

ارزیابی و برآورد کیفیت رفتار عوامل دخیل در دقت فاصله سنجی لیزر پالسی به روش دروازه پنجره زمان

احمد رضا خوگر^{۱*}، علی الدویری^۲، حسین لکزیان^۳، محمدحسین قزلیباغ^۴

^۱ دانشیار، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۲ دانشجو دکتری، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۳ استادیار، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۴ دانشیار، مجتمع مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

برجسته‌ها

- در این مقاله رابطه‌ای تحلیلی برای اندازه‌گیری و تشخیص فاصله به وسیله سنجش آماری لیزر پالسی، توسعه داده شده است.
- حداقل فاصله قابل اندازه‌گیری نیز به صورت کمی مشخص شده است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۸

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

*نویسنده مسئول:

khoogar@gmail.com

کلیدواژه‌ها:

آشکارسازی

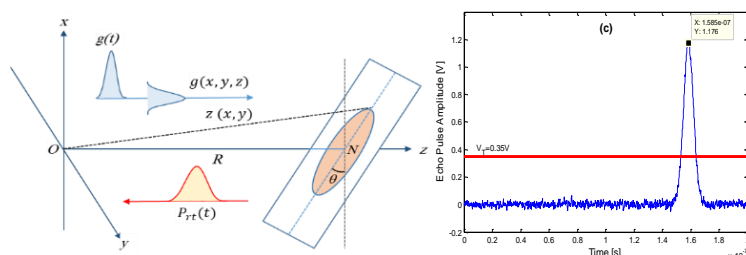
فاصله سنجی

لیزر پالسی

آستانه ثابت

تشخیص لبه پیشرو

چکیده گرافیکی



چکیده

برای ارزیابی و بهبود دقت مسافت طی شده بیم لیزری با فاصله ثابت، ابتدا باید رابطه سیگنال بازتاب لیزر پالسی که از سطح اجسام منعکس می‌شود، محاسبه و تحلیل شود. سپس، زاویه پهن‌شدگی سیگنال بازتاب و ضریب پهن‌شدگی نسبی، باید تعیین شوند. در این تحقیق رابطه‌ای تحلیلی برای اندازه‌گیری و تشخیص فاصله برای لیزر پالسی و سنجش آماری فاصله، طراحی شده است که در آن حداقل فاصله قابل اندازه‌گیری و محاسبات لازم برای برآورد کمی آن ارائه شده است. در این راستا، رابطه میان ضریب پهن‌شدگی و پارامترهای مربوطه مانند، فاصله آشکارسازی، زاویه تابش به سطح هدف و سیگنال انعکاس تابش، تعیین و ارزیابی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی نشان می‌دهند که حداکثر برد لیزر برای فاصله سنجی مطمئن ۳۶/۵ متر است که با خطای آماری ۰/۴۸-۰/۲۴ متر همراه است. با افزایش آستانه اندازه‌گیری، خطای فاصله سنجی و برد قابل اعتماد کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه تابش لیزر، زاویه واگرایی و ضریب پهن‌شدگی افزایش می‌یابد و با کاهش پهنای پالس لیزری، ضریب پهن‌شدگی کاهش می‌یابد. از آنجاکه افزایش زاویه سطح هدف باعث افزایش واگرایی سیگنال بازتاب می‌شود، مقادیر میانگین و واریانس سیگنال بازتاب نیز افزایش خواهد یافت.

۱- مقدمه

در مقالات [۴-۶] تأثیر شکل‌های مختلف هدف بر دقت فاصله سنجی رادار لیزری با روش شبیه‌سازی عددی تحلیل‌شده است و قانونی برای تغییرات فاصله سنجی در حضور پارامترهای مختلف مانند سطح مقطع راداری به‌دست‌آمده است. با این‌وجود، دقت و توزیع فاصله سنجی توسط سیگنال زمان با آستانه ثابت، بررسی نشده است.

دقت فاصله سنجی لیزری بر اساس سامانه لیدار در کارهای استیو استیون، کین استیون، ریچارد ریچموند و ارنست ارم-استرانگ مورد مطالعه قرار گرفته است و حد پایین دقت بر اساس روش کرامر-رائو و به کمک توزیع پیواسون به‌دست‌آمده است [۵ و ۶]. در مرجع [۷] معادلات طیف لیزر، منابع نویز در سیگنال‌های لیدار، امواج لیدار، اثرات انتشار جبهه موج بر پرتوی لیدار از طریق سامانه‌ی نوری تلاطم جوی، الگوریتم‌های آشکارسازی، محدوده‌یابی، ردیابی اهداف و شبیه‌سازی، بررسی‌شده‌اند. ژیانگ و همکاران [۸] و [۹] مشخصات توزیع فاصله نظری را تحت شرایط آشکارسازی سیگنال زمان بر مبنای آستانه ثابت و شناسایی زمان قله آن، به دست آورده‌اند.

جیان‌چنگ [۱۰] در ابتدا یک راه‌حل تحلیلی برای یافتن توزیع دامنه سیگنال لیزر بر اساس زمان طی شده ارائه کردند. تابع تحلیلی به‌دست‌آمده توزیع چگالی احتمال داده‌های طیفی را توصیف می‌کند. این عوامل برای طراحی مدار سنجش تأخیر سیگنال لیزر پالسی مهم هستند. در مقاله‌ی دیگر یک مدل تصادفی برای محاسبه‌ی عدم قطعیت زمانی در یک قله سیگنال ارائه‌شده است. در این تحقیق یک راه‌حل تحلیلی برای توزیع چگالی احتمال به‌دست‌آمده است که با اندازه‌گیری دامنه‌ی قله‌های متوالی، شکل موج را توصیف می‌کند. نتایج این تحقیق نشان داده است که توزیع چگالی احتمال با مشتق دوم سیگنال لیزر و توزیع احتمال نویز تفاضلی، متناسب است.

در مرجع [۱۱]، پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی فاصله‌سنجی لیزری را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین در مراجع [۱۲ و ۱۳] در مقاله‌ای رابطه‌ی بین خطاها در یک تداخل سنجی لیزری را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش یک فرمول تحلیلی برای ارزیابی این خطاها به‌طور واقع‌بینانه و بخشی برای شناسایی ویژگی‌های الگوریتم شیفت فاز

به علت سرعت بالای پرتو لیزر، فاصله‌یابی لیزری از اهداف ثابت در سال‌های اخیر کاربردهای زیادی یافته است. اندازه-گیری زمان تشخیص لبه جلویی سیگنال با آستانه ثابت، می‌تواند فاصله تا هدف را در زمان تقریباً حقیقی و با دقت نسبتاً خوب به دست دهد. تابع خطا در این سامانه به روش چپی‌شو در نظر گرفته‌شده است [۱ و ۲]. در این تحقیق مدار تشخیص فاصله تا هدف بر اساس روش مدار تأخیر زمانی استوار است.

در تجهیزات مجهز به فاصله‌یاب لیزری پالسی، فاصله تا هدف به‌طور مکرر با نمونه‌برداری در فواصل زمانی ثابت اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به سرعت بالای سامانه، زمان-های تأخیری که برای عبور سیگنال از مدارهای الکترونیکی و سامانه‌های آن وجود دارد، سنجش فاصله واقعی و زمان آن را با خطا همراه می‌کند؛ بنابراین برای عملکرد مطلوب فاصله‌یاب لیزری فاصله ثابت، لازم است که خطای تأخیر به نحوی با پیش‌اندازی پالس جبران شود. عوامل مؤثر در عملکرد فاصله‌یاب، گاهی باعث ایجاد خطای سیستماتیک می‌شوند و گاهی به علت طبیعت رفتاری‌شان، خطای غیر سیستماتیک یا تصادفی ایجاد می‌کنند.

کوچک‌سازی بخش‌های اپتیکی و الکترونیکی سامانه در ابعاد میلی‌متری با حفظ تolerانس‌های ساخت و دستیابی به تکرارپذیری مناسب، معمولاً در کاربردهای مختلف، مطلوب و لازم است. بدین منظور، ارتباط بین پارامترهای مؤثر در خطای اندازه‌گیری و توزیع آماری پاسخ سامانه و حدود عملکردی مورد انتظار آن‌ها در این تحقیق تعیین و تحلیل شده‌اند.

توزیع ویژگی‌های آماری فاصله سنجی محدودیت‌های مشخصی دارد. گرونوال و همکاران [۳] تأثیر پارامترهای مختلف شکل هدف را بر سطح مقطع رادار لیزری تحلیل کرده‌اند اما توزیع فاصله سنجی را مورد مطالعه قرار نداده‌اند. با این‌حال، تأثیر مشخصات سطح هدف بر توزیع فاصله سنجی در کار آن‌ها نادیده گرفته‌شده و شکل موج دریافتی همانند شکل موج ارسال‌شده فرض شده است و تأثیر پهن‌شدگی شکل موج بر فاصله سنجی نیز لحاظ نشده است.

های عملیاتی آنها می‌توان این نوع تأخیر را تا حد لازم کاهش دهد. البته، خطای ناشی از فرآیندهای تصادفی که به علت شرایط محیطی یا عدم قطعیت در عملکرد سامانه ایجاد می‌شود به صورت جداگانه بررسی و تحلیل خواهد شد.

