

طراحی و پیاده‌سازی آزمونگر سامانه هشداردهنده لیزری

عبدالله اسلامی مجد^{۱*}، احمد ناصری^۲، امیر معصومیان^۳، محمدرضا نصراللهی آزاد^۴

۱- استادیار، ۳و۴- کارشناس ارشد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۲- کارشناس ارشد دانشگاه یزد

(دریافت: ۹۴/۱۰/۱۵، پذیرش: ۹۵/۰۲/۱۱)

چکیده

در این مقاله یک سامانه آزمونگر با زیرسامانه‌های الکترواپتیکی، الکترونیکی و نرم‌افزاری معرفی می‌گردد. این سامانه توانایی تولید و گشودن رمزهای لیزری به کاررفته در مهمات هدایت‌شونده لیزری را دارد. ارزیابی هشداردهنده‌های لیزری قبل از عملیات، با استفاده از چنین آزمونگری ممکن خواهد بود. گیرنده سامانه آزمونگر، دارای مشخصات فنی و کارکردی یکسان با هشداردهنده‌های عملیاتی می‌باشد. این آزمونگر در تولید و بازتولید رمزهای لیزری، دارای خطای میانگین $6/70427$ میکروثانیه است. بدین ترتیب، اعداد به‌دست‌آمده تا ۵ رقم اعشار در تعیین دوره تناوب قابل اعتماد است.

کلید واژه‌ها: مهمات هدایت لیزری، فرکانس تکرار پالس، نشان‌گذاری لیزری، هشدار و فریب لیزری.

Design and Implementation of a Tester System for Laser Warning System

A. Eslami Majd*, A. Naseri, A. Masoumian, M. R. Nasrollahi

Malek Ashter University of Technology
(Received: 05/01/2016; Accepted: 30/04/2016)

Abstract

In this paper, a new tester system including electro-optical, electronic and software subsystems is introduced. It can decode pulse laser that is applied in laser guidance weaponry. Evaluating of laser warning systems will be possible using such tester systems. The receiver of this system has the same technical specifications with operational laser warning systems. The tester presents 6.70427micro second average error in coding and decoding pulse laser. Thus, driven numbers are trusty to 5 decimal digits for determining period pulse laser

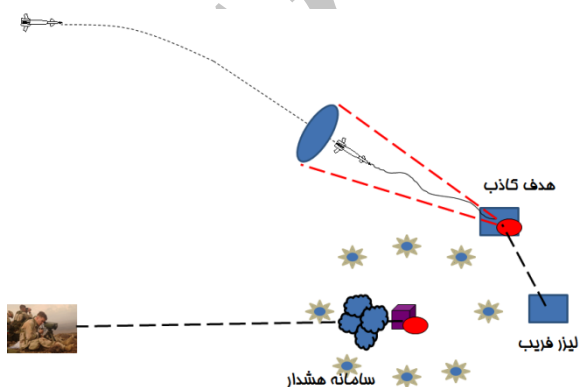
Keywords: Laser Guidance Weaponry, Pulse Repetition Frequency, Laser Designation, Laser Warnig and Aberration.

۱. مقدمه

سامانه‌های هشدار اغلب به‌عنوان یک زیرسامانه از سامانه هشدار و فریب عمل می‌نمایند. هدف آن، شناسایی تهدید لیزری و اقدام در جهت فریب آن است. شیوه کار به این صورت است که با تابانده شدن پرتو لیزری بر روی هدف محافظت شده، قسمت هشدار آن را شناسایی می‌نماید. مشخصات تهدید لیزری مانند رمز و جهت تابش را استخراج می‌کند و بر اساس آن اقدام لازم برای فریب را انجام می‌دهد. فریب تهدید دشمن پس از تشخیص آن از دو طریق قابل دستیابی است:

۱. پنهان کردن سایت مورد حفاظت از دید سنسورهای تهدیدکننده.
۲. فریفتن سامانه تهدیدکننده از طریق ایجاد اهداف جعلی یا مجازی.

برای فریب سامانه‌های هدایت‌شونده لیزری، باید پرتو لیزری که سلاح به سمت آن حرکت می‌کند، مدیریت شود. برای این کار بعد از تشخیص وجود تهدید لیزری، در گام نخست باید مانع بازتاب پرتو از هدف شد. برای این منظور می‌توان از روش‌های مختلفی مانند پخش دود در اطراف استفاده کرد. در کنار آن، لیزر تابشی را توسط قسمت هشدار رمزگشایی کرده و همان رمز را از محلی دورتر از هدف توسط یک لیزر خودی در محیط پخش کرد. با توجه به این که جست‌وجوگر فقط به تعقیب پرتوهای موجود می‌پردازد، لذا به سمت هدف غیرواقعی حرکت خواهد کرد. هدایت لیزری جهت هدایت دقیق سلاح به کار می‌رود، انحراف چندین متری و یا چند ده متری نیز مناسب است ولی چون سلاح‌های فعلی به سامانه‌های هدایت کمکی نیز مجهز هستند نباید این انحراف بیش از حد لزوم باشد. این ساختار در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۰-۴].

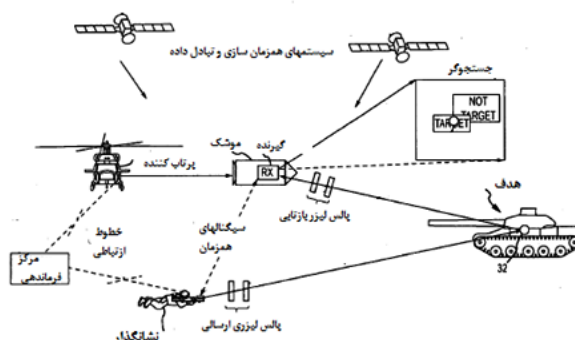


شکل ۲. نحوه عملکرد سامانه هشدار و فریب لیزری در مقابل یک تهدید لیزری در محافظت از یک موقعیت. سامانه هشدار پس از دریافت لیزر تهدید با ایجاد پرده دود از برگشت لیزر به سمت موشک جلوگیری می‌کند. سپس با تابش لیزر فریب با کد مشابه به سمت هدف کاذب موشک را منحرف می‌نماید [۱۱].

هدایت لیزری^۱ در هدایت بمب و موشک به کار می‌رود و از دقت بالایی برخوردار است. در روش هدایت لیزری که از نوع هدایت سرخود نیمه‌فعال^۲ است از نشان‌گذارهای لیزری^۳ همراه با سلاح‌های هدایت‌شونده لیزری (LGW)^۴ استفاده می‌شود. شیوه کار به این صورت است که پس از شناسایی هدف، پرتو لیزری از نشان‌گذار به سمت آن تابانده می‌شود. در اثر برخورد این لیزر به هدف، پرتوهایی از آن بازتاب می‌یابد که مهمات را به سمت هدف هدایت می‌کند. طول موجی که برای این منظور استفاده می‌شود طول موج مادون قرمز نزدیک است. این محدوده نامرئی بوده و شامل طول موج ۸۰۰ نانومتر تا ۲/۵ میکرومتر می‌باشد.

لیزرهایی که برای این منظور گزارش شده‌اند شامل لیزر Nd:Yag با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر، لیزر Er:Yag و Raman Shifted Nd:Yag با طول موج ۱۵۳۰ تا ۱۵۵۰ نانومتر، لیزر Ruby در ۶۹۴ نانومتر و لیزر CO₂ با طول موج ۱۰/۶ میکرومتر می‌باشد. انتخاب این طول موج‌ها به دلیل مسائلی مانند واگرایی، نفوذ در شرایط مختلف آب و هوایی و تاثیرات اتمسفر بر روی آن‌ها می‌باشد.

