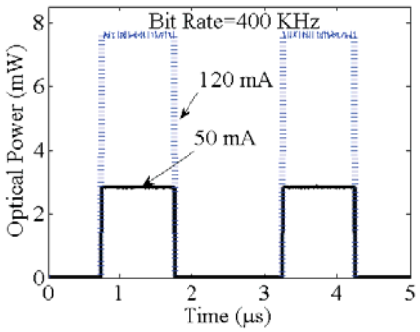
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.



شکل ۱: منحنی مشخصه‌ی P-I دیود لیزری نیمرسانا

به منظور بهینه‌سازی SLD با کاربرد خودروهای خود-ران، طول‌موج ۹۰۵ nm انتخاب می‌شود. زیرا نور خروجی در ۹۰۵ nm به راحتی توسط آشکارسازهای سیلیکونی ارزان قیمت آشکارسازی می‌شود. همچنین، SLDهای پالسی اختصاص یافته به خودروهای خود-ران دستگاه‌های هیبریدی همراه با خازن و ترانزیستور MOSFET هستند. هر بار که گیت ترانزیستور باز می‌شود، بار الکتریکی انباشته در خازن‌ها در تراشه‌ی لیزر تخلیه و قطار پالس نوری گسیل می‌شود. شکل ۲، توان خروجی SLD را در مد پالسی و طول‌موج ۹۰۵ nm و جریان‌های تزریقی ۵۰ و ۱۲۰ میلی‌آمپر نشان می‌دهد. جریان بایاس ثابت ۱ mA نیز، در همه‌ی زمان‌ها به سیستم تزریق می‌شود. مشاهده می‌شود که تولید پالس نوری با نرخ بیت ۴۰۰ kHz بدون اعوجاج موج امکان‌پذیر است. این نرخ تکرار در مقایسه با لیدار شرکت ولوداین با شلیک ۲۰ هزار پالس در دقیقه [۴]، بهبود یافته است. افزایش جریان تزریقی منجر به افزایش پیک توان خروجی می‌شود. انرژی هر پالس در جریان‌های تزریقی ۵۰ و ۱۲۰ میلی‌آمپری به ترتیب، ۶ nJ و ۱۵ nJ است. افزایش جریان و پهنای پالس منجر به افزایش انرژی پالس خروجی و درنتیجه، افزایش برد اندازه‌گیری می‌شوند. برای دست‌یابی به توان‌های بالاتر، از چندین لیزر در لیدار استفاده می‌شود.

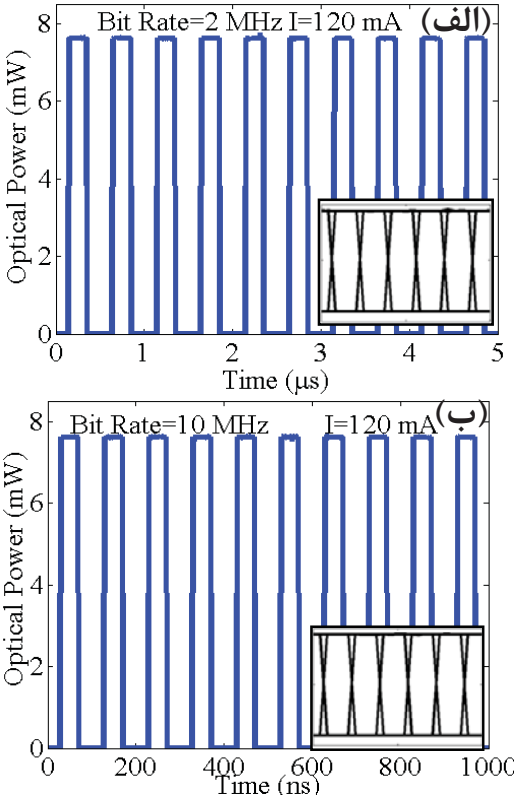
یکی از عوامل کلیدی تعیین قدرت تفکیک لیدار، تعداد پالس لیزری در هر متر مربع است. برای شناسایی اجسامی به بزرگی ۱۰ cm، حداقل به ۱۰۰ پالس در هر مترمربع نیاز است. برای شناسایی این اجسام در شعاع ۱۰۰ متری خودرو، به دیود لیزری با حداقل نرخ بیت ۳ MHz نیاز است. لیدارهای شرکت ولوداین دارای تعداد زیادی لیزر نیمرسانا هستند که روی یک هد چرخان قرار گرفته‌اند. هر لیزر، آشکارساز مخصوص به خودش را دارد و دارای میدان دید عمودی ۲۸/۶° است. در این لیدارها، حدود ۱/۳ میلیون نقطه از داده‌ها در هر ثانیه تولید می‌شود. لیدار ولوداین با ۶۴ لیزر برای خودرویی در سرعت ۶۵ km/h این امکان را فراهم می‌کند تا به صورت اتوماتیک جسمی با اندازه‌ی ۱۵ cm را در مسافت ۵۰ متری تشخیص دهد و هنوز زمان کافی برای مسیریابی اطراف داشته باشد [۴]. بنابراین، SLD با نرخ بیت ۴۰۰ kHz برای استفاده در سیستم‌های لیداری با ۱۶ الی ۶۴ لیزر بسیار مناسب است، اما قیمت آن‌ها بسیار بالاست. برای کاهش قیمت می‌توان از یک لیزر تابنده به آینه‌ی چرخان استفاده کرد، اما دیگر نرخ بیتی از مرتبه‌ی کیلو هرتز جوابگو نیست. برای تولید ۱/۳ میلیون نقطه داده در هر ثانیه توسط لیزری با آینه‌ی چرخان، به نرخ بیت‌هایی از مرتبه‌ی مگاهرتز نیاز است.