۱-۲- مدل سازی بازتاب بر اساس سطح هدف

برای فاصله سنجی به کمک لیزر پالسی می‌توان از معادله رادار موج کوتاه استفاده کرد [۷، ۱].

$$P_r = P_0 \frac{\sigma}{4\pi A_T} \frac{A_r}{R^2} \eta_{atm}^2 \eta_{opt} \quad (1)$$

که در آن، P_0 توان سیگنال لیزر ارسالی، A_T مساحت مقطع عرضی هدفی که پرتو می‌بیند، σ ضریب پراکندگی مقطع عرضی هدف، A_r مساحت دیافراگم گیرنده، R فاصله از هدف، η_{opt} راندمان انتقال بیم نوری و η_{atm} ضریب تضعیف جوی یک طرفه است که به صورت زیر محاسبه می‌شود، که در آن $\eta_{atm} = e^{-\zeta R}$ که در آن ζ ضریب تضعیف جوی است. از آنجاکه فرستنده و گیرنده اپتیکی سامانه معمولاً در کنار هم قرار دارند و فاصله آنها از هم در مقایسه با فاصله سامانه تا هدف کوچک است، می‌توان موقعیت ارسال و دریافت اپتیکی را عملاً یک نقطه فرض کرد؛ بنابراین، با توجه به میدان دید کوچک پالس لیزری، توزیع گوسی و واگرایی چند درجه‌ای، هدف می‌تواند به صورت یکنواخت و مسطح در نظر گرفته شود. از این رو، در مورد سطح مقطع پراکندگی لیزری می‌توان نوشت [۲]:

$$\sigma = 4\pi f(\theta) \cos(\theta) A_T \quad (2)$$

در اینجا، θ زاویه شیب هدف و $f(\theta)$ ضریب پراکندگی سطح هدف می‌باشد؛ بنابراین، تحت شرایط لامبرترین برای ضریب پراکندگی می‌توان نوشت:

$$f(\theta) = \rho/\pi$$

که در آن ρ ضریب بازتاب سطح هدف است. با جایگذاری (۲) در (۱) نتیجه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P_r(R) = \frac{P_0 \rho A_r \cos(\theta)}{\pi R^2} \eta_{atm}^2 \eta_{opt} \quad (3)$$

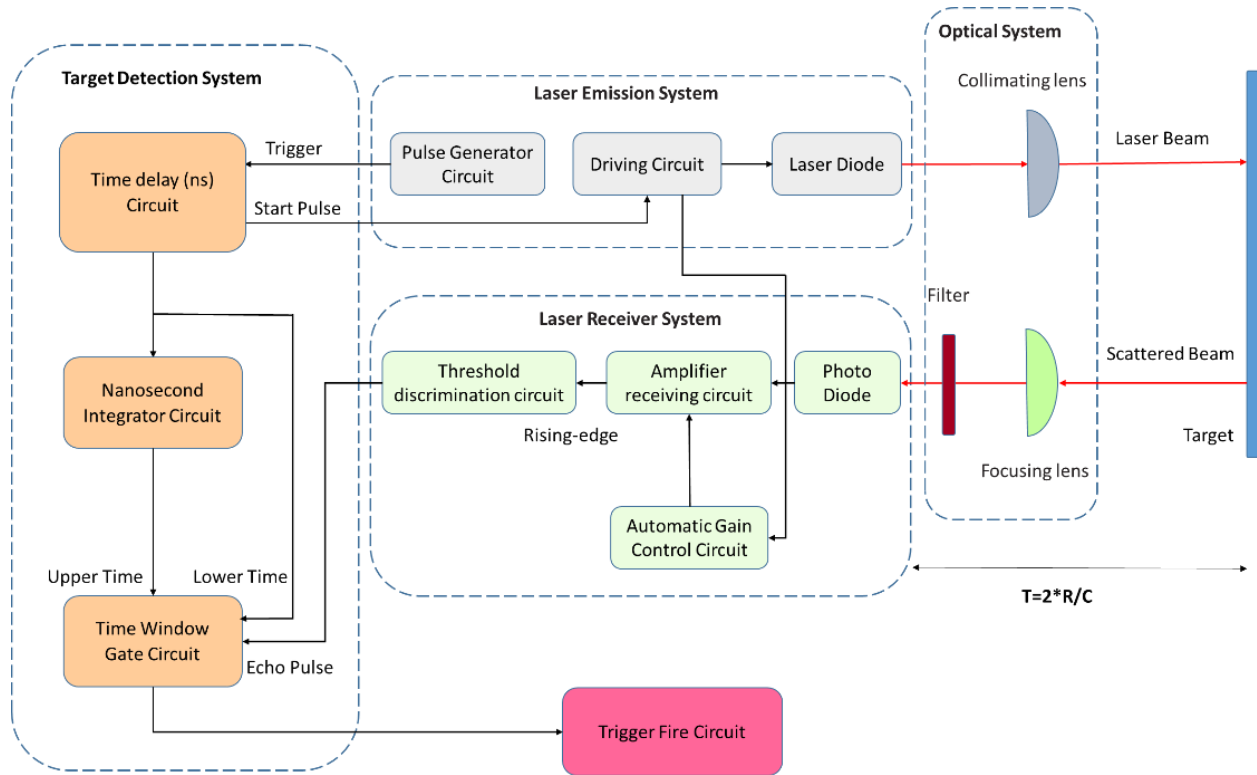
هرگاه محیط انتقال و مشخصات سطح هدف تغییر نکنند، قانون تضعیف شار نوری به وسیله (۳) توصیف می‌شود.

بهینه به دست آمده است. تائو و همکاران [۱۴ و ۱۵] با ساخت یک تراشه و استفاده از تکنیک حافظه قابل دسترسی تصادفی، RAM و برنامه ریزی یک FPGA توانستند اختلاف فاز سیگنال‌های تابش و بازتابش را با سرعت قابل قبولی اندازه‌گیری کنند. این سامانه می‌تواند برای آزمایش شاخص‌های عملکردی تراشه اصلی OPA استفاده شود و کنترل سرعت بالا اندازه‌گیری را در محدوده فرکانسی وسیعی ایجاد کند. در مرجع [۱۶]، جاوید و همکاران متغیرهای پلاسمایی لیزر یاقوت نئودیوم را تحت فشارهای مختلف گاز خنثی و تابش ثابت بررسی کرده و ارتباط آنها با میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ایجاد شده توسط پرتو را تخمین زده‌اند. در مراجع [۱۶ و ۱۷] تنظیمات هم‌زمان برای تصویربرداری لیزری برای مطالعه‌ی پلاسمای تشکیل شده توسط لیزر پالسی در خلأ را مورد بررسی و تحلیل قرار داده‌اند. این مطالعه مقادیر قابل توجهی داده‌های دقیق از محل برخورد و برهمکنش پالس‌های لیزر را تولید می‌کند.

در ادامه ساختار مقاله به شرح زیر بیان شده است. در بخش ۲، مروری بر ادبیات موضوع ارائه شده است. در بخش ۳، مباحث نظری مرتبط با کار انجام شده، معادلات حاکم و روش‌های مدل‌سازی آنها معرفی شده‌اند. در پایان این بخش؛ یعنی، زیر بخش ۳-۶، مدار الکترونیکی طراحی شده برای اندازه‌گیری تأخیر زمانی بین سیگنال ارسالی و بازتاب آن توضیح داده شده و نمودار پاسخ آن رسم شده است. در بخش ۴، نتیجه‌گیری شامل تحلیل خطاهای سامانه، برآورد کیفیت رفتار، احتمال آشکارسازی و مشخصات آماری فاصله سنجی بیان و توضیح داده شده است.

۲- مباحث نظری و روش انجام کار

چیدمان بلوکی و فرآیند منطقی سامانه مترولوژی لیزر پالسی استفاده شده در این تحقیق، در شکل ۱ خلاصه شده است. بخش‌های مختلف این سامانه با توجه به تأخیر ناشی از خطاهای سیستماتیک و تأخیر ناشی از خطاهای تصادفی دسته‌بندی شده‌اند. بخش‌های تحریک، راه‌انداز، دیود لیزری، فتودیود، تقویت‌کننده و مدارهای دیجیتال اصولاً با یک تأخیر ثابت که مربوط به مشخصه‌های این قطعات است، همراه می‌باشند. انتخاب مناسب قطعات با توجه به مشخصه-



شکل (۱): نمودار بلوکی سامانه لیزر پالسی به روش تأخیر زمانی.

$$\sigma = 4\pi \cos(\theta) A_T \int_A q \left(t - \frac{2z(x,y)}{c} \right) g(x,y) f(x,y,z) dA \quad (5)$$

در اینجا c سرعت نور و $f(x,y,z)$ تابع توزیع بازتاب دوطرفه صفحه هدف موردنظر می‌باشد [۴، ۱]:

$$f(x,y,z) = \frac{A}{\cos^6(\theta)} \exp\left(-\frac{\tan^2(\theta)}{S^2}\right) + B \cos^m(\theta) \quad (6)$$

در معادله (۶)، عبارات اول و دوم به ترتیب مؤلفه‌های بازتاب انعکاسی و انکساری، BRDF، هستند و در آن θ زاویه برخورد، A دامنه بازتاب انعکاسی، B دامنه بازتاب انکساری، S شیب سطح هدف و m ضریب بازتاب انکساری هستند. پاسخ ضربه‌ای بازتاب لیزر به مشخصات سطح هدف مرتبط است و پاسخ ضربه‌ای $h(t)$ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۴]:

$$h(t) = 4\pi \cdot f(x,y,z) \cos(\theta) A_T \int_A \delta\left(t - \frac{2z(x,y)}{c}\right) g(x,y) dA \quad (7)$$

ولی به‌طور کلی، این رابطه نمی‌تواند مستقیماً شکل موج سیگنال پالس و تغییر آن را در فرآیند انتقال توصیف کند. این رابطه همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای تحلیل دقیق توان آشکارسازی مناسب نیست. البته، لیزر پالسی در راستای محور z به تدریج به هدف نزدیک می‌شود و سیگنال پالسی وابسته به توزیع زمانی و توزیع مکانی سیگنال بازگشتی را دریافت می‌کند که می‌توان آن را به صورت زیر توصیف کرد [۶]:

$$P(x,y,z,t) = P_0 q(t) g(x,y,z) \quad (4)$$

به‌طوری‌که $q(t)$ و $g(x,y,z)$ به ترتیب توزیع به‌همچار شده زمانی و مکانی پالس‌های لیزری می‌باشند. بر اساس روابط (۲) و (۴)، رابطه بین سطح مقطع پراکنندگی هدف با مشخصات پاسخ مکانی-زمانی را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲]:

گوسی با میانگین صفر باشد، تابع چگالی احتمال نویز را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۱۰].

$$\rho(V_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} V_n} \exp\left(-\frac{V_n^2}{2V_n^2}\right) \quad (12)$$

در این رابطه دامنه ولتاژ سیگنال نویز بدون تداخل سیگنال بازتاب که یک فرآیند تصادفی است، می‌باشد و \bar{V}_n میانگین مقادیر ولتاژ نویز است. اگر \bar{V}_n معلوم باشد، احتمال آشکارسازی و احتمال هشدارهای کاذب بر اساس رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

