

روش های فاصله سنجی بوسیله لیزر

آرش مظاهری امین خوش نیت آرام پگاه فروهرراد عباس ظریفکار
arma1361@yahoo.com aminaram@gmail.com pegah_sib@yahoo.com a_zarifkar@yahoo.com
دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه ، گروه مهندسی برق- الکترونیک

چکیده : هدف این مقاله بررسی انواع روشهای پیاده سازی متر لیزری و ارائه مفهوم و کاربردهای آن در صنعت می باشد که در این راستا نخست روشهای تداخل سنجی و دی مدولاسیون همزمان را که شامل تکنیکهای جابجایی فاز^۱ و FMCW^۲ می باشد، مورد بحث قرار داده و سپس به بررسی تکنیکهای ، مثلث سازی^۳ و زمان پرواز^۴ می پردازیم و در پایان مقایسه ای بین روشهای مورد بحث ارائه می شود.

کلمات کلیدی: تداخل سنجی ، مثلث سازی ، زمان پرواز ، جابجایی فاز .

۱- مقدمه

برای اندازه گیری فاصله و مسافت روشهای متعددی موجود می باشد. در قرن حاضر با توجه به پیشرفتهای شگرف علمی پدید آمده به خصوص در زمینه الکترونیک و کامپیوتر و راه حلهای نوین محاسباتی ، روش اندازه گیری فواصل و مسافت یابی به سمت سویی دیگر سوق یافته است. اندازه گیری دقیق فاصله از جسم و یا فاصله دو جسم از یکدیگر در صنایع مختلف از جمله : ابزار دقیق ، قطعه سازی، هوانوردی ، دریا نوردی ، رباتیک و بخصوص در صنایع نظامی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به تازگی با رشد صنعت الکترونیک و روش های اندازه گیری بوسیله لیزر ، سنجش فاصله، سرعت، زاویه، میزان صیقلی بودن سطوح و ... با سخت افزار و روشهای مشابه نرم افزاری میسر شده است. در ادامه به بیان روشهای مختلف اندازه گیری فاصله توسط لیزر خواهیم پرداخت.

۲- روشهای فاصله سنجی با لیزر

۲-۱ - تداخل سنجی : یکی از روشهای اندازه گیری فاصله و یا جابجاییهای کوچک استفاده از تداخل سنجی می باشد. در روشهای تداخل سنجی، فاصله برحسب طول موج به کار گرفته شده، محاسبه می شود و دقت های یک دهم

¹ Phase Shift Measurement-
² Frequency Modulation Continuous Wave
³ Triangulation -
⁴ Time Of Flight-

طول موج به راحتی به دست می‌آید و نیز با استفاده از روش‌های الکترونیکی و کامپیوتری جدید حد تفکیک حدود $100/\lambda$ را در بررسی و آزمایش سطوح می‌توان به دست آورد [۱].

در روش تداخل سنجی، از شمارش تعداد نوارهای تداخلی استفاده می‌شود [۲]. میتوان از تداخل سنجهای مایکلسون^۵، ماخ زندر^۶ و فبری پرو^۷ استفاده نمود. به طور کلی این روش معمولاً برای محدوده اندازه گیری در حدود چندده سانتی متر با دقت‌های بسیار بالا (در حدود ۲۰ تا ۵۰ میکرومتر) استفاده می‌شود. مهمترین مزیت این روش خود تنظیمی ذاتی آن است. عدم وجود تاثیرات سایه و استفاده از قطعات کم در پیاده سازی، از دیگر مزایای تداخل سنجی می باشد.

