

اندازه گیری مسافت به کمک وسیله لیزر

حسین ابراهیمی^۱ محمد حسین قائدرحمتی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، کد پستی ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱

چکیده

با توجه به پیشرفت های شگرف در زمینه الکترونیک و کامپیوتر، روش های متعددی برای اندازه گیری فاصله و مسافت موجود است. اندازه گیری دقیق فاصله از جسم و یا فاصله دو جسم از یکدیگر در زمینه های مختلف از جمله: قطعه سازی، ابزار دقیق، رباتیک و صنایع نظامی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. امروزه با اختراع لیزرها و کاربرد وسیعی که در علوم و صنعت دارند می توان فواصل مختلف را با دقت بسیار خوبی محاسبه کرد. در این مقاله چهار روش برای فاصله سنجی به کمک لیزر ارائه شده است که هر کدام برای فاصله های کوچک یا بزرگ کاربرد دارند. روش های تداخل سنجی، جابه جایی فاز، FMCW و زمان پرواز روش های ارائه شده در این مقاله می باشند که بر اساس فاصله مورد نظر از هر کدام می توان استفاده کرد. نتایج به دست آمده از این روش ها کاملا دقیق بوده و به صورت تجربی نیز ثابت شده.

کلمات کلیدی

لیزر- تداخل سنجی- مایکلسون- جابه جایی فاز- FMCW- زمان پرواز

لیست نمادها

$\Delta\phi$ جابه جایی فاز

f_0 فرکانس

τ_d زمان رفت و برگشت

d فاصله

c سرعت نور

^۱. دانشجوی کارشناسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان. hoseines1370@Yahoo.com

^۲. دانشجوی کارشناسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان. Mh_rahmati@Yahoo.com

۱- مقدمه

اندازه گیری فاصله یک جسم یا بین دو جسم از اهمیت ویژه ای برخوردار است که کاربردهای مهمی در صنایع هوایی، مکانیکی و نظامی دارد. در گذشته این فاصله ها با روش های دستی انجام می شد که خطای زیادی در پی داشت. روش های ارائه شده در این مقاله عبارت است از روش تداخل سنجی که برای فاصله و جابه جایی های کوچک استفاده می شود و فاصله بر حسب موج به کار رفته محاسبه می شود، در مرجع [1] و [2] به آن اشاره شده است. روش جابه جایی فاز که در آن بر اساس جابه جایی فازی ایجاد شده بر روی سیگنال دریافتی از هدف به تخمین فاصله می پردازد، در مرجع [3] و [4] به آن اشاره شده است. روش FMCW یا جابه جایی فرکانس ایجاد شده بر روی سیگنال دریافتی از هدف که ملاک فاصله تا هدف مورد نظر می باشد. در مرجع [3] و [4] به آن اشاره شده است. روش زمان پرواز برای اندازه گیری فاصله های زیاد به کار می رود و در این روش، مدت زمان رسیدن سیگنال لیزر به هدف مبنای محاسبه فاصله است که در مرجع [7],[6],[1] به آن اشاره شده است.

۱- روش های فاصله سنجی با لیزر

۱-۱- تداخل سنجی

یکی از روش های اندازه گیری فاصله و یا جابه جایی های کوچک استفاده از تداخل سنجی می باشد. در روش های تداخل سنجی، فاصله بر حسب طول موج به کار گرفته شده، محاسبه می شود و دقت های یک دهم طول موج به راحتی به دست می آید و نیز با استفاده از روش های الکترونیکی و کامپیوتری جدید حد تفکیک حدود $\frac{\lambda}{100}$ را در بررسی و آزمایش سطوح می توان به دست آورد. در روش تداخل سنجی، از شمارش تعداد نوارهای تداخلی استفاده می شود. می توان از تداخل سنجهای مایکلسون، ماخ زندر و فبری پرو، استفاده نمود. به طور کلی این روش معمولاً برای محدوده اندازه گیری در حدود چندده سانتی متر با دقت های بسیار بالا (در حدود ۲۰ تا ۵۰ میکرومتر) استفاده می شود. 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.

۲-۱- 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.

$$\Delta\phi = 2\pi f_0 \tau_d$$

$\Delta\phi$ جابجایی فاز، f_0 فرکانس مدولاسیون، τ_d زمان رفت و برگشت پالس می باشد. محدوده اندازه گیری این روش وابسته به فرکانس مدولاسیون (f_0) می باشد 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 می توان 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.