۲-۳- احتمال آشکارسازی و احتمال هشدار کاذب

با فرض اینکه آستانه آشکارسازی بر روی V_T تنظیم شده باشد، ریشه میانگین مربع نویز هنگامی که سیگنال بازتاب لیزر وجود ندارد به صورت \bar{V}_n می‌باشد و احتمال هشدار کاذب برای آستانه ثابت توسط (۱۲) به دست می‌آید.

$$P_F = \int_{V_T}^{\infty} \rho(V_n) dV_n = \int_{V_T}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} V_n} \exp\left(-\frac{V_n^2}{2V_n^2}\right) dV_n \quad (13)$$

رابطه (۱۳) را می‌توان با یک تابع خطا به صورت زیر مدل کرد.

$$\text{erf} = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (14)$$

بنابراین، رابطه احتمال هشدار کاذب با استفاده از (۱۲) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$P_F = 0.5 - 0.5 \text{erf}\left(\frac{V_T}{\sqrt{2} V_n}\right) \quad (15)$$

نسبت آستانه آشکارسازی به ریشه میانگین مربع نویز بدون سیگنال بازتاب لیزری که از این پس نسبت آستانه به نویز نامیده می‌شود، به کمک رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\text{TNR} = \frac{V_T}{V_n} \quad (16)$$

با جایگذاری رابطه (۱۵) در (۱۴) رابطه زیر به دست می‌آید.

$$P_F = 0.5 - 0.5 \text{erf}\left(\frac{\text{TNR}}{\sqrt{2}}\right) \quad (17)$$

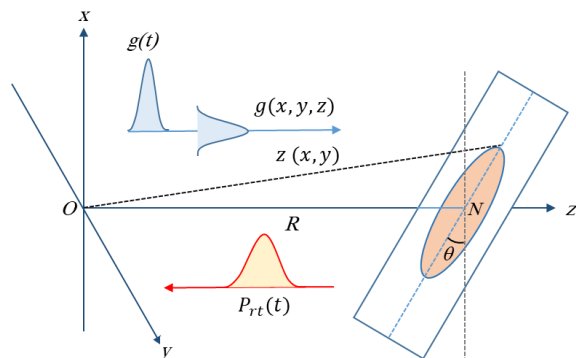
رابطه بین احتمال هشدار کاذب P_F و نسبت آستانه به نویز TNR که با معادله (۱۶) محاسبه می‌شود، در شکل ۳ رسم شده است. در شکل ۳ مشاهده می‌شود که احتمال هشدار

به طوری که $\delta(\cdot)$ تابع دیراک و $z(x,y)$ فاصله سامانه آشکارسازی تا هر نقطه بر روی هدف می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$z(x,y) = \sqrt{(z_0 + x \tan(\theta))^2 + x^2 + y^2} \quad (8)$$

از آنجا که $x, y \ll z_0$ می‌توان نوشت:

$$z(x,y) \approx R + x \tan(\theta) \quad (9)$$



شکل (۲): شماتیک سامانه آشکارسازی لیزری پالسی با زاویه‌ی شیب هدف.

با توجه به شکل موج سیگنال پالسی ورودی $q(t)$ در حوزه زمان، شکل موج سیگنال خروجی را می‌توان با کانولوشن سیگنال ورودی و تابع پاسخ ضربه‌ای به دست آورد.

$$S(t) = q(t) \times h(t) \quad (10)$$

در ادامه حساسیت آشکارسازی با استفاده از رابطه (۱۱) به صورت زیر به دست می‌آید.

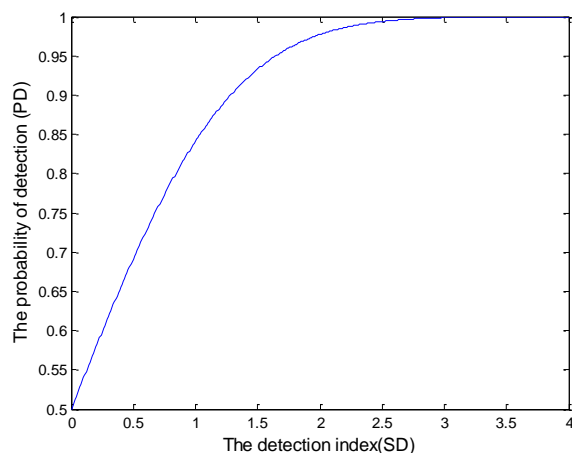
$$V_{rt}(t, R) = S_i A_f \frac{P_0 \cdot \pi \cdot f(x, y, z) A_r \cos(\theta)}{R^2 \cdot \gamma(R)} \eta_{atm}^2 \cdot \exp\left(-\frac{(t - \frac{2R}{c})^2}{\tau^2 \cdot \gamma^2(R)}\right) \quad (11)$$

که در آن $S_i = (A/W)$ حساسیت آشکارسازی دیود نوری به جریان الکتریکی می‌باشد و A_f ضریب تقویت ولتاژ مدار تقویت کننده است.

۲-۲- توزیع آماری داده‌های فاصله سنجی

معمولاً سیگنال نویز را می‌توان با توزیع گوسی توصیف کرد؛ بنابراین با فرض اینکه نویز دریافتی سامانه به صورت نویز

شاخص آشکارسازی SD را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که PD با افزایش SD افزایش می‌یابد و وقتی که شاخص آشکارسازی $SD = 4$ باشد احتمال آشکارسازی $P_D = 99.997\%$ است.



شکل (۴): رابطه بین احتمال آشکارسازی PD و شاخص آشکارسازی SD.

۳- مشخصات آماری احتمال فاصله سنجی

سیگنال بازتاب آشکارسازی در بعد زمان به صورت زیر محاسبه می‌شود.

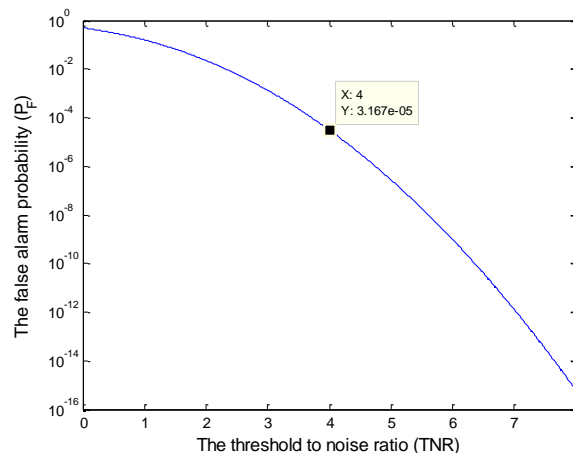
$$V(t) = V_n + V_{rt}(t) \quad (20)$$

بر اساس معادله احتمال آشکارسازی (۱۹)، اگر پالس بازتاب لیزر توسط یک تشخیص‌دهنده آستانه ثابت شناسایی شود، احتمال آشکارسازی پالس پیش از زمان t به وسیله رابطه زیر تعیین قابل تخمین است.

$$P_D = \int_{V_r}^{\infty} \varphi(V(t)).dV(t) \quad (21)$$

برای شناسایی پالس بازتاب لیزر در تشخیص‌دهنده آستانه ثابت، معمولاً از مد تریگر لبه جلوی سیگنال استفاده می‌شود؛ بنابراین تنها خیز لبه جلوی پالس در نظر گرفته می‌شود، یعنی $t < t_0$. بدین ترتیب، طبق رابطه (۲۱) می‌توان احتمال آشکارسازی پالس بین t و $t + \Delta t$ را محاسبه کرد. در اینجا، یک محدوده اندازه‌گیری مطمئن، α که اغتشاشات را نیز در نظر می‌گیرد، معرفی شده است. در واقع سطح

کاذب با افزایش نسبت آستانه به نویز کاهش می‌یابد. برای اینکه احتمال هشدار کاذب از 10^{-5} کمتر شود باید نسبت آستانه به نویز چهار یا بیشتر باشد؛ یعنی آستانه آشکارسازی حداقل چهار برابر ریشه میانگین مربع نویز بدون سیگنال بازتاب لیزری باشد.



شکل (۳): نمودار احتمال هشدار کاذب، P_f ، بر حسب نسبت آستانه به نویز، TNR.

۴-۲- شبیه‌سازی سیگنال بازتاب مخدوش با نویز

برای ساده‌سازی تحلیل، در این تحقیق سیگنال Vs پایدار فرض شده است. هرگاه فقط یک بازتاب وجود داشته باشد، سیگنال خروجی آشکارساز را می‌توان به صورت یک سیگنال بازتاب مخدوش با نویز افزوده به صورت زیر مدل کرد.

$$V = V_s + V_n \quad (18)$$

در اینجا، ولتاژ V_s دامنه سیگنال بازتاب ایده‌آل نامیده شده است. تابع چگالی احتمال برای سیگنال خروجی آشکارساز به صورت زیر به دست می‌آید [۱۰].

$$\varphi(V_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \bar{V}_{sn}} \exp\left(-\frac{(V-V_s)^2}{2\bar{V}_{sn}^2}\right) \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)، \bar{V}_{sn} ریشه میانگین مربع ولتاژ نویز در حضور سیگنال بازتاب می‌باشد. معمولاً میانگین مربع ولتاژ نویز یادشده از نویز شوت نوری، نویز جریان تاریک، نویز حرارتی و نویز مدار تقویت‌کننده تشکیل می‌شود. در واقع، \bar{V}_{sn} همیشه بیشتر از \bar{V}_n است، و \bar{V}_{sn} برای بازتاب‌های پالسی مختلف، متفاوت است. شکل ۴ رابطه بین احتمال آشکارسازی P_D و

جدول (۱): پارامترهای فاصله سنجی لیزری

پارامتر	مقدار	واحد
P_o	۲۵	W
A_r	۴۹۰/۹	mm ²
η_{opt}	۰/۶۷	-
ζ	۰/۲۷	km ⁻¹
ρ	۰/۳	-
θ	۴۵	o
τ	۱۰	ns
λ	۹۰۵	nm
ϕ	۳۰	mrad
Si	۰/۵	A/W
A_f	$1/2 \times 10^{-6}$	-
B_w	۹۶/۸	MHz
\bar{V}_n	$32/24 \times 10^{-3}$	V
$f(x,y,z)$	ρ/π	-

۲-۳- تأثیر فاصله بر سیگنال بازتاب

تغییر توان دریافتی در فواصل مختلف بر اساس روابط (۳) و (۱۱) در شکل ۵ نشان داده شده است. منحنی $P_r(R)$ توان سیگنال بازتاب مربوط به آشکارسازی نور پیوسته را بدون در نظر گرفتن شکل موج بازتاب، توان قله سیگنال بازتاب و تضعیف پهن‌شدگی نشان می‌دهد. شکل ۵ بیان‌گر این است که در فواصل نزدیک اختلاف بین این دو مقدار کوچک است و با افزایش فاصله اندازه اختلاف بین این دو مقدار افزایش می‌یابد. شکل موج بازتاب آستانه ثابت ایده‌آل در فواصل مختلف از هدف، بر اساس معادله (۱۱)، در شکل ۶ ارائه شده است. آستانه در مقدار $0/1377$ تنظیم شده است و محور افقی میزان انحراف از مقدار واقعی در زمان توقف را نشان می‌دهد. شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش فاصله، نویز \bar{V}_n کاهش می‌یابد و نویز با مربع فاصله نسبت معکوس دارد. مثلاً، تا فاصله ۲۰ متر با سرعت بیشتری تضعیف می‌شود و پس از ۲۰ متر با سرعت آرامتری تضعیف می‌شود و به تدریج نمودار آن تقریباً مسطح می‌شود.