سلاح با استفاده از سامانه جست‌وجوگر خود (LST)^۵ به تعقیب پرتو بازتابی پرداخته و به سمت هدف حرکت می‌کند [۱۰ و ۱۱]. طرحواره هدایت لیزری در شکل (۱) نشان داده شده است. پرتوهای لیزری ارسالی در محدوده مادون قرمز نزدیک است و به صورت پالسی و رمزگذاری شده ارسال می‌شود. این رمز بندی براساس فرکانس تکرار پالس (PRF)^۶ انجام می‌شود و سلاح نیز از این رمز مطلع بوده و آن را جست‌وجو می‌کند [۱۰ و ۱۱].



شکل ۱. طرح‌واره هدایت لیزری. گیرنده موشک با قرارگیری در قیف ایجادشده توسط لیزر نشان‌گذار به سمت هدف هدایت می‌شود [۱].

^۱ Laser Guidance

^۲ Semi Active Homing Guidance

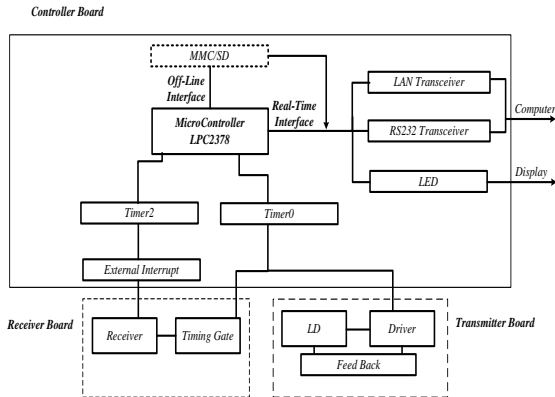
^۳ Laser Designator

^۴ Laser Guided Weapon

^۵ Laser Spot Tracker

^۶ Pulse Repetition Frequency

بلوک دیاگرام منطقی سخت افزار سامانه (شامل مجموعه فرستنده، گیرنده و راه اندازهای مربوطه) در شکل (۴) آمده است. در ادامه عملکرد هر یک از زیرسامانه ها توضیح داده خواهد شد.



شکل ۴. توصیف کلی سخت افزار سامانه. شامل برد گیرنده، فرستنده و سایر زیرسامانه ها.

۱-۲. فرستنده لیزری

فرستنده، یک لیزر دیود در طول موج ۸۰۸ نانومتر با مدار فیدبکی است که بر اساس شدت تابش لیزر عمل می کند. سوئیچ به کاررفته برای تولید پالس دارای زمان خیزشی^۱ برابر ۲ نانوثانیه است. جریان نقطه کار لیزر دیود در ۲۰۰ میلی آمپر تنظیم شده است که توان ۲۰۰ میلی وات در لیزر ایجاد می کند. فرستنده بر اساس فرمان های رسیده از قسمت کنترلی، رمزهای لیزری را تولید می کند. در این طرح دیود لیزری QL80R4SA ساخت شرکت Quantum Semiconductor مورد استفاده قرار گرفته است. این دیود لیزری برای کنترل توان لیزر مجهز به فتودیود نمایشی نیز می باشد که در توان ۲۰۰ میلی وات، جریانی معادل ۰/۵ میلی آمپر تولید می کند.

در مدار راه انداز، باتوجه به این که پالس های لیزری در سامانه هدایت لیزری دارای پهنای چند ده نانومتری می باشند، لذا به منبع جریان با سوئیچ هایی از مرتبه چند نانوثانیه ای احتیاج است. همچنین، باید بتوان شرایط محافظت الکترونیکی از دیود لیزری را برقرار کرد. برای این کار از دو آی سی در یک حلقه بسته استفاده شده است. IC-HK به عنوان منبع جریان کنترل شونده با ولتاژ و سوئیچ بسیار سریع و IC-WK به عنوان راه انداز آرام و شبکه کنترلی منبع جریان، استفاده شده است.

۲-۲. رمزگذاری پالس لیزر

بر اساس تحقیقات انجام شده، معمولاً رمز در این سامانه ها بر

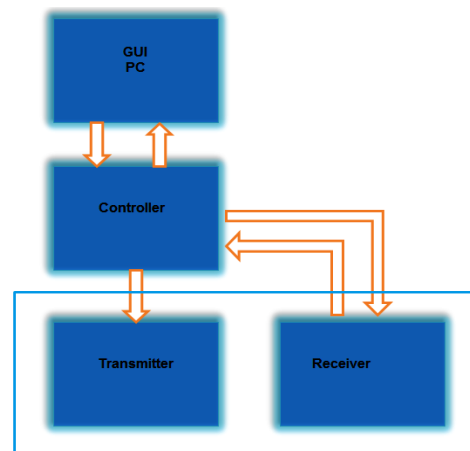
پارامترهای مختلفی برای عملکرد صحیح یک سامانه هشدار و فریب وجود دارد. توانایی در کشف رمز لیزری توسط هشداردهنده و بازسازی آن توسط لیزر فریب از مهمترین آن ها می باشد. تست سامانه های هشدار و فریب توسط آزمایش های میدانی، زمانبر و پرهزینه است. لذا به آزمونگری نیاز است که بتواند به صورت آزمایشگاهی به بررسی توانایی در کشف و بازتولید لیزر تهدید پردازد. این آزمونگر باید توانایی تولید و ارسال رمزهای لیزری مختلفی را داشته باشد.

نوآوری این مقاله، طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی یک آزمونگر هشداردهنده های لیزری می باشد. این آزمونگر که با دقت بالایی می تواند کدهای لیزری را شناسایی و بازتولید نماید.

آزمونگر شامل یک فرستنده لیزری، جایگزین نشانگذار لیزری دشمن و یک گیرنده لیزری جایگزین هشداردهنده لیزری خودی است. با این آزمونگر، توانایی سامانه هشدار و فریب در تشخیص رمزهای لیزری و توانایی در بازتولید آن ها مورد آزمایش قرار می گیرد. در این مقاله، ابتدا ساختار کلی سامانه آزمونگر و نحوه عملکرد زیرسامانه های الکتروپتیکی، کنترلی و نرم افزاری آن توضیح داده شده است. در ادامه ساختار کلی آزمونگر با بیان جزئیات عملکرد فرستنده، گیرنده و قسمت های کنترلی و نرم افزار و آزمایش های صورت گرفته بیان شده است. در ادامه رمزگذاری، رمزگشایی و اندازه گیری میزان دقت سامانه ساخته شده در بازتولید رمزهای تولیدی تجزیه و تحلیل شده است.

۲. ساختار کلی آزمونگر

این سامانه از سه زیرسامانه اصلی، شامل زیرسامانه الکتروپتیکی، کنترلی و نرم افزار تشکیل شده است که ارتباط بین آن ها در شکل (۳) نشان داده شده است. قسمت الکتروپتیکی در محدوده مادون قرمز نزدیک کار می کند.



شکل ۳. ساختار کلی سامانه آزمونگر، شامل فرستنده و گیرنده لیزری به عنوان قسمت الکتروپتیکی، سخت افزار کنترلی و نرم افزار دستگاه.