۲-۲- روش جابجایی فاز: در این روش بر اساس جابجایی فازی ایجاد شده بر روی سیگنال دریافتی از هدف به تخمین فاصله می پردازیم. در واقع در این روش از تبدیل تاخیر زمانی ایجاد شده در رفت و برگشت پالس لیزر (مدوله شده با مدولاسیون دامنه در فرکانس f_0) به جابجایی فاز استفاده می شود.

$$\Delta\Phi = 2\pi f_0 \tau_d \quad (۱)$$

$\Delta\Phi$ جابجایی فاز، f_0 فرکانس مدولاسیون، τ_d زمان رفت و برگشت پالس می‌باشد. محدوده اندازه گیری این روش وابسته به فرکانس مدولاسیون (f_0) می‌باشد و برای استفاده از چند سانتیمتر تا چند ده متر مناسب می باشد. (هر چه f_0 بزرگتر، محدوده اندازه گیری بیشتر و دقت و حساسیت بالاتر را موجب خواهد شد). این روش از لحاظ ویژگیهای سخت افزاری بسیار شبیه روش ضربان فرکانسی می باشد، در نتیجه می‌توان از این ویژگی بهره برد و سیستمی طراحی نمود تا از هر دو روش جابجایی فاز و فرکانس عمل نماید، تا به بالاترین کارایی دست یابیم [۳]. فاصله d مسافتی است که یک موج نور بازتابیده شده از هدف در زمان τ_d طی میکند. اگر توان نوری دیود لیزری بوسیله یک موج سینوسی در فرکانس f_0 مدوله شود، می‌توان گفت که زمان انتشار به جابجایی فاز بین سیگنال های رفت و برگشت ($\Delta\Phi$) تبدیل می‌شود.

$$\tau_d = \frac{2d}{c} \quad (۲)$$

انتخاب فرکانس مدولاسیون f_0 به نوع کاربرد بستگی دارد. به طور مثال با فرکانس ۱۰ مگا هرتز محدوده نامبهم ۱۵ متر را خواهیم داشت. یکی از معایب بزرگ این شیوه، حساسیت بالای آن به خطاهای سیستم می باشد. خطای Crosstalk که از کوپلینگ پارازیتی میان کانالهای فوتوالکتریک و لیزر بوجود می‌آید، غیر خطی بودن ظرفیت پیوندهای ترانزیستوری، منابع خطایی هستند که در روش جابجایی فاز نمیتوان از آنها صرفنظر نمود و رفع آنها هم به سادگی امکان پذیر نیست [۴]. مبتنی بودن بر محاسبات پیچیده ریاضی، حساسیت بالا نسبت به خطاهای ایجاد شده، محدوده اندازه گیری از چند سانتیمتر تا چند ده متر از مشخصات این روش می باشد. ضمناً پیاده سازی این روش نیازمند سخت افزاری با توان پردازشی قدرتمند می باشد. (در اکثر نمونه های مورد بررسی از یک کامپیوتر برای انجام محاسبات ریاضی و پردازشهای مورد نیاز بر روی امواج، استفاده شده است.) [۳]. برای پیاده سازی تئوری فوق تکنیکهای متعددی وجود دارد، که بررسی تفصیلی تک تک این تکنیکها خارج از حوصله این بحث است. تکنیکهای هتروداین و دی مدولاسیون همزمان، دو نمونه از این تکنیکها می باشند.

⁵ Michelson-
⁶ Mach Zehender-
⁷ Fabry-Perot-

۲-۳- روش FMCW: در این روش ، جابجایی فرکانسی ایجاد شده بر روی سیگنال دریافتی از هدف ، مرجع تصمیم گیری در رابطه با فاصله تا هدف می باشد و از مقایسه پارامترهای دو موج مدوله شده FM فرستاده و گرفته شده بدست می آید [۳]. با توجه به فرمول زیر و مدت زمان رفت و برگشت پرتوی لیزر که با سرعت نور حرکت می کند می توان مسافت تا هدف را تعیین نمود.

$$\tau_d = \frac{2d}{c} \quad (2)$$

اگر پرتوی لیزر ارسالی مدوله شده توسط یک پالس باشد در اینصورت می توان زمان رفت و برگشت آنرا مبنای محاسبه فاصله قرار داد. اما اگر پرتوی لیزر مدوله شده توسط یک موج سینوسی با فرکانس f_0 باشد ، پس زمان انتشار به شیف فرکانسی میان فرکانس موج منتشر شده و فرکانس سیگنال برگشتی تبدیل میشود.

$$d_{nar} = \frac{c}{2f_0} \quad (3) \text{ از آنجا که } 2\pi \text{ مدوله شده در فاز هیچ مشکلی با میزان فاصله ایجاد نمی کند خواهیم داشت:}$$