اطمینان داده‌ها $1 - \alpha$ است که توسط رابطه زیر به دست می‌آید.

$$P\{r_a \leq r \leq r_b\} = \int_{r_a}^{r_b} p(r) \cdot dr = 1 - \alpha \quad (22)$$

حال، فواصل اعتماد مرزی $[r_a, r_b]$ را می‌توان به دست آورد، اما عملاً بی‌نهایت فاصله اعتماد وجود دارد. فاصله اطمینان بهینه با افزودن شرط $p(r_a) = p(r_b)$ از طریق رابطه (۲۳) به دست می‌آید،

$$\int_{r_L}^{r_H} p(r) dr = 1 - \alpha ; p(r_H) = p(r_L) \quad (23)$$

بنابراین، $[r_L, r_H]$ فاصله قابل اطمینان بهینه به ازای توزیع داده‌های فاصله سنجی استفاده شده می‌باشد و $(r_H - R)$ و $(r_L - R)$ به ترتیب مرزهای بالا و پایین خطای فاصله سنجی هستند. در نتیجه، هرگونه خطا که خارج از این محدوده باشد، به عنوان خطای بیش‌ازحد قابل قبول در نظر گرفته خواهد شد. بر این اساس در محدوده اطمینان، تفاوت بین مقدار میانگین خطای داده‌ها و مقدار فاصله واقعی که به آن انحراف سیستم اطلاق می‌شود، به شرح زیر قابل محاسبه است.

$$\bar{r}_{sys} = \int_{r_L}^{r_H} p(r) \cdot r dr - R \quad (24)$$

مرزهای بالا و پایین خطا به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\begin{cases} E_{upper} = (r_H - \bar{r}_{sys} - R) \\ E_{lower} = (r_L - \bar{r}_{sys} - R) \end{cases} \quad (25)$$

دقت فاصله‌یابی اساساً از برهم نهش خطای سیستمی و خطای آماری به دست می‌آید. اصولاً خطای سیستمی مقداری ثابت دارد و تا حدود زیادی می‌توان آن را از طریق روش‌های تجربی مانند تنظیم یا الگوریتم‌های جبران‌سازی اصلاح کرد.

۱-۳- عوامل مؤثر بر توزیع فاصله سنجی

این مقاله روی قابلیت‌های آشکارسازی و قوانین حاکم بر مترولوژی لیزری فاصله ثابت تمرکز دارد. پارامترهای سامانه آشکارساز لیزری به وسیله پارامترهای محیطی و مشخصات فیزیکی هدف تنظیم می‌شود. پارامترهای مؤثر بر توزیع احتمال فاصله سنجی در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

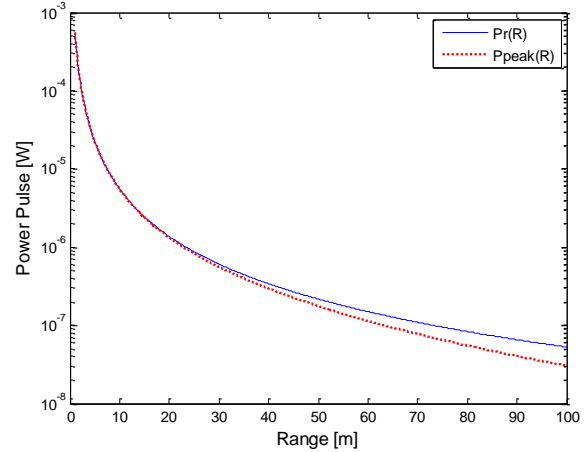
۳-۳- تأثیر فاصله بر قابلیت آشکارسازی

نرخ هشدار کاذب و احتمال آشکارسازی معیارهای مهمی برای ارزیابی قابلیت اطمینان فاصله یابی محسوب می شوند. از روابط (۱۵) و (۱۹) می توان نتیجه گرفت که \bar{V}_n مستقل از فاصله آشکارسازی است و نرخ هشدار کاذب با معکوس مقدار آستانه V_T متناسب است. به طور کلی، برای آشکارسازی مطمئن، نرخ هشدار کاذب نباید از 10^{-5} بیشتر باشد و احتمال آشکارسازی نباید از 0.995 کمتر باشد. با در نظر گرفتن روابط (۱۱)، (۱۵) و (۱۹) به طور هم زمان، می توان نوشت.

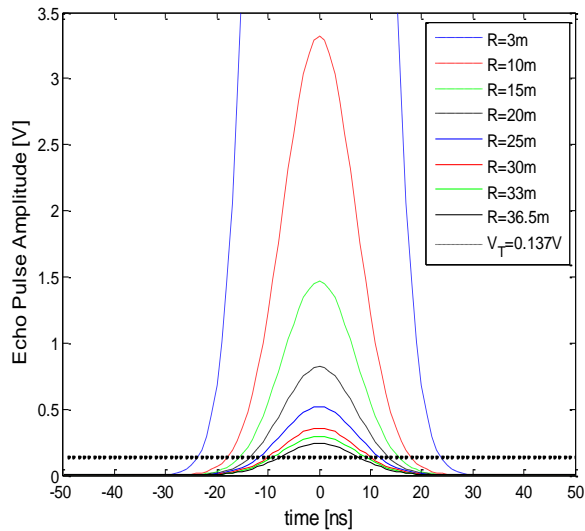
$$\begin{cases} \frac{V_T}{\bar{V}_n} \geq 4 \cdot 26489 \\ \frac{V_T - V_{peak}(R)}{\bar{V}_{sn}(R)} \leq -3.29053 \end{cases} \quad (26)$$

مقدار آستانه ای که این شرط را برآورده می سازد عبارت است از: $V_T \geq 0.137$ و برد مربوطه در زاویه شیب $\theta = 45^\circ$ عبارت می شود از: $R \leq 36.6 \text{ m}$ ، یعنی، حداکثر برد قابل اندازه گیری مطمئن سامانه به ازای مقدار آستانه $V_{Tmin} = 0.137$ عبارت است از: $R_{max} = 36.6 \text{ m}$ ؛ بنابراین، برد اندازه گیری قابل اطمینان لزوماً از حداکثر برد قابل اندازه گیری مطمئن کوچک تر است.

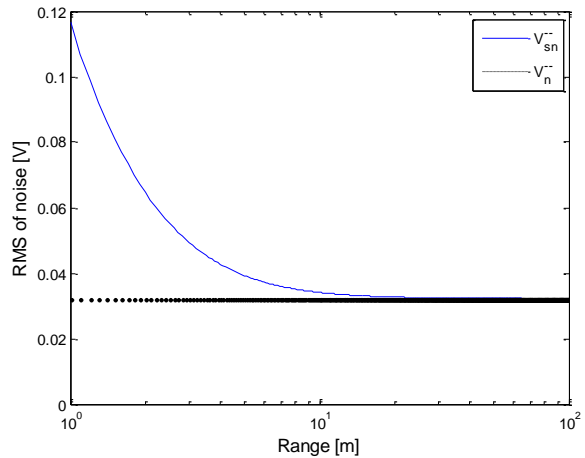
شکل ۸ برد قابل اندازه گیری مطمئن برحسب مقادیر مختلف آستانه در بازه کاری 1 mV و با زاویه شیب سطح هدف $\theta = 45^\circ$ را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که تغییرات کوچکی در مقادیر آستانه می تواند تغییرات قابل توجهی در برد قابل اندازه گیری ایجاد کند. همان طور که در شکل ۸ دیده می شود، هنگامی که آستانه تا حدود 600 mV افزایش یابد، برد قابل اندازه گیری کمتر می شود. طبق آنالیز انجام شده در بخش قبلی، مقادیر آستانه مختلفی می تواند انتخاب شود، رابطه بین فاصله آشکارسازی به ازای مقادیر مختلف آستانه و خطای اندازه گیری در سیستم ایده آل در شکل ۹ تحلیل شده است. همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، خطای سیستم با فاصله تشخیص رابطه معکوس دارد ولی نرخ تغییرات آن خطی نیست. همان طور که انتظار می رود در میانه نمودار دامنه اندازه گیری خطای سیستم می تواند به صورت خطی تقریب



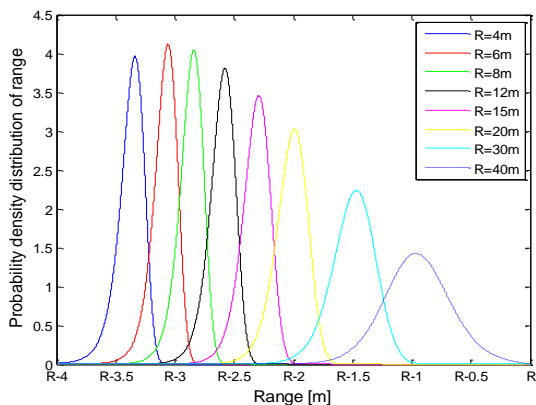
شکل (۵): توان بازتاب در فواصل آشکارسازی مختلف.