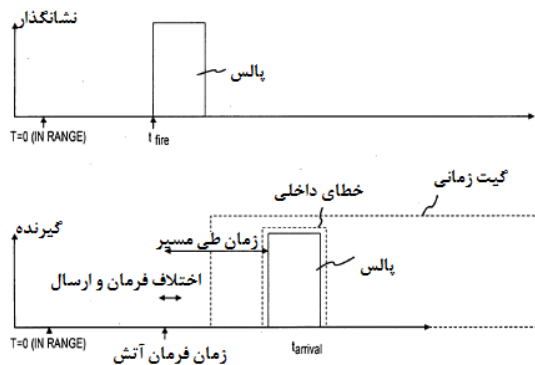
^۱ Rise Time

به‌طور کلی شناسایی این کدها توسط سه کاراکتر و یا یک واحد انجام می‌شود. این ساختار می‌تواند در اشکال مختلفی استفاده شود و کدبندی‌های متفاوت و غیرقابل کشفی را ارائه نماید [۳]. در مجموع می‌توان گفت بر اساس روش‌های متفاوت مدولاسیون پالس، اکثر مدولاسیون برای سامانه هدایت لیزری پالس‌هایی با دامنه یکسان و موقعیت زمانی رمز شده استفاده می‌شود. اما این لزوماً به معنای عدم وجود سامانه‌های رمزگذاری دیگر نیست. به‌عنوان مثال، رمزگذاری با استفاده از تعداد پالس‌ها در یک ثانیه می‌تواند استفاده شود به‌طوری‌که برای هر کاراکتر یک تعداد به‌خصوص در نظر گرفت. برای مثال، برای کاراکتر ۱ در یک ثانیه، ۴ عدد پالس ارسال برای کاراکتر ۲ در یک ثانیه ۳ پالس ارسال و یا به‌صورت ترکیبی از رمزهای مختلف استفاده شود. آنچه مهم است توانایی شناسایی این رمزها و بازتولید آن‌ها می‌باشد.

در آزمونگر ساخته شده، اندازه زمانی هر کاراکتر قابل تنظیم بوده و تعداد کاراکترهای هر رمز نیز از یک تا ۲۰ عدد می‌تواند انتخاب شود. بر اساس آزمایشات انجام شده، فرستنده در ۱۰۰ درصد فرامین رسیده از قسمت کنترلی به درستی عمل می‌کند و میزان تاخیر زمانی در فرستنده برابر ۲۰ نانوثانیه است.

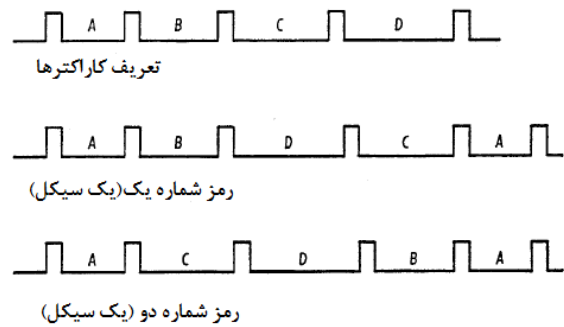
۲-۳. گیرنده لیزری

در گیرنده لیزری از یک فتودیود همراه با یک LNA^۲ برای آشکارسازی پالس‌های لیزری استفاده شده است که در ۱۰۰ درصد موارد پالس‌های دریافتی را آشکار می‌کند. برای انجام رمزگشایی، برای هر کاراکتر یک دروازه زمانی مطابق با شکل (۶) تعریف شده است. محل این دروازه زمانی با دو پارامتر تاخیر زمانی و پهنای دروازه مشخص می‌شود. براساس اندازه‌گیری‌های مختلف برای شرایط مختلف (تعداد پالس، دوره تناوب پالس و گیت زمانی)، در تولید دروازه زمانی، حداکثر میزان خطا برابر ± 2 میکروثانیه می‌باشد و مستقل از مشخصات رمز لیزری است.



شکل ۶. دروازه زمانی متناسب با هر کاراکتر رمز [۱].

اساس فرکانس تکرار پالس می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان رمز را به‌صورت پالس‌های مدوله شده با فاصله زمانی^۱ در نظر گرفت که دامنه‌ای ثابت دارند [۳]. در این حالت رمز در فاصله زمانی پالس‌ها قرار گرفته و یک سری پالس‌های فاصله‌دار به‌صورت تناوبی و پیوسته تشکیل می‌گردد. این پالس‌ها با فرکانس تکرار ۵۰ تا ۱۰ هرتز تولید می‌شوند [۲]. نمونه‌ای از این رمزها در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵. رمزهای تولیدی برای لیزر بر اساس کاراکترهای رمز [۲].

یک نمونه رمز ایجاد شده در جدول (۱) نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود از دو عدد کاراکتر یک واحد ساخته شده است و به تعداد ۱۶ واحد می‌توان دست یافت. از ترکیب این واحدها چهار عدد رمز به دست آمده است که می‌توان هر یک را برای یک مهمات در نظر گرفت.

جدول ۱. رمزهای تولیدی از رمزهای پایه [۳]

Code I.D.	Unique Interval Paires
Code 1:	(AB)(BD)(DC)(CA)
Code 2:	(AC)(CD)(DB)(BA)
Code 3:	(BB)(BC)(CC)(CB)
Code 4:	(AA)(AD)(DD)(DA)

به‌طور کلی اگر تعداد کاراکترهای رمزی با I نشان داده شود و هر واحد رمز شامل n عدد کاراکتر باشد، برای ساختن رمزی شامل L عدد واحد رمز، تعداد رمزهای قابل دسترسی برابر C خواهد بود که از معادله (۱) به دست می‌آید [۲]:

$$C = \frac{I^n}{L} \quad (1)$$

از آنجایی که واحدهای به‌کاررفته در هر رمز فقط یک‌بار و آن هم در جای خاص می‌باشند، برای شناسایی رمز، تنها شناسایی یک واحد هم کافی است. به‌طور مثال با دریافت واحد AA در رمزگشا، می‌توان از روی جدول فهمید که این رمز شماره (۴) است. این مسئله در آشکارسازی و شناسایی کد مفید است.

² Low Noise Amplifire

¹ Pulse Inverval Modulation(PIM)

دروازه‌های زمانی به‌منظور ارسال به گیرنده، مورد استفاده قرار گرفته است. تایمر دو برای اندازه‌گیری زمان‌های مربوط به سیگنال دریافتی از گیرنده الکترواپتیکی به کار می‌رود. براساس مقدار کلاک داده‌شده به این تایمرها می‌توان گام‌های زمانی قابل اندازه‌گیری را طبق جدول (۲) به‌دست آورد. این مقدار دقت دستگاه را در اندازه‌گیری سیگنال‌های ورودی نشان می‌دهد.

جدول ۲. گام زمانی تایمر بر اساس فرکانس کلاک تایمر.

گام زمانی تایمر	فرکانس کلاک
۱۳/۸۸ nS	۷۲ MHz
۲۷/۷۷ nS	۳۶ MHz
۵۵/۵۵ nS	۱۸ MHz
۱۱۱/۱۱ nS	۹ MHz

کلاک تایمر، ۳۶ مگاهرتز تعیین شده است که برای اندازه‌گیری فرکانس‌ها تا سه رقم اعشار بسیار مناسب است.

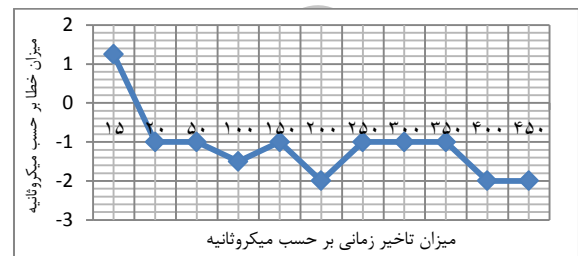
وقفه‌های خارجی EXINT1 و EXINT2 نیز فعال می‌شود تا سیگنال رسیده از گیرنده الکترواپتیکی از طریق فعال کردن وقفه‌های خارجی، تایمر دو را جهت اندازه‌گیری زمان‌های مورد نظر تنظیم کند. یک واسط UART به‌منظور برقراری ارتباط مستقیم با رایانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، از پنج درگاه به‌عنوان ورودی کلیدهای فشاری برای دسترسی مستقیم کاربر به میکروکنترلر استفاده شده است. سایر بلوک‌ها، شامل ارتباط JTAG با تراشه به‌منظور برنامه‌ریزی آن، واحد تغذیه شامل یک رگولاتور سوئیچینگ کاهنده برای ایجاد ولتاژ تغذیه ۵ ولت (LM2576) و یک رگولاتور ۳/۳ ولت برای تغذیه میکروکنترلر (LF33)، مدار ریست تراشه و قسمت‌های برقراری ارتباط بین سخت‌افزار کنترلی و سامانه الکترواپتیکی نیز در مدار کنترل در نظر گرفته شده است.