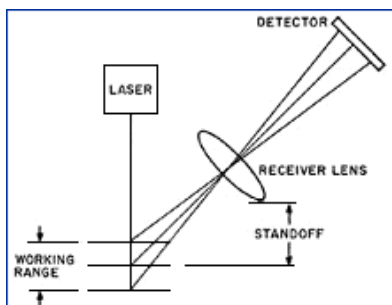
d_{nar} محدوده نامبهم در اندازه گیری می باشد. انتخاب فرکانس مدولاسیون بستگی به کاربرد مورد نظر دارد، به طور مثال فرکانس ۱۰ مگاهرتز منجر به $d_{nar} = 15m$ می شود که به عنوان یکی از کاربردهای آن می توان از سیستمهای بینایی رباتها نام برد. شباهت سخت افزاری با روش FMCW از مزایای این روش و سایر مشخصات آن نیز مشابه روش جابجایی فاز می باشد .

۲-۴- روش مثلث سازی

در این روش با استفاده از قوانین هندسه و زاویه پرتوی لیزر ارسالی و دریافتی میزان فاصله تا هدف تخمین زده می شود که این روش با دقت نسبتاً خوبی برای فواصل کم مناسب میباشد. محدوده اندازه گیری این روش از ۱mm تا ۵۰cm و دقت آن نیز در حدود یک میکرو متر می باشد . با زیاده شدن فاصله اندازه گیری ، دقت این روش به میزان شدیدی افت می کند. در صنعت نیز از میان تمامی روشهای موجود به دلیل تکنولوژی ساده تر، مقاومت و دقت بالا و قیمت ارزان ، این روش مورد توجه سازندگان قرار گرفته است [۳].

۲-۴-۱- اساس کار روش مثلث سازی

لیزر فرستنده، ابتدا پرتویی را بسوی شیئی هدف پرتاب می کند، سپس فاصله را نسبت به یک نقطه مرجع، بوسیله تشخیص مختصات مکانی از گیرنده که نور بازتابیده از هدف به آن برخورد کرده ، محاسبه می نماید. بصورتیکه چنانچه فاصله شیئی تا نقطه مرجع دورتر یا نزدیکتر شود، موقعیت نقطه برخورد اشعه بازتابش با گیرنده تغییر می کند (شکل ۱).



۱- چگونگی روش مثلث سازی

پردازش الکترونیکی مقادیر، وابسته به نوع سنسور (آشکارساز) مورد استفاده در روش مثلث سازی می باشد.

۲-۴-۲- بررسی اجزاء مختلف فاصله سنجی به روش مثلث سازی

اصول کار روش مثلث سازی را می توان به ۳ بخش عمده تقسیم کرد:

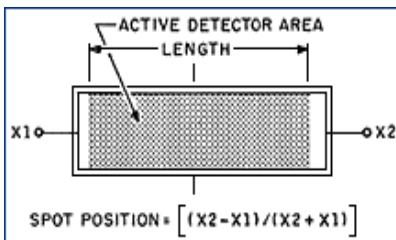
فرستنده ، گیرنده و پردازشگر الکترونیکی.

۲-۴-۲-۱- فرستنده^۸: فرستنده معمولاً یک دیود لیزری است با پرتو نور متمرکز شده که یک پرتو لیزر بسوی شیء هدف می تاباند. یک فرستنده که موارد استفاده بسیاری دارد و بسیار کم خرج و ارزان است، یک دیود لیزری با قدرت کم با طول موج 670 nm و اشعه نور مرئی می باشد.

۲-۴-۲-۲- گیرنده^۹: قسمت گیرنده بازتاب نور از هدف را جمع می کند و تصویر هدف را بر روی آشکارساز (سنسور) تشکیل می دهد. سپس آشکارساز، محل نقطه نورانی را به پردازشگر گزارش می کند که محدوده ارتفاع یا فاصله را تعیین کند. انواع بسیاری از آشکارسازها موجودند که دو نوع بسیار رایج برای استفاده در روش مثلث PSD^{۱۰} و آشکارسازهای آرایه ای^{۱۱} می باشند. هر کدام از این دو نوع آشکارساز، قابلیت‌ها و محدودیت‌های ویژه‌ای دارند.