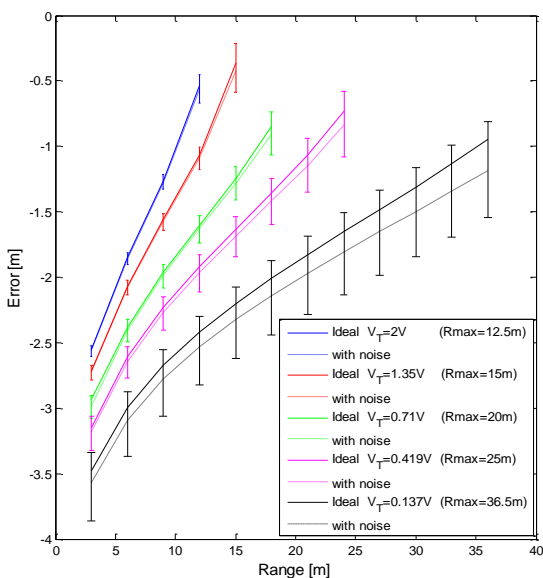
شکل (۶): شکل موج بازتاب در فواصل آشکارسازی مختلف.



شکل (۷): مقدار RMS نویز در فواصل آشکارسازی مختلف.



شکل (۱۰): توزیع چگالی احتمال فاصله سنجی در مسافت‌های مختلف.



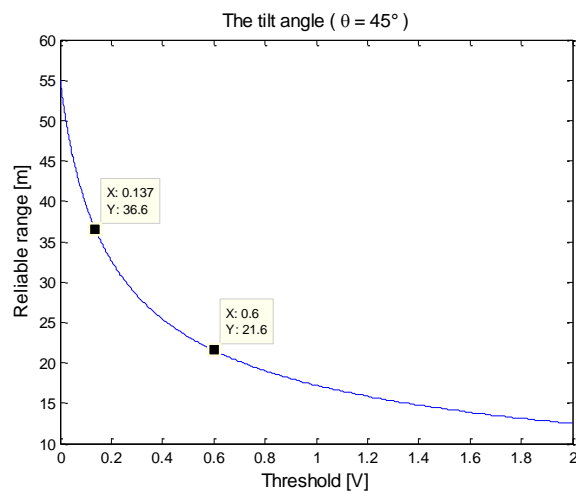
شکل (۱۱): خطای فاصله سنجی به ازای مقادیر آستانه متفاوت و در فواصل مختلف.

همان‌طور که از شکل ۱۱ دیده می‌شود، به دلیل تأثیر نویز، خطاهای سیستم در محدوده اندازه‌گیری قابل‌اعتماد بسیار بزرگ‌تر از خطاهای سیستم ایده آل است. تفاوت بین این دو تنها در مسافت‌های کوتاه، نسبتاً کوچک است. با افزایش آستانه، خطاهای سیستم به تدریج به خطاهای سیستم ایده آل نزدیک می‌شوند. مثلاً، با افزایش مقدار آستانه به ۲ ولت خطای تصادفی به 0.103 متر کاهش می‌یابد و حداکثر فاصله اندازه‌گیری قابل‌اعتماد $12/5$ متر می‌شود.

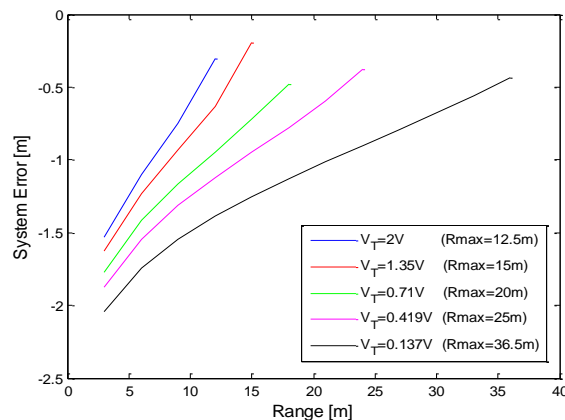
تغییر زاویه شیب صفحه هدف باعث پهن‌شدگی و تضعیف قله ولتاژ بازتاب لیزری می‌شود. پهن‌شدگی پالس بازتاب به ازای مقادیر مختلفی مانند زاویه سطح هدف θ ، پهنای پالس

زده شود اما نرخ تغییرات در هر دو طرف محدوده اندازه‌گیری نسبتاً بزرگ است؛ این به علت شکل موج پالسی و توزیع گوسی آن می‌باشد.

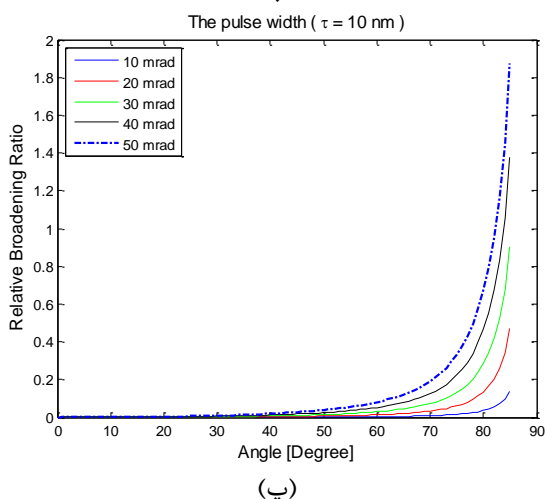
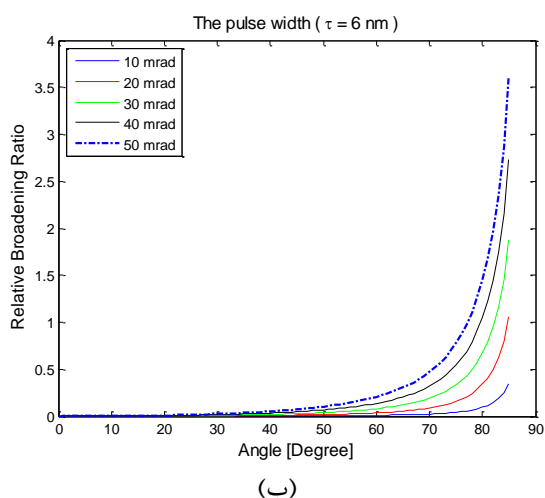
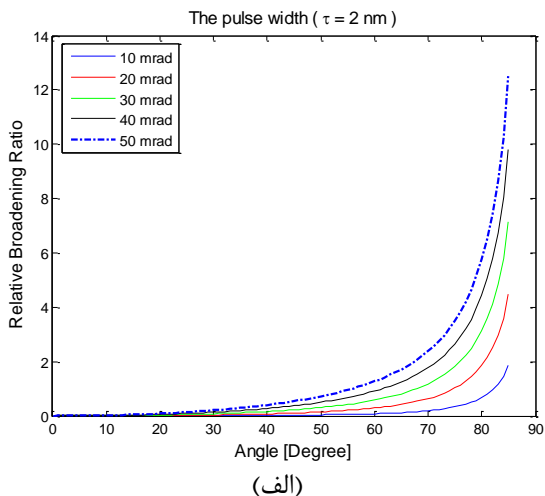
شکل ۱۰ منحنی توزیع داده‌های فاصله سنجی در فواصل مختلف به ازای کمترین مقدار آستانه را ارائه می‌کند. برای بیان ساده‌تر مطلب، مقادیر فاصله واقعی به‌طور یکنواخت به محور R منتقل شده‌اند. توزیع نقاط عمل واقعی مترولوژی در فاصله از پیش تعیین‌شده به‌خوبی می‌تواند با منحنی توزیع ویبول یا گوسی توصیف شود. معمولاً، برای اندازه‌گیری توزیع داده‌های فاصله سنجی سطح اعتماد $1 - \alpha = 95\%$ مطابق معادلات (۲۱، ۲۲، ۲۳ و ۲۴) لازم است. مقایسه بین خطای سیگنال بازتاب ایده‌آل و خطای سیگنال بازتاب نویز در آستانه‌های مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل (۸): نمودار برد قابل‌اندازه‌گیری برحسب مقادیر مختلف آستانه.



شکل (۹): نمودار خطای سیستم ایده‌آل برحسب فاصله، به ازای مقادیر مختلف آستانه.



شکل (۱۲): نسبت پهن‌شدگی نسبی با θ ، φ ، و τ مختلف:
(الف) $\tau = 2 \text{ ns}$ ؛ (ب) $\tau = 6 \text{ ns}$ ؛ (پ) $\tau = 10 \text{ ns}$.

لیزر τ و زاویه واگرایی پرتو لیزر φ ، ارتباط دارد. به فرض اینکه فاصله آشکارسازی ۲۰ متر باشد، رابطه بین پهن‌شدگی سیگنال B_R و پارامترهای θ ، φ و τ در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

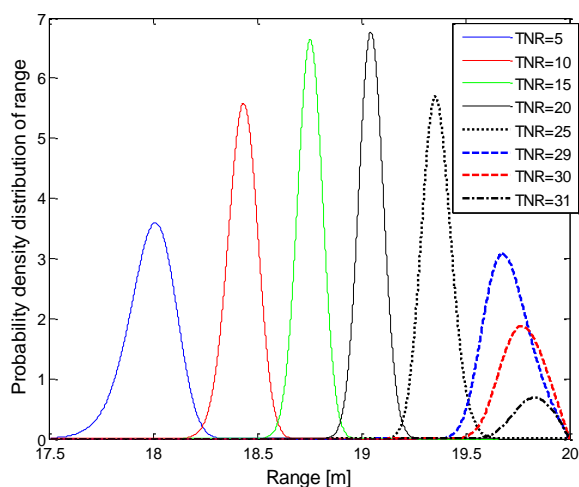
از شکل ۱۲ الف می‌توان نتیجه گرفت که: هرگاه زاویه واگرایی سیگنال ارسالی لیزر و پهنای پالس ثابت باشند، نسبت پهن‌شدگی نسبی سیگنال بازتاب با افزایش زاویه شیب سطح هدف افزایش می‌یابد. با مقایسه شکل‌های ۱۲ الف تا ۱۲ پ، هرگاه زاویه واگرایی و زاویه شیب ثابت باشند، نسبت پهن‌شدگی نسبی با کاهش τ افزایش می‌یابد و هرچه پالس باریک‌تر باشد، پهن‌شدگی پالس بازتاب شدیدتر خواهد بود؛ بنابراین، افزایش پهنای پالس لیزر ارسالی برای کاهش پهن‌شدگی پالس برگشتی ناشی از تغییر زاویه شیب، سودمند است. باین‌وجود، افزایش پهنای پالس بر توزیع فاصله قاب اندازه‌گیری اثر می‌گذارد. لذا، مهم است که پهنای پالس لیزر ارسالی به صورتی مناسب و با در نظر گرفتن جمیع نکات فوق انتخاب شود.