این طرح، همچنین از واسط اترنت برای ارتباط با ادوات خاص (برای توسعه‌های احتمالی آتی) پشتیبانی می‌کند. ارتباط اصلی با رایانه برای انتقال و نمایش داده‌های ارسالی و دریافتی، از طریق درگاه Serial انجام می‌گیرد.

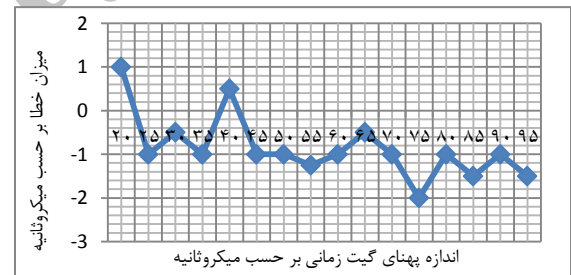
پس از آشنایی با سخت‌افزار تهیه شده برای انجام طرح و نیز آشنایی با ادوات مورد استفاده، به بررسی چگونگی ارسال، دریافت پالس‌ها و ملاحظات کلی صورت‌گرفته خواهیم پرداخت.

در این طرح ارسال یک سری پالس لیزری رمزگذاری شده با زمان‌های تناوب دلخواه و امکان دریافت پالس‌های لیزری محیط و استخراج مشخصات زمانی آن‌ها مطلوب است. برای ایجاد امکان مقایسه این پالس‌ها باید مشخصات هر دو سری پالس وجود داشته باشد. برای ملموس‌بودن مسئله از یک محیط گرافیکی

پالس دریافتی، زمانی رمزگشایی می‌شود که لبه بالا رونده پالس درون دروازه زمانی قرار گیرد. بر اساس نتیجه آزمایش‌های انجام شده مطابق شکل (۷)، حداقل تاخیر زمانی ممکن برابر ۱۵ میکروثانیه و مطابق شکل (۸)، حداقل پهنای دروازه زمانی ۲۰ میکروثانیه به‌دست آمده است. در آزمونگر معرفی شده، برای داشتن دروازه زمانی باید اندازه پهنای آن، حداقل ۵ میکروثانیه از تاخیر زمانی آن بیشتر تر باشد. با تعیین محل دروازه زمانی هر کاراکتر، می‌توان مشخصات زمانی سامانه هشدار و فریب مانند تاخیر زمانی و شرایط لازم برای رمزگشایی را اندازه گرفت.



شکل ۷. تغییر اندازه تاخیر زمانی در محدوده ۱۵ تا ۴۵۰ میکروثانیه برای رمزگشایی قطار پالس شامل ۴ پالس با دوره تناوب ۰/۱ ثانیه و دروازه زمانی برابر ۵۰۰ میکروثانیه.

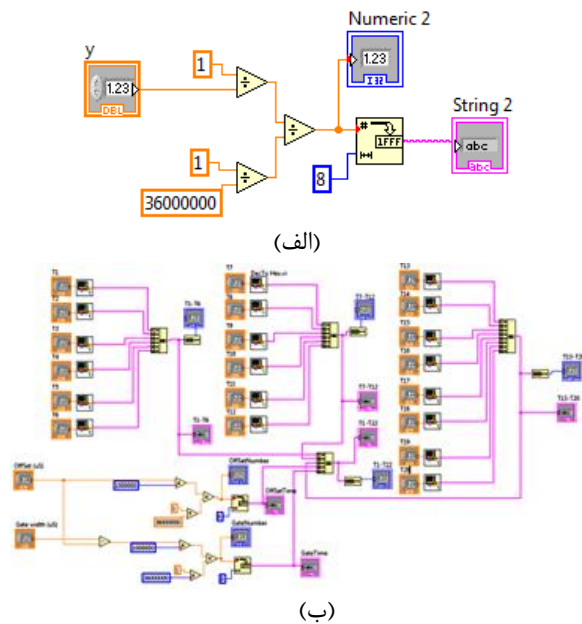


شکل ۸. تغییر اندازه پهنای دروازه زمانی در محدوده ۲۰ تا ۹۵ میکروثانیه برای رمزگشایی قطار پالس شامل ۴ پالس با دوره تناوب ۰/۰۵ ثانیه و تاخیر زمانی برابر ۱۵ میکروثانیه.

۴-۲. زیرسامانه کنترلی

در این طرح، از میان گزینه‌های متعدد میکروکنترلرهای موجود، به‌دلیل مزایای آشکار ریزپردازنده‌های ARM، میکروکنترلی از خانواده ARM7 انتخاب شد. در میان میکروکنترلرهای مختلف شرکت‌های سازنده (شامل اتمل، فیلیپس، سامسونگ و ...)، به‌دلیل امکانات جانبی فوق‌العاده تراشه‌های NXP (فیلیپس)، میکروکنترلر LPC2378 انتخاب گردید. جزئیات بیشتر مربوط به امکانات تراشه و ثبات‌های آن، در مستندات ارائه‌شده توسط شرکت NXP قابل مطالعه است.

تایمرهای شماره صفر و دو میکرو فعال به کار گرفته شده‌اند. تایمر صفر برای تولید پالس‌های فرمان جهت ارسال به فرستنده و



شکل ۱۰. تبدیل اطلاعات قطار پالس به آرایه مناسب جهت ارسال به قسمت کنترلی. (الف) تبدیل به تعداد کلاک در مبنای هگزا (ب) تولید آرایه.

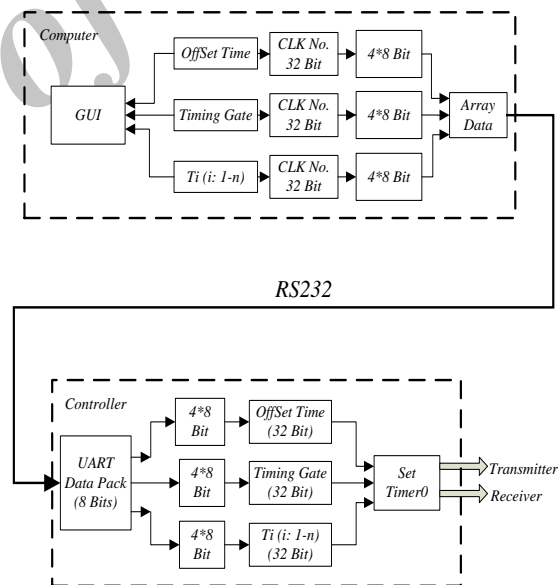
قسمت کنترلی این آرایه، بسته‌های ۸ بیتی را به ترتیب دریافت کرده، ابتدا به اعداد ۳۲ بیتی تبدیل و سپس در تنظیمات مربوط به تایمر صفر قرار می‌دهد. برای انجام این کار به طوری که ترتیب داده‌ها نیز حفظ شود، از روش‌های ریاضی و منطقی استفاده می‌شود. به این ترتیب که برای تولید هر عدد ۳۲ بیتی، ابتدا یک متغیر ۳۲ بیتی با مقدار صفر به نام calculation Result تعریف شده است. اولین بسته ۸ بیتی دریافت شده از طریق ضرب در عدد ۲۵۶، به سمت راست شیفت داده و با مقدار قبلی متغیر جمع شده است. با انجام این کار به تعداد ۴ بار، یک عدد ۳۲ بیتی درست ایجاد و در calculation Result قرار خواهد گرفت. این عمل برای تمامی پالس‌ها تکرار می‌شود. کد مربوطه مطابق زیر است:

```
for (ArrayCounter = 0; ArrayCounter < 92;
    ArrayCounter++)
{ LongArrayTemp [ArrayCounter % 4] =
  TArrayTemp[ArrayCounter];
  if ((ArrayCounter % 4) = 3)
  { calculationResult = LongArrayTemp [0] * 256
    + LongArrayTemp [1];
    calculationResult = calculationResult * 256 +
    LongArrayTemp [2];
    calculationResult = calculationResult * 256 +
    LongArrayTemp [3];
    TArray [(unsigned char)(ArrayCounter / 4)]
    = calculationResult;
  }
}
```