PSD ها آشکارسازهای آنالوگ هستند. سنسورهای نوع PSD از آشکارسازهای یک بعدی با خروجی جریان الکتریکی در هر انتها استفاده می کنند (شکل ۲). میزان جریان خارج شده از هر خروجی با موقعیت نقطه نورانی بازتابیده شده بر روی آشکارساز متناسب است. اگر نقطه در وسط آشکارساز باشد، جریان هر دو خروجی مساوی خواهد بود و اگر نقطه نورانی از مرکز به طرفین حرکت کند مقادیر جریان در دو خروجی تغییر می کند و از روی این تغییرات طبق فرمول (۴) می توان موقعیت نقطه نورانی بازتابیده را شناسایی کرد.

$$\text{SpotPosition} = \frac{(X_2 - X_1)}{(X_2 + X_1)} \quad (۴)$$



۲- سنسور PSD

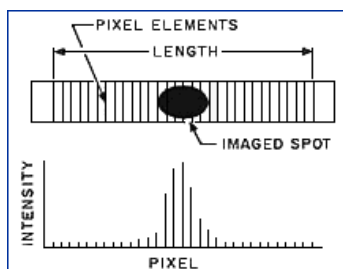
آشکارساز آرایه ای، یک آشکار ساز دیجیتال است نه به خاطر مقادیر 1 و 0 بلکه به دلیل آنکه خروجی آن تشکیل شده از مقادیر گسسته ولتاژ که نشان دهنده مقدار نوری است که بر روی هر یک از المانهای آشکارساز می‌تابد. هر کدام از ۲۵۶ المنت آشکارساز از ۲۵۶ نمونه گسسته که در مورد سیگنال خروجی به ما اطلاعات می دهند تشکیل شده است (شکل ۳).

⁸ Transmitter-

⁹ Receiver -

¹⁰ Position Sensing Detectors -

¹¹ Pixelized Array Detectors -



۳- سنسور آشکارساز آرایه‌ای

آشکارسازهای آرایه ای به پردازش بیشتری نسبت به PSD ها نیاز دارند و سرعت اطلاعات نیز بطور طبیعی کندتر است. مهمترین مزیت هر سیستم مثلث سازی مبتنی بر سنسورهای آرایه ای ، توانایی انجام پردازش بر روی سیگنال است و در ساده ترین حالت ، موقعیت نقطه نورانی به وسیله گرفتن یک میانگین وزنی از دیتای آشکارساز مشخص می شود. اگر ولتاژ هر پیکسل به یک کلمه 8 بیتی تبدیل شود، نتیجه یک آرایه ۲۵۶ کلمه‌ای می شود که بسته به شدت نور، هر کلمه از ۰ تا ۲۵۶ تغییر میکند. برای محاسبه مرکز ثقل از فرمول (۵) استفاده میشود. حاصل فرمول (۵) ثقل موقعیت نقطه نورانی را مشخص می کند و به کاربر سیستم اجازه میدهد تا مرکز نقطه نورانی را بصورت تجمعی از پیکسل ها پیدا کند [۵].

$$\text{Spot Position} = \frac{\sum_{i=1}^{256} I_i P_i}{\sum_{i=1}^{256} I_i} \quad (5)$$

۲-۵- روش زمان پرواز

زمان پرواز یکی از مرسوم ترین روشهای فاصله سنجی لیزری می باشد. که بوسیله آن می توان محدوده اندازه گیری وسیعی (از چند سانتی متر تا دهها کیلومتر) را پوشش داد . در این روش مدت زمان رسیدن سیگنال لیزر به هدف مبنای محاسبه فاصله می باشد. که با محاسبه زمان رفت و برگشت پرتوی لیزر، تخمین مسافت صورت میپذیرد.