فاصله d مسافتی است که یک موج نور بازتابیده شده از هدف در زمان τ_d طی می کند. اگر توان نوری دیود لیزری به وسیله یک موج سینوسی در فرکانس f_0 مدوله شود، می توان گفت که زمان انتشار به جابجایی فاز بین سیگنال های رفت و برگشت ($\Delta\phi$) تبدیل می شود.

$$\tau_d = \frac{2d}{c}$$

انتخاب فرکانس مدولاسیون f_0 به نوع کاربرد بستگی دارد. به طور مثال با فرکانس ۱۰ مگا هرتز محدوده نامیهم 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 کانال های فوتوالکتریک و لیزر بوجود می آید، غیر خطی بودن ظرفیت پیوندهای ترانزیستوری، منابع خطایی هستند که در روش جابجایی فاز نمی توان از آنها صرفنظر نمود و رفع آنها هم به سادگی امکان پذیر نیست. 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.) 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 تکنی کها می باشند.

۳-۱- 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. با توجه به فرمول زیر و مدت زمان رفت و برگشت پرتوی لیزر که با سرعت نور حرکت می کند می توان مسافت را تا هدف تعیین نمود وبا مقایسه پارامتر های دو موج مدوله شده FM فرستاده و گرفته شده بدست می آید.

$$\tau_d = \frac{2d}{c}$$

اگر پرتوی لیزرارسالی مدوله شده توسط یک پالس باشد در اینصورت می توان زمان رفت و برگشت آن را مبنای محاسبه فاصله قراردادده شود. اگر پرتوی لیزر مدوله شده توسط یک موج سینوسی با فرکانس f باشد پس زمان انتشار میان فرکانس موج منتشر شده و فرکانس سیگنال برگشتی تبدیل می شود. پس داریم

$$d_{nar} = c/2f$$

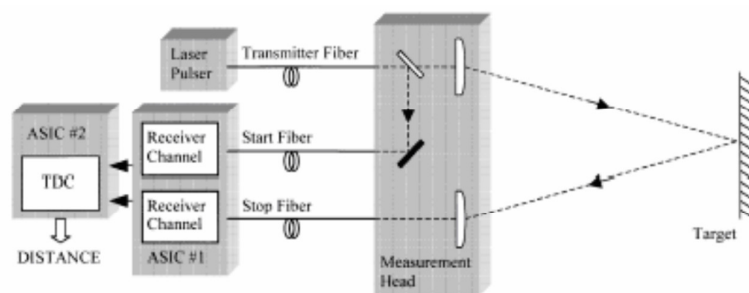
d_{nar} محدوده نامبهم در اندازه گیری می باشد. انتخاب فرکانس مدولاسیون بستگی به کاربرد مورد نظر دارد ، به طورمثال فرکانس ۱۰ مگا هرتز منجر به d_{nar} برابر 15m می شود که به عنوان یکی از کاربردهای آن میتوان از سیستمهای بینایی رباتها نام برد. سایر مشخصات این روش شبیه روش جابجایی فاز می باشد

۱-۴- روش زمان پرواز

زمان پرواز یکی از مرسوم ترین روش های 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 می پذیرد. از کاربرد های عمده این روش نیز می توان به دوربینهای نقشه برداری ، تحقیقات فضایی، صنایع هوانوردی اشاره کرد [۳]

روشهای متفاوتی برای پیاده کردن اصول زمان پرواز وجود دارد که به دقت در دستگاه محدوده کار و قیمت وابسته است اما در کل اصول آن ثابت است. 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 آیینه نیم شفاف قسمتهای اصلی تشکیل دهنده این روش هستند که شمای کلی روش زمان پرواز در شکل ۱ آمده است [۶]

قسمت گیرنده شامل یک آشکار ساز نوری ، یک پیش تقویت کننده ، یک تقویت کننده و یک تفکیک کننده زمانی میباشد. فرستنده لیزر، کانالهای گیرنده لیزر و اجزاء اپتیکی برای تمام روش های اجرای زمان پرواز مشابه اند اما برای اندازه گیری زمان رفت و برگشت لیزر، روشهای متفاوت وجود دارد. که در این بخش 2 روش را مورد بررسی قرار می دهیم.