استفاده شده است. این محیط، مشخصات فرکانسی سیگنال‌های فرمان و سیگنال‌های دریافتی را نشان می‌دهد. برای طراحی این محیط گرافیکی و ایجاد ارتباط با کامپیوتر از نرم‌افزار ۲۰۰۹ LabVIEW استفاده شده است. قطار پالس می‌تواند یک تا ۲۰ عدد پالس با زمان تناوب دلخواه باشد. اطلاعات ارسالی و دریافتی بر روی کامپیوتر قابل مشاهده است.

قابل توجه است که سخت‌افزار کنترلی ما یک پردازنده ۳۲ بیتی است. بدین معنا که اطلاعات مبادله‌شده بین کامپیوتر و قسمت کنترلی باید به صورت داده‌های ۳۲ بیتی و در مبنای هگزادسیمال باشد. ارتباط سامانه و کامپیوتر از طریق درگاه سریال برقرار می‌شود که بسته‌های ۸ بیتی را انتقال می‌دهد.

ابتدا تعداد پالس‌ها را با زمان‌های تناوب مورد نظر مشخص می‌شود. سپس مشخصات دروازه زمانی، شامل پهنا و تاخیر اولیه در محیط نرم‌افزاری وارد خواهد شد. بلوک دیاگرام تعیین قطار پالس رمزگذاری شده در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹. بلوک دیاگرام تولید فرمان‌های لازم برای پالس‌ها.

این اعداد ابتدا به تعدادی کلاک تبدیل شده و سپس به قالب ۳۲ بیتی در می‌آید. در این فرآیند کلاک تایمر برابر ۳۶ مگاهرتز در نظر گرفته شده است. همزمان در Transe pulse & Gate نیز شکل قطار پالس همراه با دروازه زمانی نشان داده می‌شود. امکان بزرگ‌نمایی و حرکت به راست و چپ نیز فراهم شده است. این داده‌ها به صورت ۸ بیتی و آرایه‌ای تبدیل شده و از طریق درگاه سریال به قسمت کنترلی ارسال می‌شود. نحوه تولید آرایه مربوط به قطار پالس در برنامه، در شکل (۱۰) نشان داده شده است.


```

if (firstEvent == 1)
{
    SendingArray [0+TandThCounter]=
    (TandThTemp / 65536)/256;

    SendingArray [1+TandThCounter]=
    (TandThTemp / 65536)%256;

    SendingArray [2+TandThCounter]=
    (TandThTemp % 65536)/256;

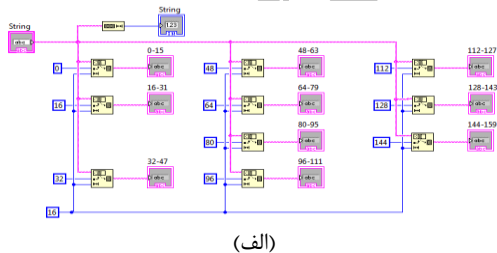
    SendingArray [3+TandThCounter]=
    (TandThTemp % 65536)%256;

    TandThCounter += 4;

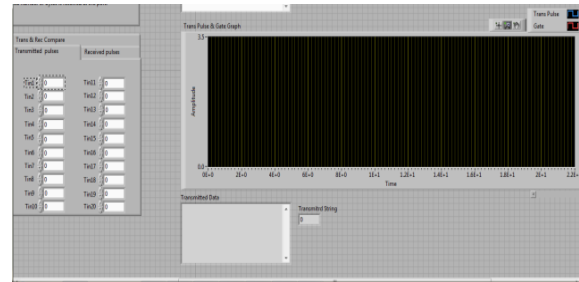
    if (TandThCounter >= 160)
    {
        PacketSendingFlag = 1;
        TandThCounter = 0;
    }
}

```

این داده‌ها زمانی به کامپیوتر ارسال می‌شود که اطلاعات مربوط به ۲۰ پالس دریافت شود. اگر تعداد پالس‌ها در قطار پالس کم‌تر از ۲۰ باشد نیز امکان بررسی بیشتر فراهم می‌شود. داده‌های رسیده به کامپیوتر به صورت رشته‌ای و شامل ۳۲۰ کاراکتر ۸ بیتی است. در قدم اول باید به اعداد ۳۲ بیتی تبدیل شوند که مربوط به مشخصات پالس‌های دریافتی شامل پهنای پالس و دوره تناوب هر کدام می‌باشند. سپس توسط نرم‌افزار تحلیل شده، زمان تناوب و پهنای هر کدام استخراج شود. برای این کار از زیر برنامه‌ای مطابق شکل (۱۳) استفاده شده است. نتایج به دست آمده، بصورت عددی و گرافیکی در شکل (۱۱) نمایش داده می‌شود.

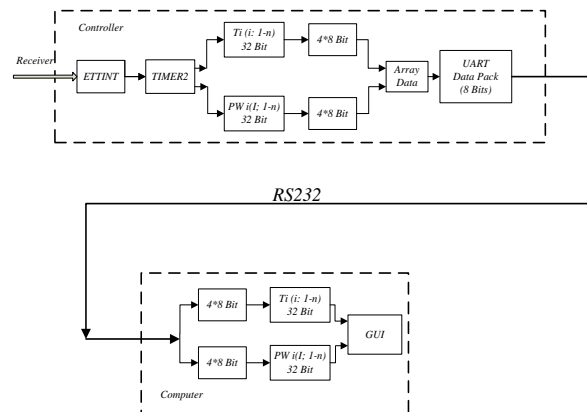


قطار پالس تا راه‌اندازی دوباره سخت‌افزار کنترلی به صورت تناوبی ارسال می‌شود. چرخه کار برای هر پالس برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است. این چرخه در نرم‌افزار محاسبه و در فرمان‌های سوئیچینگ اعمال می‌شود. تصویر برنامه گرافیکی برای پالس‌های ارسالی در شکل (۱۱) آورده شده است.



شکل ۱۱. تصویر قسمت گرافیکی برای تعیین فرکانس‌های ارسالی.

مدار گیرنده، پالس‌های دریافتی را به قسمت کنترلی می‌فرستد. لبه بالارونده و پایین‌رونده دو وقفه خارجی سامانه میکروکنترلر را فعال می‌کند. لبه بالارونده یکی از وقفه‌ها را و لبه پایین‌رونده وقفه دیگر را فعال می‌کند. این وقفه‌ها، تایمر ۲ را فعال می‌کنند. وقفه مربوط به لبه بالارونده برای محاسبه دوره تناوب پالس و وقفه مربوط به لبه پایین‌رونده برای محاسبه پهنای پالس به کار می‌رود. بلوک دیاگرام عملکردی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲. بلوک دیاگرام عملکرد دریافت پالس‌ها.