۴-۳- تأثیر شیب سطح هدف بر توزیع برد

با فرض اینکه فاصله تا هدف ۲۰ m و مقدار آستانه ۰.۳۵ V باشند، توزیع چگالی احتمال در زاویه‌های شیب مختلف سطح هدف، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که نمودار تابع چگالی احتمال فاصله با افزایش زاویه سطح شیب هدف، پهن‌تر می‌شود.

در شکل ۱۴ سیگنال‌های بازتاب لیزر به ازای زاویه‌های مختلف شیب سطح هدف، نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه شیب هدف، دامنه سیگنال بازتاب کاهش می‌یابد و پهن می‌شود. با توجه به شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که در زاویه شیب هدف $\theta = 0^\circ$ سیگنال بازتاب پهن نمی‌شود و پهنای پالس بازتاب نزدیک به همان مقدار ۱۰ ns است. در $\theta = 20^\circ$ ، پهن‌شدگی نسبی هنوز کوچک است و در $20^\circ < \theta < 40^\circ$ ، نسبت پهن‌شدگی نسبی و هم‌چنین پهن‌شدگی بازتاب به آهستگی افزایش می‌یابد.

نسبت آستانه به نویزهای مختلف با فرض اینکه فاصله تا هدف ۲۰ m، زاویه شیب سطح هدف ۰° و نسبت سیگنال به نویز $SNR = 30$ ، نشان داده شده است.



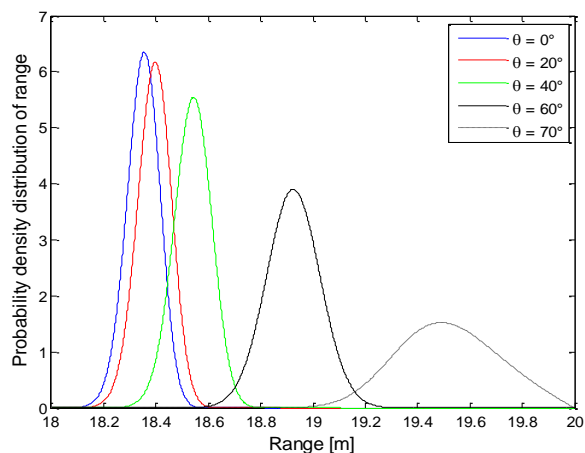
شکل (۱۵): توزیع چگالی احتمال فاصله برای TNR مختلف.

در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش TNR، تابع چگالی احتمال فاصله سنجی به سمت راست جابجا می‌شود، یعنی میانگین فاصله سنجی تقریباً به سمت مقدار ۲۰ متر جابجا می‌شود. هرگاه $TNR < SNR$ باشد، توزیع چگالی احتمال فاصله سنجی گوسی است. هرگاه $TNR = SNR$ ، توزیع چگالی احتمال فاصله سنجی به سمت راست مایل می‌شود و قله احتمال آشکارسازی به ۲۰ متر می‌رسد.

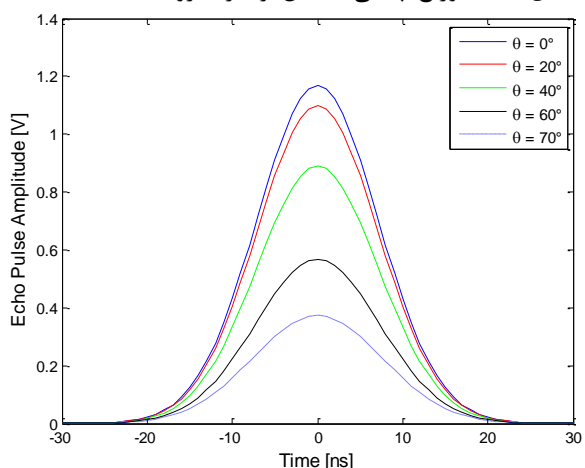
۳-۶ طراحی و تست مدارهای فاصله سنجی

برد مدار الکترونیکی درایور دیود لیزری و برد مولد پالس‌های باریک الکتریکی سرعت بالا به صورت آزمایشگاهی ساخته و تست شده‌اند. پارامترهای اصلی درایور دیود لیزری قبلاً در جدول ۱ ارائه شد.

شکل ۱۶ تصویر مدار ساخته شده برای درایور دیود لیزر و تابلوهای مدار مولد پالس‌های باریک را نشان می‌دهد. در سیستم گیرنده، از یک تقویت کننده یک مرحله‌ای برای ترانس ایمدانس استفاده شده است که در آن مقدار جریان $A_f = 1.2 \times 10^3$ و ولتاژ $\bar{V}_n = 98 \mu V$ است. سایر پارامترهای سیستم گیرنده مانند پارامترهای موجود در جدول ۱ هستند. سیگنال بازتاب لیزری اندازه‌گیری شده در فاصله ۳/۵ متری از هدف در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل (۱۳): توزیع چگالی احتمال برد برای زوایای شیب مختلف.



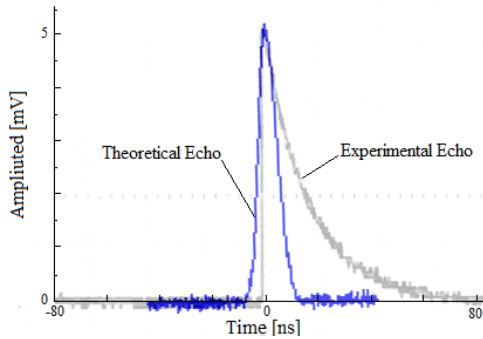
شکل (۱۴): سیگنال‌های بازتاب برای زوایای شیب مختلف.

در زاویه شیب هدف $40^\circ \leq \theta < 60^\circ$ ، در مقایسه با بازه $20^\circ < \theta < 40^\circ$ لبه بالارونده به تدریج صعود می‌کند و باعث جابجایی رو به عقب فاصله زمانی لبه بالارونده می‌شود. همچنین، شکل موج چگالی احتمال برد کمی پهن می‌شود و واریانس آن افزایش می‌یابد. در زاویه شیب $60^\circ \leq \theta < 70^\circ$ ، نسبت‌های پهن‌شدگی نسبی و پهن‌شدگی بازتاب به سرعت افزایش می‌یابند، میانگین برد به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد، کل شکل موج به اندازه ۲۰ m به جلو جابجا می‌شود و واریانس افزایش می‌یابد.

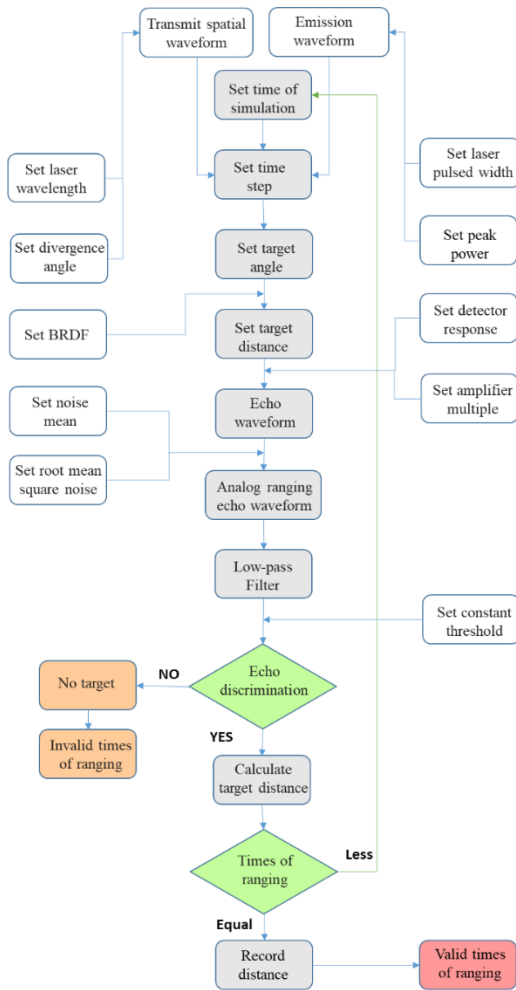
۳-۵ تأثیر آستانه به نویز بر فاصله سنجی

در آشکارسازی با آستانه ثابت، تفاوت نسبت آستانه به نویز تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آشکارسازی دارد. در شکل ۱۵ توزیع چگالی احتمال فاصله سنجی برحسب فاصله به ازای

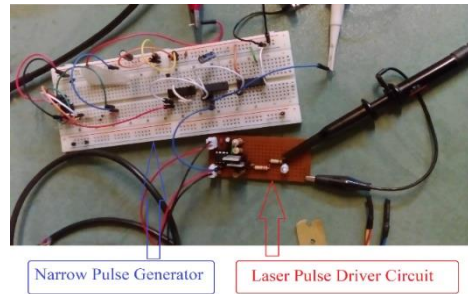
شکل ۲۰ ارائه شده است. همچنین نتایج شبیه سازی مونت-کارلو در محدوده اندازه گیری قابل اعتماد به ازای مقدار آستانه $0.137V$ ، در شکل ۲۱ ارائه شده است. این شکلها نشان می دهند که به ازای زاویه های $\theta < 70^0$ شبیه سازی یک توزیع گوسی نتیجه می دهد و با افزایش زاویه شیب، میانگین فاصله سنجی به سمت راست جابجا می شود.



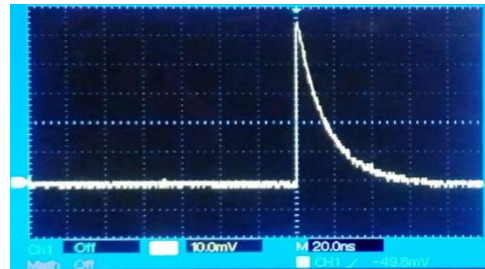
شکل (۱۸): شکل موج های نظری و آزمایشی.



شکل (۱۹): گردش سیگنال شبیه سازی فاصله سنجی.