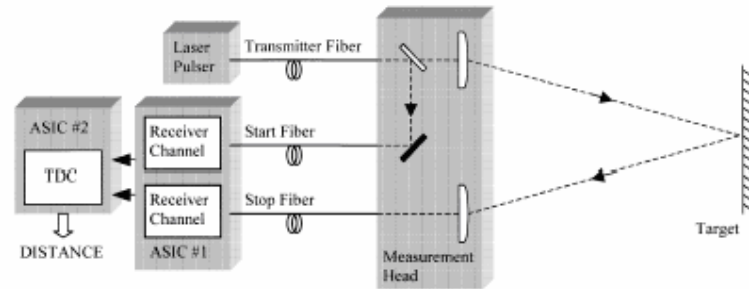
نیاز به مدارات با فرکانس بالا و یا طراحی های پیچیده الکترونیکی ، مناسب برای فواصل طولانی از چند ده سانتی متر تا چند ده کیلومتر (برد ۲۰ کیلومتری آن در یک نمونه نظامی طراحی و پیاده سازی شده است) و امکان طراحی فاصله سنج با دقت ۱ mm ، از خصوصیات برجسته این روش می باشد.

از کاربرد های عمده این روش نیز می توان به دوربینهای نقشه برداری ، تحقیقات فضایی، صنایع هوانوردی و لول سنجی در سیلوها و کانتینرها اشاره نمود [۳].

اصول کلی روش زمان پرواز ثابت است. اما روشهای متفاوتی برای پیاده سازی این اصول وجود دارد. که استفاده از هریک از این روشها تاثیر مستقیمی در دقت دستگاه، محدوده کار، قیمت و ... دارد.

فرستنده پالس لیزر ، دو کانال گیرنده برای پالس های Stop و Start ، اندازه گیر زمان رفت و برگشت و اجزاء اپتیکی لازم ، مانند: لنز و آینه نیم شفاف قسمتهای اصلی تشکیل دهنده این روش هستند.

شمای کلی زمان پرواز و ارتباط قسمتهای مختلف آن در شکل ۴ آمده است [۶].



۴- بلوک دیاگرام روش زمان پرواز

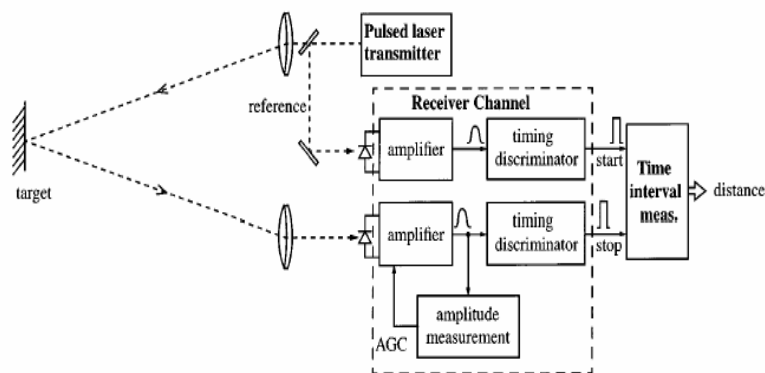
قسمت گیرنده شامل یک آشکار ساز نوری^{۱۲}، یک پیش تقویت کننده^{۱۳}، یک تقویت کننده و یک تفکیک کننده زمانی^{۱۴} (تامین کننده پالس زمانی لاجیک برای قسمت اندازه گیر زمان) می باشد. روش زمان پرواز را به هر طریقی پیاده سازی نماییم، فرستنده لیزر، کانالهای گیرنده لیزر و اجزاء اپتیکی لازم مشابه خواهند بود. اما برای اندازه گیری زمان رفت و برگشت لیزر، روشهای متفاوت وجود دارد. که در این بخش ۲ روش را مورد بررسی قرار می دهیم.

۲-۵-۱- فرستنده پالس لیزر: برای مشخص کردن توان پالس لیزر در فرستنده می توان از فرمول تساوی رادارها و نتایج شبیه سازی قسمتهای اپتیکی و سطح نویز سیستم کمک گرفت. آنچه که واضح می باشد، این است که توان لیزر مورد نیاز رابطه مستقیم با محدوده اندازه گیری متر لیزری دارد. برپایه بررسیهای انجام شده، در یک متر لیزری با محدوده کاری ۱ تا ۳۰ متر پیک توان نوری لازم برای یک تک پالس لیزر و میانگین قدرت در طول فرایند اندازه گیری به ترتیب $34W$ و $420 \mu W$ می باشد [۱].