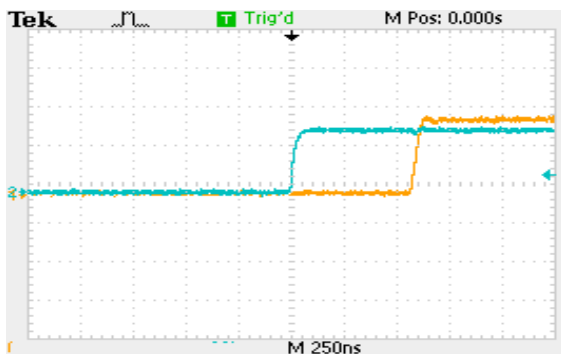
تایمر برای هر کدام یک عدد ۳۲ بیتی که بیانگر تعداد کلاک هر قسمت پالس است، به دست می‌دهد. اکنون این اعداد باید به صورت ۸ بیتی درآیند تا قابل ارسال باشند. توجه شود که ترتیب اعداد ارسالی مهم است. زیرا قسمتی از یک عدد ۳۲ بیتی می‌باشند. برای این منظور در داخل میکروکنترلر، از روش‌های تقسیم که خارج قسمت و باقی‌مانده به دست می‌دهد، استفاده شده است. کد مربوط به این عمل به این صورت است:

شکل ۱۳. زیر برنامه‌های مربوط به تولید بسته‌های ۸ بیتی از رشته ورودی. الف) تبدیل رشته ۳۲۰ کاراکتری به داده‌های ۱۶ بیتی. ب) تبدیل رشته ۱۶ بیتی به ۸ بیتی.

اطلاعات دریافت شده از کامپیوتر در قسمت String وارد شده

است. در سامانه آزمونگر، مواردی از جمله، تاخیر بین فرمان آتش و تولید پالس لیزر در فرستنده، تاخیر بین ارسال لیزر و خروجی گیرنده قبل از دروازه زمانی، تاخیر زمانی ناشی از اعمال دروازه زمانی بر روی خروجی گیرنده، تاخیر زمانی بین ارسال لیزر و خروجی گیرنده بعد از اعمال دروازه زمانی موجب ایجاد تاخیر می‌شوند.

مطابق شکل (۱۵)، تاخیر کل آزمونگر که معادل تاخیر بین ارسال لیزر و خروجی گیرنده بعد از اعمال دروازه زمانی می‌باشد، برابر ۵۷۵ نانوثانیه است. که شامل ۲۰ نانوثانیه تاخیر بین فرمان آتش و تولید پالس لیزری در فرستنده، ۱۰ نانوثانیه تاخیر زمانی ناشی از اعمال دروازه زمانی بر روی خروجی گیرنده و ۵۴۵ نانوثانیه تاخیر بین ارسال لیزر و خروجی گیرنده قبل از دروازه زمانی می‌باشد.



شکل ۱۵. تاخیر زمانی کل سامانه برابر ۵۷۵ نانوثانیه. سیگنال آبی پررنگ: سیگنال فرمان به فرستنده و سیگنال نارنجی - کم‌رنگ: سیگنال خروجی گیرنده بعد از دروازه زمانی (این میزان مستقل از اندازه کاراکترها است).

در تعریف دروازه زمانی برای سامانه، سه پارامتر باید مشخص گردد که عبارتند از: دوره تناوب، تاخیر زمانی پالس ارسالی نسبت به دروازه مربوطه و پهنای دروازه. دوره تناوب هر دروازه برابر با دوره تناوب پالس ارسالی مربوطه است که توسط نرم‌افزار سامانه از روی قطار پالس استخراج می‌شود. لذا دو مورد تاخیر زمانی و پهنای دروازه نیاز به بررسی مجزا دارد.

۳-۳. دقت در تاخیر زمانی

در این مورد دو مسئله مهم است: اول این که حداقل زمانی که می‌توان برای تاخیر زمانی تعریف کرد چقدر است و دوم این که میزان خطا در مقدار تعریف شده توسط سامانه و میزان واقعی چقدر است. برای روشن شدن این مطلب آزمایش‌هایی انجام شده است که نتایج را در زیر بیان شده و مورد بحث قرار گرفته است. محدوده فرکانسی سامانه از ۱۰ هرتز تا ۵۰ هرتز در نظر گرفته شده است.

و فرکانس سیگنال‌های دریافتی در قسمت T1 تا T20 نشان داده می‌شود. شکل پالس‌ها در منحنی Received pulse and Gate نشان داده می‌شود. امکان بزرگ‌نمایی و حرکت به راست و چپ نیز فراهم شده است.

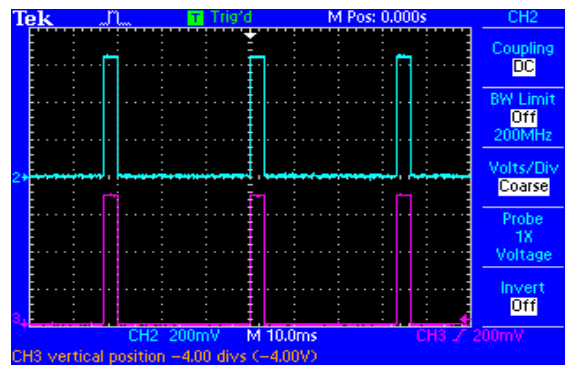
از مقایسه شکل‌ها و اعداد مربوط به فرمان‌های ارسال و سیگنال‌های دریافتی می‌توان عملکرد سامانه را بررسی نمود.

اطلاعات تبادل شده بین قسمت کنترلی و کامپیوتر به صورت ۳۲ بیتی است در حالی که ارسال و دریافت به صورت بسته‌های ۸ بیتی انجام می‌شود. این خود چالشی برای سامانه بود که به صورت نرم‌افزاری و با شیوه‌های جبری و منطقی، مدیریت شد.

۳. چیدمان آزمایش

۳-۱. بررسی کمی آزمونگر

در گام نخست، عملکرد کمی زیرسامانه‌ها به صورت مجزا از نظر پاسخ به تعداد فرمان مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس انجام آزمایش، توسط ۱۵۰۰ پالس لیزری، تمامی قسمت‌ها از جمله فرستنده، گیرنده، ارتباط قسمت کنترلی با فرستنده و ارتباط قسمت کنترلی با گیرنده از لحاظ کمی کارکرد ۱۰۰ درصدی داشتند. بررسی کمی ارتباط زیرسامانه کنترل با فرستنده و گیرنده نیز با کارکرد ۱۰۰ درصدی تست شد. نمونه‌ای از تست حلقه بسته فرستنده و گیرنده در شکل (۱۴) آمده است.



شکل ۱۴. سیگنال اعمالی به فرستنده (بنفش - پایین) و سیگنال دریافتی از خروجی گیرنده (سبز-بالا). که به خوبی تطابق ۱۰۰ درصدی سیگنال‌های ارسالی و دریافتی را نشان می‌دهد.

۳-۲. بررسی زمانی آزمونگر

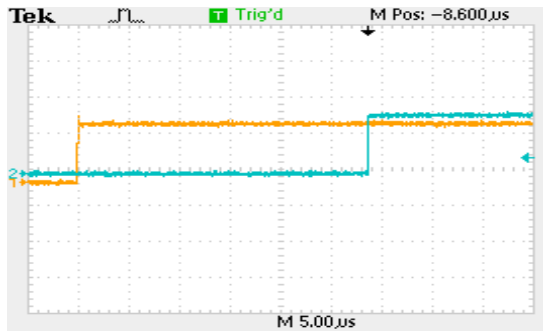
هر سامانه الکترواپتیکی به دلیل ساختار و ادوات به کاررفته، یک تاخیر زمانی ایجاد می‌کند که هرگز از بین نمی‌رود، ولی ممکن است به زمان‌های بسیار کم کاهش یابد. در این قسمت به بررسی زمان تاخیر ناشی از قسمت‌های مختلف سامانه پرداخته شده است. کلیه اندازه‌گیری‌ها در دمای آزمایشگاه انجام شده