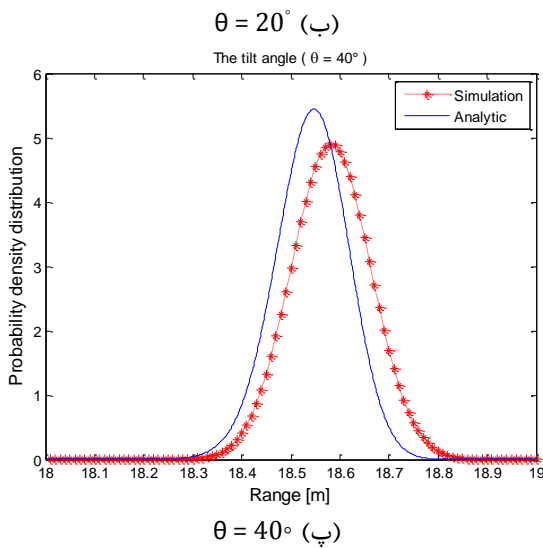
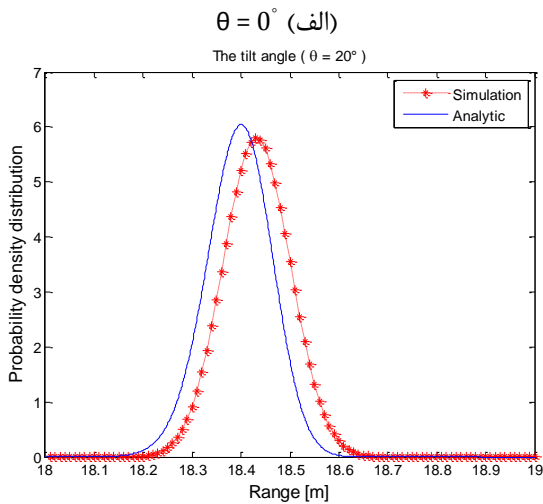
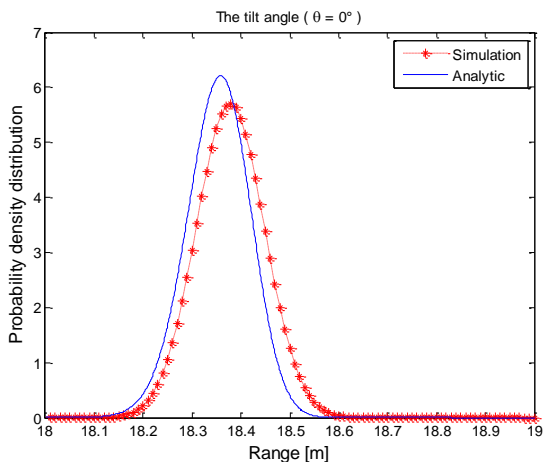
شکل (۱۶): مدار درایور دیود لیزر و مولد پالس باریک.



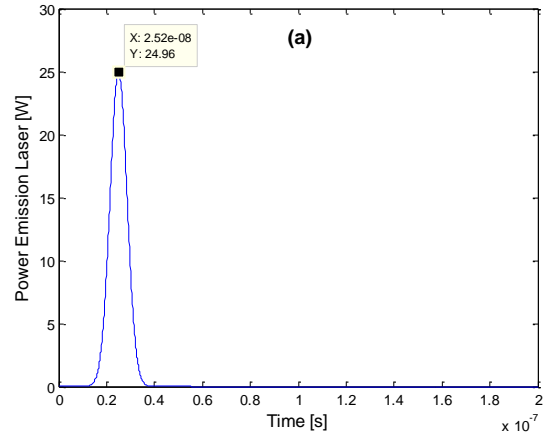
شکل (۱۷): شکل موج سیگنال بازتاب دریافت شده.

نتایج آزمایش های تجربی و اندازه گیری های انجام شده صحت مدارهای طراحی شده و پاسخ سیستم مدل شده در (۱۱) را تأیید می کنند. شکل موج حاصل از آزمایش های تجربی و نتایج شبیه سازی با استفاده از معادله ۲۵ در شکل ۱۸ رسم و مقایسه شده اند. شکل موج انعکاسی اندازه گیری شده به صورت تجربی تطابق خوبی با پاسخ نظری به دست آمده در شبیه سازی دارد. معادله (۱) مدل یک بازتاب لیزر بر اساس فاصله تا هدف، توان سیگنال بازتاب لیزری و مشخصات پرتو لیزری با فاصله زمانی ثابت $1 \times 10^{-10} s$ را ایجاد می کند. معادله (۲) نویز در گستره پهنای باند که با توزیع نرمال و با میانگین مربع ریشه ها RMS تنظیم شده است را ایجاد می کند. معادله (۳) یک سیگنال با پهنای باند محدود که با فیلترینگ نویز با پهنای باند کامل ایجاد شده است را مدل سازی می کند. معادله (۴) شناسایی پالس بازتاب لیزر با نویز باند محدود توسط یک آشکارساز با آستانه ثابت را ایجاد می کند. معادله (۵) محاسبه فاصله تا هدف را بر اساس تأخیر زمانی پالس لیزری که از ساطع کننده لیزر به هدف رسیده و به گیرنده بازگشته است را بیان می کند. این فرآیند شبیه سازی ۱۰۰۰۰ بار تکرار شده است (شکل ۱۹). با فرض اینکه فاصله تا هدف ۲۰ متر باشد، مقدار آستانه $0.35V$ ، زاویه شیب سطح هدف 0^0 و استفاده از پارامترهای اصلی ارائه شده در جدول ۱، نتایج شبیه سازی شکل موج کامل در

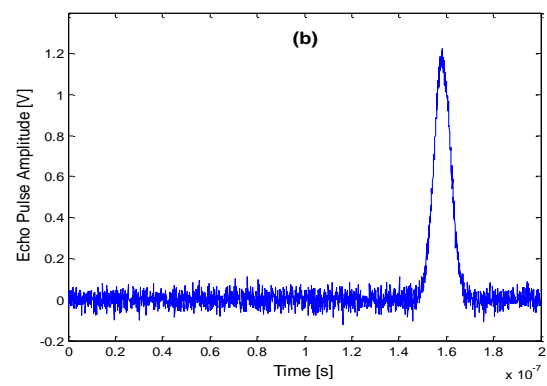
در مسافت‌های کوتاه ناچیز است، حداکثر تفاوت بین این دو ۰/۰۲۸۹ متر است.



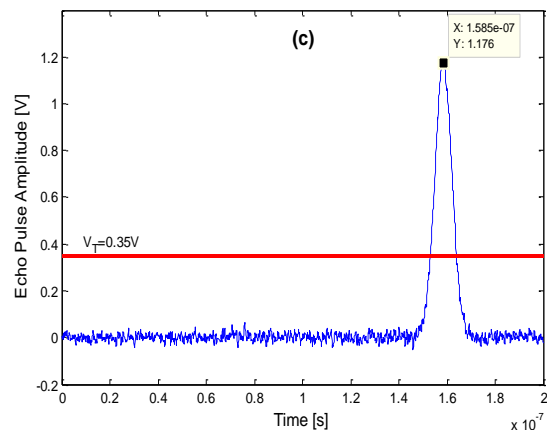
شکل (۲۱): توزیع چگالی احتمال فاصله سنجی در زوایای مختلف.



(الف) موج گسیل لیزر



(ب) موج بازتاب لیزر با نویز



(پ) ولتاژ آستانه و موج بازتاب لیزر با نویز پس از فیلترینگ
شکل (۲۰): نتایج شبیه‌سازی.

در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود که به ازای زاویه شیب 70°، توزیع چگالی احتمال در شبیه‌سازی مونت کارلو از توزیع چگالی احتمال نظری دور می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲۲ دیده می‌شود، اختلاف خطاهای سیستم نظری و شبیه‌سازی مونت کارلو در محدوده اندازه‌گیری قابل اعتماد کوچک

۴- نتیجه گیری و پیشنهادها

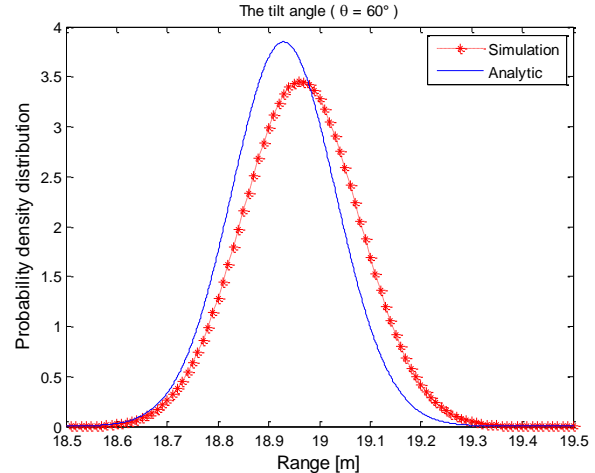
در این تحقیق یک مدل نظری برای ارزیابی سامانه آشکارسازی سیگنال بازتاب لیزری بافاصله ثابت ایجاد شده است. ارزیابی دقت سامانه و قابلیت‌های آشکارسازی آن در یک تحلیل نظری با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو بررسی و نتایج زیر به دست آمده است:

- (۱) تغییر فاصله آشکارسازی می‌تواند باعث شود که پارامترهای سیگنال بازتاب به‌طور هم‌زمان تغییر کنند. مثلاً، در محدوده 3~36.5m، با ضعیف شدن توان سیگنال انعکاس و رسیدن آن به 1.4×10^3 ، پهنای نیمه آن در 0.14V می‌تواند تا 10ns کاهش یابد. تضعیف نویز در این محدوده نسبتاً سریع است و سطح نویز پس از ۲۰ متر نزدیک به سیگنال بازتاب بدون نویز می‌شود و تمایل به پایدار شدن دارد. چنین تغییراتی می‌تواند باعث تغییرات پیچیده در شاخص‌های مختلف آشکارسازی شود.
- (۲) برای پاسخگویی به شرایط مترولوژی قابل‌اعتماد، نسبت آستانه به نویز باید حداقل ۴ باشد. به‌طور مثال، هنگامی که نسبت $TNR = 4$ ، $PF = 3.17 \times 10^{-5}$ و $SD = 4$ هستند، احتمال آشکارسازی $PD = 99.997\%$ خواهد بود.