۲-۵-۲- کانال های گیرنده: وظیفه کانال های گیرنده، دریافت پالس های نوری با قدرت های متفاوت و تبدیل آنها به یک پالس زمانی بسیار دقیق با سطوح ولتاژ منطقی می باشد. که این پالس تولید شده به قسمت TDC فرستاده میشود، تا در قسمت TDC با مشخص شدن پهنای این پالسها، مسافت مورد نظر اندازه گیری شود. برای ایجاد همزمانی میان پرتاب پرتو لیزر و شروع بکار واحد TDC از یک آینه نیمه شفاف و یک آشکار ساز نوری استفاده می شود. در نتیجه کلاً دو کانال گیرنده در طراحی متر لیزری مورد نظر خواهیم داشت:

۱. کانال گیرنده Start (نور منعکس شده از آینه نیم شفاف دریافت می کند و فرمان start را برای شروع بکار واحد TDC صادر می کند).
۲. کانال گیرنده Stop (که نور منعکس شده از هدف را دریافت می کند و فرمان Stop را برای توقف فعالیت TDC صادر می کند) (شکل ۵) [۷].

¹² Photo Detector-
¹³ Preamplifier-
¹⁴ Timing discriminator-



۵- بلوک دیاگرام روش زمان پرواز به همراه جزئیات TDC و AGC

کانال گیرنده برای هر دو کانال Start , Stop یکسان خواهد بود. ضمناً همانطور که می دانیم توان لیزر دریافتی ، با فاصله ، نسبت عکس و با توان پالس لیزر پرتاب شده ، نسبت مستقیم دارد.

۲-۵-۳- مبدل زمان به دیجیتال^{۱۵} (TDC)

TDC ، یکی از اصلی ترین و مهمترین بخشهای یک فاصله سنج لیزری است که وظیفه آن تبدیل زمان رفت و برگشت نور لیزر به یک کلمه دیجیتال می باشد. در واقع در ورودی یک واحد TDC ، پالسی را داریم که با رسیدن فرمان Start ، به سطح یک منطقی می رود و پس از گذشت زمان و با رسیدن فرمان Stop ، دوباره صفر میشود. در خروجی نیز یک رشته دیجیتال متناسب با زمان یک بودن پالس ورودی داریم.

از بین قسمتهای مختلف فاصله سنج لیزری تعیین کننده ترین قسمت در مورد دقت دستگاه، واحد TDC می باشد. در ادامه پیاده سازی این واحد به سه روش مورد بررسی قرار میگیرد:

۲-۵-۳-۱- استفاده از شمارنده های معمولی بدون پردازش دیجیتال: استفاده از این روش گرچه ارزان و ساده است ولی دقت آن برای فواصل کم به هیچ وجه قابل قبول نیست. مسافت مورد نظر طبق فرمول (۶) محاسبه می شود:

$$t = N \times (1/f) \quad (6)$$

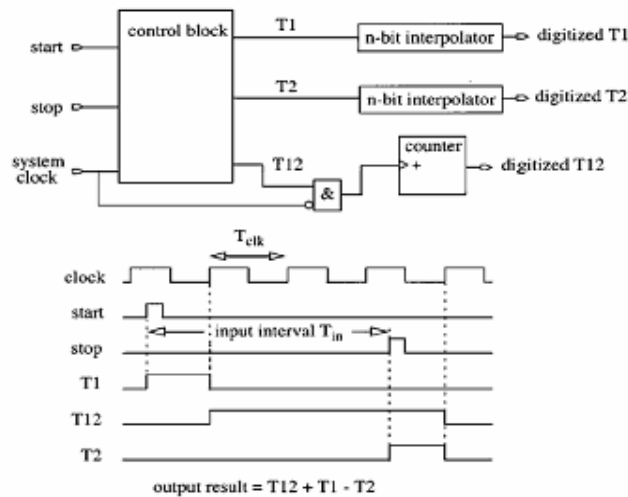
$$2d = c \times t \rightarrow d = (c \times t)/2 \quad (7)$$

N تعداد کلاک پالسهای شمرده شده توسط کانتر، f فرکانس کلاک پالس مرجع، t زمان رفت و برگشت پالس لیزر، d فاصله متر لیزری تا هدف و c سرعت نور می باشد.