۳-۴. حداقل تاخیر زمانی سامانه

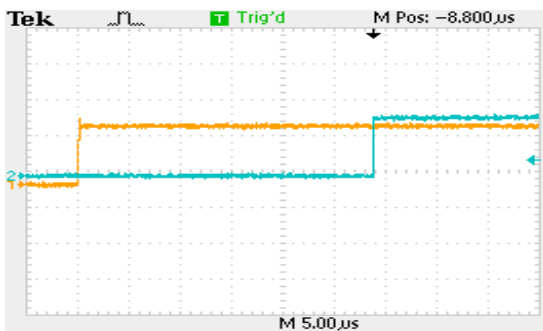
برای این منظور، دو سری آزمایش انجام شده است. در آزمایش اول قطار پالسی شامل ۶ عدد پالس با دوره تناوب یکسان $0.2/\mu s$ و دروازه زمانی برابر ۱۰۰ میکروثانیه در نظر گرفته و میزان تاخیر از ۱ میکروثانیه آغاز و با گام‌های یک میکروثانیه‌ای افزایش داده شده است. بار دیگر همین آزمایش با قطار پالس شامل ۶ عدد پالس با دوره تناوب $0.1/\mu s$ و دروازه زمانی برابر ۱۰۰ میکروثانیه تکرار شده است. نتایج به دست آمده از هر دو آزمایش نشان می‌دهد حداقل میزان تاخیر زمانی قابل اعتماد در سامانه، مستقل از دوره تناوب بوده و برابر ۱۱ میکروثانیه است.

۳-۵. بررسی و تعیین خطا در اندازه تاخیر زمانی

برای این منظور دو سری آزمایش انجام شده است. در گام نخست قطار پالسی شامل ۶ عدد پالس با دوره تناوب $0.2/\mu s$ و دروازه ثابتی برابر ۱۰۰ میکروثانیه برای سامانه تعریف شده است. تاخیرهایی برابر ۱۱ میکروثانیه، ۳۰ میکروثانیه و ۵۰ میکروثانیه مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. بار دیگر همین آزمایش برای قطار پالس با دوره تناوب $0.1/\mu s$ انجام گرفته است. نتایج در شکل‌های (۱۸-۱۶) آورده شده است. بر اساس این اندازه‌گیری‌ها میزان خطا مستقل از دوره تناوب پالس‌ها می‌باشد اما بر اساس میزان تاخیر، دارای اندکی خطا است. برای به دست آوردن محدوده تغییر بر اساس میزان تاخیر دو آزمایش دیگر انجام شده است.

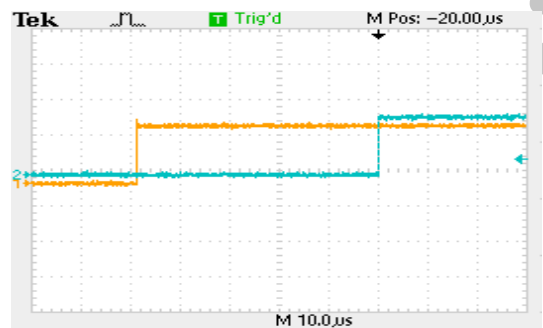


(الف)

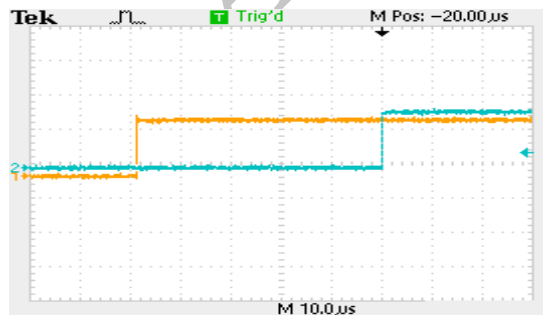


(ب)

شکل ۱۷. میزان تاخیر واقعی برای تاخیر ۳۰ میکروثانیه (الف) دوره تناوب در قطار برابر $0.1/\mu s$ و (ب) دوره تناوب در قطار پالس برابر $0.2/\mu s$ (ثانیه).

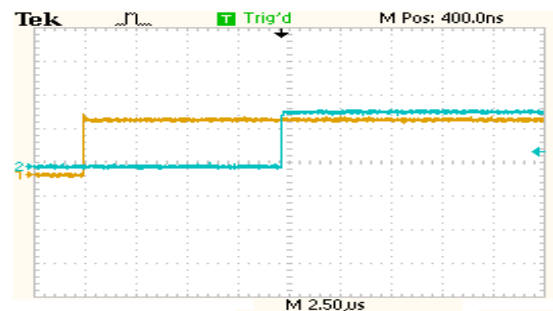


(الف)

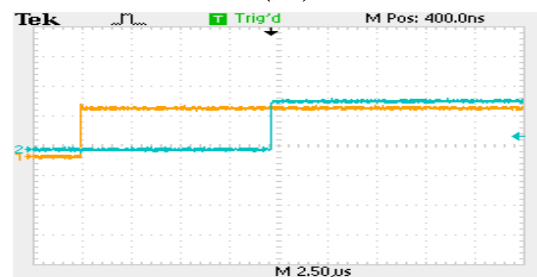


(ب)

شکل ۱۸. میزان تاخیر واقعی برای تاخیر ۵۰ میکروثانیه (الف) دوره تناوب در قطار برابر $0.1/\mu s$ و (ب) دوره تناوب در قطار پالس برابر $0.2/\mu s$ (ثانیه).



(الف)

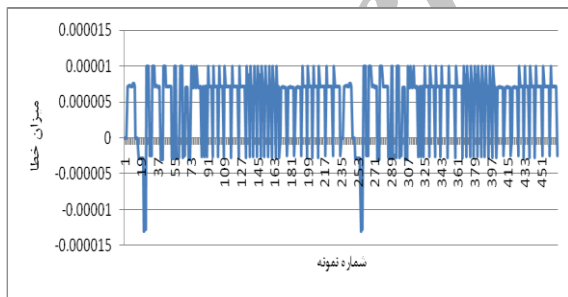


(ب)

شکل ۱۶. میزان تاخیر واقعی برای تاخیر ۱۱ میکروثانیه (الف) دوره تناوب در قطار برابر $0.1/\mu s$ و (ب) دوره تناوب در قطار پالس برابر $0.2/\mu s$ (ثانیه)

شد. اگر لبه بالارونده پالس درون دروازه قرار گیرد، دوره تناوب پالس استخراج شده و رمز مربوطه تعیین می‌گردد. نتیجه به صورت گرافیکی و عددی نشان داده می‌شود. انواع کدهای پالس لیزری را با این سامانه می‌توان ارسال و دریافت نمود. هر کد را می‌توان به صورت قطار پالسی در نظر گرفت که دوره تناوب هر پالس به صورت کدبندی شده می‌باشد. در این سامانه قطار پالس می‌تواند شامل ۱ تا ۲۰ پالس با دوره تناوب دلخواه باشد. تعیین پهنای دروازه زمانی و میزان تاخیر زمانی نیز در این سامانه وجود دارد. به عبارتی برای هر کد باید چهار نوع پارامتر را تنظیم کرد: تعداد پالس، دوره تناوب هر پالس، پهنای دروازه زمانی و میزان تاخیر پالس‌ها نسبت به دروازه زمانی.