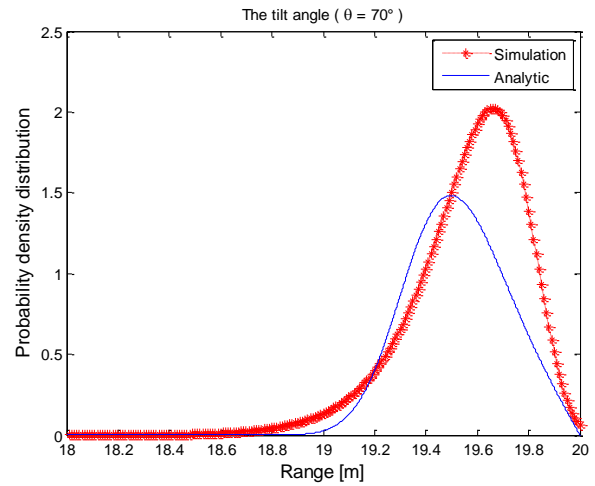
- (۳) تحت شرایط آستانه پایین، حداکثر برد قابل‌اعتماد سنجش فاصله ۳۶/۵ متر است و خطای تصادفی آن در حدود ۰/۲۴ متر. در این شرایط نقطه کار مطلوب می‌تواند در حدود ۲۰ متر در نظر گرفته شود.

- (۴) افزایش آستانه می‌تواند خطای فاصله سنجی را به میزان قابل‌توجهی بهبود بخشد، ولی مترولوژی قابل‌اطمینان کاهش یافته و نقطه کاری بهینه به سمت جلو حرکت می‌کند؛ بنابراین، افزایش مناسب آستانه وقتی با دامنه قابل‌اعتماد سازگار باشد، فاصله سنجی را بهبود می‌دهد.

- (۵) نسبت پهن‌شدگی نسبی سیگنال بازتاب با افزایش زاویه شیب هدف افزایش می‌یابد و با کاهش پهنای پالس لیزر، کاهش می‌یابد. افزایش پهنای پالس

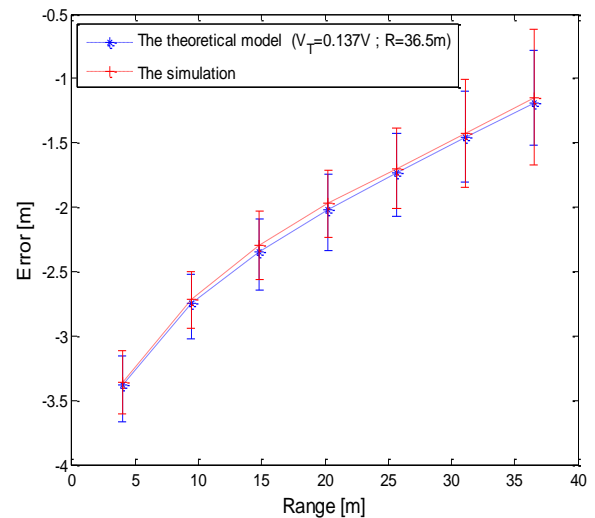


(ت) $\theta = 60^\circ$



(ث) $\theta = 70^\circ$

ادامه شکل ۲۱.



شکل (۲۲): مقایسه خطای فاصله سنجی مدل نظری و شبیه‌سازی مونت‌کارلو.

[6] Cain S, Richmond R, Armstrong E. Flash light detection and ranging range accuracy limits for returns from single opaque surfaces via Cramer-Rao bounds. *Applied Optics*. 2006;45(24):6154-62.

[7] Richmond RD, Cain SC. *Direct-detection LADAR systems*: SPIE Press Bellingham; 2010.

[8] Jiancheng L, Chunyong W, Wei Y, Zhenhua L. Research on the ranging statistical distribution of laser radar with a constant fraction discriminator. *IET Optoelectronics*. 2018;12(2):114-7.

[9] Haijiao J, Jiancheng L, Wei Y, Chunyong W, Zhenhua L. Theoretical distribution of range data obtained by laser radar and its applications. *Optics & Laser Technology*. 2013;45:278-84.

[10] Jiancheng L, Haijiao J, Wei Y, Chunyong W, Zhenhua L. Range uncertainty distribution of direct-detection laser radar with a peak-detecting routine. *Optik*. 2013;124(21):5202-5.

[11] Zhang H, Dai K, Yin Q. Ammunition reliability against the harsh environments during the launch of an electromagnetic gun: a review. *IEEE Access*. 2019;7:45322-39.

[12] de Groot PJ. Correlated errors in phase-shifting laser Fizeau interferometry. *Applied Optics*. 2014;53(19):4334-42.

[13] Jin X, Jung J, Ko SY, Choi E, Park J-O, Kim C-S. Geometric parameter calibration for a cable-driven parallel robot based on a single one-dimensional laser distance sensor measurement and experimental modeling. *Sensors*. 2018;18(7):2392.

[14] Khoogar AR, Movasati A. The Design of a Force Control System Simulator for a General-Purpose Robot Using the Simulink Software. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2020;16(4):101-6.

[15] Tao M, Peng T, Ding C, Guan J, Li Y, Zhang L, et al. A Large-Range Steering Optical Phased Array Chip and High-Speed Controlling System. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022;71:1-12.

[16] Javed M, Bashir S, Akram M, Mahmood K, Ayub R, Hussain F, et al. Evaluation and measurement of laser induced Zr-plasma parameters along with self-generated electric and magnetic fields under various pressures of Ar environment. *Optik*. 2021;246:167790.

[17] Al-Juboori HM, McCormack T. Digital nanosecond imaging architecture and analytical tracking technique of colliding laser-produced plasma. *Optical and Quantum Electronics*. 2022;54(5):1-22.

گسیل لیزر برای کاهش پهن‌شدگی پالس بازتاب مفید است. ولی این افزایش نامحدود نیست و می‌تواند بر توزیع فاصله سنجی نیز اثر گذارد؛ بنابراین، انتخاب بهینه‌ای برای آن وجود دارد.

(۶) با افزایش زاویه شیب هدف مسطح، سیگنال بازتاب کاهش می‌یابد، پالس بازتاب پهن می‌گردد و میانگین و واریانس توزیع چگالی احتمال فاصله سنجی افزایش می‌یابد.

(۷) هنگامی که زاویه شیب هدف مسطح کوچک $\theta \leq 60^\circ$ باشد، نسبت سیگنال به نویز سیگنال بازتاب SNR از نسبت آستانه به نویز TNR بالاتر است و توزیع فاصله سنجی یک توزیع گوسی را نشان می‌دهد.

(۸) هنگامی که زاویه شیب هدف بزرگ باشد، $\theta \geq 70^\circ$ SNR برای سیگنال بازتاب از TNR کمتر خواهد بود و توزیع فاصله سنجی به صورت توزیع گوسی در نمی‌آید و احتمال آشکارسازی کمتر از ۱ است.

(۹) روش‌های تحلیلی و تجربی و نتیجه‌گیری‌های ارائه‌شده در این مقاله می‌توانند پایه‌های توسعه فن‌آوری مترولوژی لیزری پالسی و فاصله سنجی پرسرعت را فراهم کنند.

۵- مراجع

[1] Nasser A, Ahmed FM, Moustafa K, Elshabrawy A. Recent advancements in proximity fuzes technology. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2015;4(04):1233-8.

[2] Arora V. *Proximity Fuzes: Theory and Techniques*: Defence Research and Development Organisation, Ministry of Defence; 2010.

[3] Grönwall CA, Steinvall OK, Gustafsson F, Chevalier TR. Influence of laser radar sensor parameters on range-measurement and shape-fitting uncertainties. *Optical Engineering*. 2007;46(10):106201.

[4] Buzzard G, editor *Modeling the Interaction of a laser target detection device with the sea surface*. 54th Annual Fuze Conference; 2010.

[5] Johnson S, Cain S. Bound on range precision for shot-noise limited ladar systems. *Applied Optics*. 2008;47(28):5147-54.



Accuracy and Performance Evaluation of the Parameters Involved in Pulse Laser Metrology Using Time Window Gate Technique

Ahmad Reza Khoogar^{1*}, Ali Aldweery², Hossein Lexian³, Mohammad Hossein Ghezelayagh⁴

¹ Associate Professor, Complex of Materials and Manufacturing Technologies, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

² Ph.D. Student, Complex of Materials and Manufacturing Technologies, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

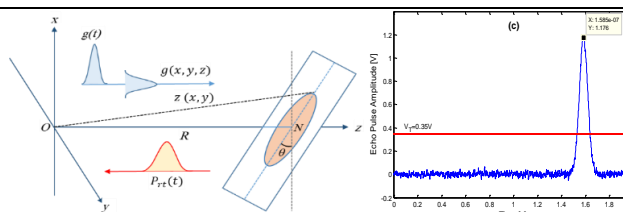
³ Assistant Professor, Complex of Materials and Manufacturing Technologies, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

⁴ Associate Professor, Complex of Electrical and Computer Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

HIGHLIGHTS

- In this paper an analytical relation for distance measurement using pulsed laser statistical futures is developed.
- Minimum measurable distance is also quantitatively obtained.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 18 May 2022

Received in revised form: 11 June 2022

Accepted: 27 July 2022

Available online: 26 October 2022

*Correspondence: khoogar@gmail.com

How to cite this article:

A.R. Khoogar, A. Aldweery, H. Lexian, M.H. Ghezelayagh. Accuracy and performance evaluation of the parameters involved in pulse laser metrology using time window gate technique. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 18(4):1-16.

Keywords:

Laser Detection
Distance Metering
Pulsed Laser
Constant Threshold
Leading Edge Detection

ABSTRACT

In order to evaluate and improve the accuracy of the distance traveled by the laser beam with a fixed distance, first the relation of the pulsed laser reflection signal reflected from the surface of the objects should be calculated and analyzed. Then, the broadening angle of the reflection signal and the relative broadening factor should be determined. In this research, an analytical relationship for distance measurement and detection for pulsed laser and statistical distance measurement has been designed, in which the minimum measurable distance and the necessary calculations for its quantitative estimation are presented. In this regard, the relationship between the broadening coefficient and relevant parameters such as detection distance, radiation angle to the target surface, and radiation reflection signal have been determined and evaluated. Simulation results and experimental results show that the maximum laser range for reliable distance measurement is 36.5 m, which is associated with a statistical error of 0.24 to 0.48 m. As the measurement threshold increases, the distance measurement error and the reliable range decrease. As the laser radiation angle increases, the divergence angle and the broadening coefficient increase, and as the laser pulse width decreases, the broadening coefficient decreases. Since increasing the angle of the target surface increases the divergence of the reflection signal, the mean values and variance of the reflection signal will also increase.

* Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Imam Hossein University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