۲-۵-۳-۲- ساخت واحد TDC با استفاده از درون یابی^{۱۶}

در این قسمت قصد داریم، یک واحد TDC بسازیم که با فرکانس ساعت پایینتر کار کند و در عین حال دارای توانایی بالایی باشد. کارکرد اصلی روش در شکل (۶) توضیح داده شده است.

¹⁵ Time to Digital Converter-
¹⁶ Inter Polator-



۶- چگونگی اصول کارکرد TDC

فاصله زمانی T_{in} از لبه بالا رونده پالس Start تا لبه بالا رونده پالس Stop در ۳ مرحله به دیجیتال تبدیل می شود. قسمت اصلی یعنی T12 بطور سنکرون با کلاک سیستم می باشد و می توان با شمردن کلاک پالس ها با دوره تناوب T_{CLK} زمان آنرا محاسبه کرد. سپس قسمت های جزئی T1, T2 بطور مجزا به یک واحد درون یاب n بیتی اعمال می شوند. در واقع این قسمت از اندازه گیری بصورت آسنکرون می باشد. چراکه دیگر بطور مستقیم از شمارش کلاک پالس مرجع سیستم حاصل نمی گردد. از لحاظ تئوری، بدترین حالت دقت تک پرتو^{۱۷} در حالت اندازه گیری آسنکرون برابر

$$0.5 \frac{T_{ak}}{2^n} \text{ می باشد [۸].}$$

۳- نتیجه گیری:

با جمع بندی همه مباحث مطرح شده و مقایسه روشهای مورد بحث، می توان نتیجه گرفت یکی از مهمترین عوامل در انتخاب روش فاصله سنجی از طریق لیزر، فاصله مورد نظر می باشد، چنانچه فواصل کوچک با دقت بالا مد نظر باشد، باید از روش مثلث سازی و یا روش تداخل سنجی استفاده شود. برای فواصل میانی می توان از روشهای جابجایی فاز و یا FMCW استفاده کرد و چنانچه فواصل طولانی (چند صد متر تا چند ده کیلومتر) مد نظر باشد، از روش زمان پرواز استفاده می نماییم.

مراجع

- [1]. R.S Longhurst , *Geometrical & Physical Optics*. Longman, London , 1973, pp. [۱] 3-29 & pp.122-124 & pp. 185-189 .
- [2]. S.Poujouly , B.Journet & D.Miller , “Digital Laser Range Finder :Phase shift Estimation by undersampling Technique,” *IEEE Trans . Instrum . Meas.*
- [3]. G.Bazin & B journet , “A new laser range finder based on FMCW-like method,” *IEEE Trans . Instrum . Meas .* Jun 1996.

- [4].D.Dupuy & M.Lescure , “Improvement of the FMCW Laser Range Finder by an APD Working as an Optoelectronic Mixer,” *IEEE Trans . Instrum . Meas .*vol .51, Oct .2002 .
- [5].W.P.Kennedy , “The basics of Triangulation Sensors ,” CyberOptics Corp , May.1998.
- [6]. P.Palojarvi, K.Maatta & J.Kostamovaara , “Pulsed Time of flight Laser Radar Module With Milimeter Level Accuracy Using Full Custom Receiver and TDC ASICs,” *IEEE Trans . Instrum . Meas.*vol.51.Oct 2002.
- [7].T.Ruotsalainen,P.Palojarvi & J.Kostamovaara ,
“A Wide Dynamic Range Receiver Channel for a Pulsed Time of Flight Laser Radar,” *IEEE Trans . Instrum . Meas.*vol.36, Aug,2001.
- [8]. E.Raisanen , T.Rahkonen & J.Kostamovaara , “An Integrated Time to Digital Converter with 30ps,” *IEEE Journal ,Solid state circuits* , vol.35 , Oct .2000.