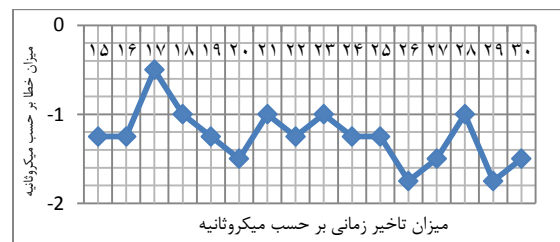
اگر دروازه زمانی به گونه‌ای باشد که پالس در خارج از آن قرار گیرد، در گیرنده چیزی دریافت نخواهد شد. اگر پالس درون دروازه قرار گیرد، پهنای توسط دروازه مشخص خواهد شد. شایان ذکر است که لبه پالس‌ها مهم می‌باشند و می‌توان با استفاده از لبه پالس‌ها دوره تناوب پالس را استخراج کرده و به کدینگ مربوطه پی‌برد. لذا مهم قرار گرفتن لبه بالارونده پالس درون دروازه است که می‌توان با استفاده از صفحه نمایش نرم‌افزار سامانه این مسئله را کنترل کرد. در ادامه به بررسی توانایی سامانه در تولید و دریافت کدهای مختلف لیزری پرداخته شده است. برای این منظور کدهای مختلف به سامانه داده شده و کارکرد سامانه با آن‌ها امتحان شده است. سامانه با ۱۵ نوع کد مختلف و هر کد به تعداد سه بار، مورد آزمایش قرار گرفته است. نتیجه بررسی در این مورد در شکل (۲۱) آورده شده است.



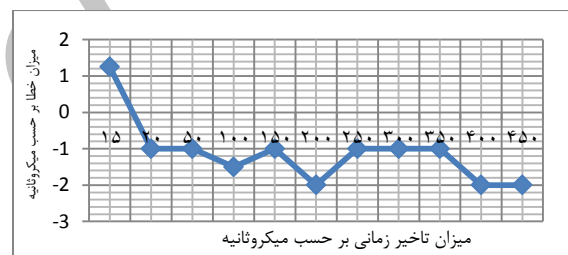
شکل ۲۲. نمودار خطا در اندازه‌گیری اندازه کاراکترهای رمز (دوره تناوب).

بر اساس محاسبات انجام شده بر روی داده‌ها، میانگین میزان خطا در اندازه‌گیری دوره تناوب بعنوان کاراکترهای رمز، برابر ۶/۷۰۴۲۷ میکروثانیه است. در اینجا دو نتیجه مورد آزمایش از لحاظ تولید و شناسایی رمز لیزری توسط آزمونگر ارائه می‌شود. در آزمایش اول یک رمز لیزری سه بار مورد آزمایش قرار گرفته است که نتایج در جدول (۳) نشان داده شده است.

آزمایش اول قطار پالسی دارای ۶ پالس با دوره تناوب ۰/۱ ثانیه و دروازه زمانی ثابتی برابر ۱۰۰ میکروثانیه در نظر گرفته و میزان تاخیر زمانی از ۱۱ میکروثانیه تا ۳۰ میکروثانیه افزایش داده شده است. در آزمایش دیگر قطار پالس دارای ۴ پالس با دوره تناوب ۰/۱ ثانیه و پهنای دروازه ۵۰۰ میکروثانیه در نظر گرفته شده و میزان تاخیر زمانی از ۱۱ میکروثانیه تا ۴۵۰ میکروثانیه افزایش داده شده است نتایج در شکل (۱۹) و شکل (۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۹. قطار پالس شامل ۶ پالس با دوره تناوب ۰/۱ ثانیه و دروازه زمانی برابر ۱۰۰ میکروثانیه.



شکل ۲۰. قطار پالس شامل ۴ پالس با دوره تناوب ۰/۱ ثانیه و دروازه زمانی برابر ۵۰۰ میکروثانیه.

بر اساس نتایج به دست آمده، حداقل تاخیر زمانی برابر ۱۵ میکروثانیه است. همچنین یک خطای ثابت برابر با ± 2 میکروثانیه در اندازه واقعی تاخیر زمانی وجود دارد.

۴. نتایج و بحث

هر رمز را می‌توان به صورت قطار پالسی در نظر گرفت که در آن دوره تناوب هر پالس، به صورت رمزگذاری شده می‌باشد. در آزمونگر ساخته شده می‌توان قطار پالسی شامل ۱ تا ۲۰ پالس با دوره تناوب دلخواه تولید کرد. تعداد پالس به منزله طول رمز و دوره تناوب هر پالس به عنوان کاراکترهای رمز می‌باشد. به منظور رمزگشایی نیز یک دروازه زمانی برای هر کاراکتر رمز تعریف می‌شود. این دروازه زمانی با دو پارامتر، شامل پهنای دروازه و تاخیر مابین لبه بالارونده پالس رمز و شروع دروازه زمانی مربوطه تعریف می‌شود. مهم قرار گرفتن لبه بالارونده پالس درون دروازه زمانی است. اگر دروازه زمانی به گونه‌ای باشد که لبه بالارونده پالس در خارج از آن قرار گیرد، در گیرنده چیزی دریافت نخواهد

۶. مراجع

- [1] Williams, D. S. "Absolute Time Encoded Semi-Active Laser Designation"; US Patent, 7,767,945, 2009.
- [2] Carthy, P. L. "Projectile Guidance System Including a Compact Semi-Active Laser Seeker With Immersed Filter Stack and Field Lens"; US Patent 8,188,411, 2010.
- [3] Bayston, T. E. "Pulse Code Recognition Method and Systems"; US Patent 5,023,888, 1991.
- [4] Muller, G. "Laser Warning Device for Military Vehicles"; US Patent 4,721,852, 1988.
- [5] Halldorsson, T. "Laser Detection Devices"; US Patent 4,674,874, 1987.
- [6] Hunter, R. W. "Compact Laser Warning Receiver"; US Patent 5,260,563, 1993.
- [7] Wootton, J. R. "Laser Warning system and Methods"; US Patent 6,770,865, 2003.
- [8] Gillespie, P. G. "Weapon of Choice"; University of Alabama, 2006.
- [9] Arjomandi, M. "Anti-Ship Missile Guidance Systems"; University of Adelaide, 2006.
- [10] Volkman, E. "Science Goes To War"; Wiley, New York, 2002
- [11] Russel, J. C. "Coherent Laser Warning System"; US Patent 6,151,114, 2000.

جدول ۳. نتایج مربوط به آزمایش یک رمز برای ۳ بار.

ردیف	پهنای پالس دروازه (s)	پهنای پالس دروازه (s)	پهنای پالس دروازه (s)	تعداد پالس	پهنای پالس دروازه (s)	ردیف
1	0.0333	0.0333	0.0333	100	20000	0.0333
2	0.0335071	0.0335071	0.0335071	100	20000	0.0335
3	0.100007	0.100007	0.100007	100	20000	0.1
4	0.0333072	0.0333072	0.0333072	100	20000	0.0333
5	0.0335071	0.0335071	0.0335071	100	20000	0.0335
6	0.0999974	0.0999974	0.100007	100	20000	0.1

۵. نتیجه گیری

از آزمونگر ساخته شده فقط برای بررسی توانایی سامانه‌های هشدار و فریب در زمینه کشف رمز لیزری و بازسازی آن می‌توان استفاده کرد. بطوریکه می‌توان رمزهای لیزری متشکل از قطاری از پالس‌ها با دامنه ثابت و دوره‌های تناوب دلخواه تولید نمود. هر قطار پالس می‌تواند شامل ۱ تا ۲۰ پالس باشد. دروازه زمانی قابل تولید در این دستگاه برای رمزگشایی، دارای حداقل تاخیر زمانی برابر ۱۵ میکروثانیه بوده و حداقل پهنای قابل استفاده در آن برابر ۲۰ میکروثانیه است. میزان خطا در پارامترهای دروازه زمانی برابر ± 2 میکروثانیه است. این آزمونگر در تولید و بازتولید کاراکترهای مربوط به رمزهای لیزری، دارای خطای میانگین $6/70427$ میکروثانیه است. بدین معنا که اعداد به‌کاررفته در این سامانه تا ۵ رقم اعشار در تعیین دوره تناوب قابل اعتماد است و بیش‌تر از آن امکان خطا وجود دارد.