شکل ۲: پالس خروجی دیود لیزری با نرخ بیت ۴۰۰ kHz.

شکل ۳ خروجی SLD با پالس جریان مربعی و ضمیمه‌ی آن، طرحواره‌ی چشم پالس خروجی را در نرخ بیت‌های ۲ و ۱۰ مگاهرتز نشان می‌دهد. می‌توان دید که SLD توانایی تولید پالس‌هایی از مرتبه‌ی مگاهرتز را بدون اعوجاج موج و اثر الگو دارد. انرژی هر پالس در نرخ بیت‌های ۲ و ۱۰ مگاهرتز به ترتیب، ۱۵/۳ nJ و ۳ nJ است.

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



شکل ۳: پالس خروجی SLD در نرخ بیت‌های (الف) ۲ MHz و (ب) ۱۰ MHz. ضمیمه: طرحواره‌ی چشم در هر ترخ بیت.

از آن جایی که سیستم لیداری خودروهای خود-ران متحرک است، باید نقش سرعت خودرو در تعیین دقت و قدرت تفکیک سیستم لیداری در نظر گرفته شود. همانطور که ذکر شد، برای اجسام ۱۰ سانتی متری به حداقل ۱۰۰ پالس لیزری در هر متر مربع نیاز است. به عنوان نمونه، خودرویی که با سرعت ۷۲ km/h (۲۰ m/s) در حال حرکت است، هر متر را در ۵۰ ms طی می‌کند. به عبارتی، در هر ۵۰ ms به ۱۰۰ پالس نوری در هر متر مربع نیاز است. در نتیجه، نرخ تکرار پالس دیود لیزری برای شناسایی اجسامی در فاصله‌ی ۵۰ m و دقت ۱۵ cm و در سرعت ۷۲ km/h، باید حداقل ۷/۶ MHz باشد. با توجه به شکل ۳(ب)، این نرخ بیت قابل حصول است. بنابراین، می‌توان SLD را چشمه‌ی نوری مناسبی برای سیستم لیداری با کاربرد خودروهای خود-ران به حساب آورد، در حین این که قیمت لیدار پایین بماند.

نتیجه‌گیری

عملکرد چشمه‌ی لیزری نیمرسانا در سیستم لیداری با کاربرد خودروهای خود-ران بررسی شد. SLD بر پایه‌ی معادلات آهنگ مدل‌سازی شد. با حل عددی معادلات آهنگ با روش رونگ - کوتای مرتبه‌ی چهارم، منحنی مشخصه‌ی P-I برای اعتبارسنجی مدل پیاده شده به دست آمد. تولید نرخ بیت ۴۰۰ kHz توسط دیود لیزری برای استفاده در سیستم‌های لیداری با ۱۶ الی ۶۴ لیزر نیمرسانا نشان داده شد. این نرخ بیت، توانایی تشخیص اجسامی با اندازه‌ی ۱۵ cm را در مسافت ۵۰ متری در خودروی خود-رانی با سرعت ۶۵ km/h ممکن می‌ساخت. سپس، پیشنهاد استفاده از یک لیزر و آینه‌ی چرخان برای کاهش هزینه ارائه شد. نرخ بیت‌های تکرار پالس ۲ و ۱۰ مگاهرتزی به عنوان خروجی دیود لیزری نشان داده شد. تاثیر سرعت خودروی خود-ران در عملکرد سیستم لیداری نیز مورد بحث قرار گرفت. بیان شد که قابلیت تشخیص اجسام ۱۵ cm در فاصله‌ی ۵۰ متر و در سرعت ۷۲ km/h در نرخ بیت‌هایی بیش از ۷/۶ MHz در این نوع از لیدارها ممکن است.

مرجع‌ها

[1] J. Zhao, B. Liang and Q. Chen, "The key technology toward the self-driving car", *Int. J. Intell. Autom. Syst*, vol. 6, no. 1, pp. 2-20, 2018.
[2] C. Ilas, "Electronic sensing technologies for autonomous ground vehicles: A review", *Proc. of Adv. Topics in El. Eng. (ATEE) 8th International Symposium*, pp. 1-6, May 2013.
[3] T. Schaer, R. Rusnov, S. Eagle, J. Jastrebski, S. Albanese and X. Fernando, "A dynamic simulation model for semiconductor laser diodes", *CCECE 2003 - Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology*, vol. 1, no. 03CH37436, pp. 293-297, 2003.
[4] B. Schwarz, "LIDAR: Mapping the world in 3D", *Nature Photon.*, vol. 4, pp. 429-430, 2010.

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