شکل ۱

۱-۴-۱- فرستنده پالس لیزر

برای مشخص کردن توان پالس لیزر در فرستنده می توان از فرمول تساوی رادارها و نتایج شبیه سازی قسمت های اپتیکی و سطح نویز سیستم کمک گرفت. واضح 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 1 تا 30 متر پیک توان نوری لازم برای یک تک پالس لیزر و میانگین قدرت در طول فرایند اندازه گیری به ترتیب 34W و $420 \mu W$ است [۱]

۱-۴-۲- 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 می شود 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 آئینه نیمه شفاف و یک آشکار ساز نوری استفاده می شود. پس در کل دو کانال گیرنده در طراحی متر لیزری مورد نظر خواهیم داشت :

۱. کانال گیرنده START که نور منعکس شده از آئینه نیم شفاف را 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 فعلیت TDC صادر می کند [۷]

کانال گیرنده برای هر دو کانال START و 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

۱-۴-۳- مبدل زمان به دیجیتال (TDC)

یکی از اصلی ترین و مهمترین بخشهای یک فاصله سنج لیزری TDC 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 (۱) 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 داریم. در ادامه به دو روش از روشهای پیاده سازی واحد TDC اشاره می کنیم.

۱-۴-۳-۱- 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 زیر محاسبه می شود

$$t = N \times (1 f)$$

$$2d = c \times t$$

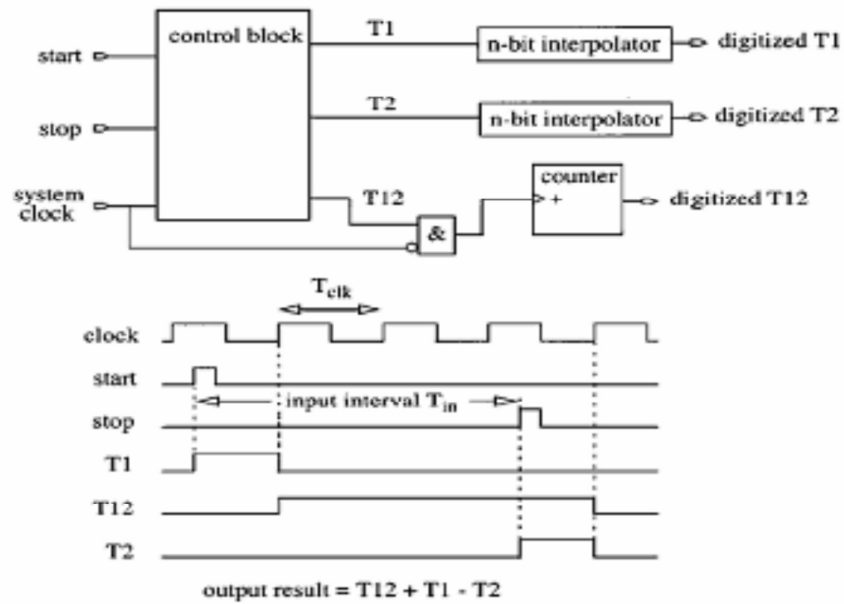
که N تعداد کلاک پالسهای شمرده شده توسط کانتر، f فرکانس کلاک پالس مرجع، t زمان رفت و برگشت پالس لیزر، d فاصله متر لیزری تا هدف و c سرعت نور می باشد

۱-۴-۳-۲- ساخت واحد TDC با استفاده از درون یابی

در این قسمت قصد داریم، یک واحد TDC بسازیم که با فرکانس ساعت کمتر کار کند و در عین حال دارای توانایی بالایی باشد. کارکرد اصلی روش در شکل ۲ توضیح داده شده است.

فاصله زمانی T_{in} از لبه بالا رونده پالس start تا لبه بالا رونده پالس stop در ۳ مرحله به دیجیتال تبدیل میشود. قسمت اصلی یعنی T_{12} 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 T_1 و T_2 بطور مجزا به یک واحد درون یاب n بیتی اعمال میشوند. 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 در حالت اندازه گیری آسنکرون برابر $\pm T_{ak} / 2$ می باشد



شکل ۲

نتیجه گیری

در فاصله سنجی از طریق لیزر برای فواصل کوچک با دقت بالا از روش تداخل سنجی استفاده می شود و برای فواصل متوسط از روش جابجایی فاز یا روش FMCW استفاده می شود و برای فواصل بزرگ از روش مدت زمان پرواز استفاده می شود.

مراجع

- [1]. R.S Longhurst , *Geometrical & Physical Optics*. Longman, London , 1973, pp. [1] 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.