

اندازه‌گیری سرعت ارتعاش لحظه‌ای بلندگو با کنترل عملکرد درست آن با

استفاده از ارتعاش سنج لیزری مبتنی بر اثر داپلر

فرشید صیدی پور

کارشناسی ارشد

گروه اتمی و مولکولی و نجوم، دانشکده فیزیک

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

fsp1375@gmail.com

فاطمه رضائی*

استادیار

گروه اتمی و مولکولی و نجوم، دانشکده فیزیک،

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

fatemehrezaei@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۶

چکیده

ارتعاش‌سنج‌های لیزری مبتنی بر اثر داپلر^۱ (LDV) از دقیق‌ترین ابزارهای اندازه‌گیری هستند که در آنها از مبانی تداخل‌سنجی لیزری و اثر داپلر جهت اندازه‌گیری مشخصات ارتعاشی اجسام استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها قادر به اندازه‌گیری سرعت ارتعاش از مرتبه صدم میکرومتر بر ثانیه تا چند ده متر بر ثانیه با بالاترین دقت هستند. چیدمان‌های متعددی از LDV وجود دارد که در هر کدام از آنها از پردازش‌های آنالوگ یا دیجیتال مختلفی جهت استخراج سیگنال می‌توان استفاده نمود. در این پژوهش، در ابتدا سیگنال تداخلی شبیه‌سازی شد و با استفاده از روش شمارش عبور از صفرها سرعت ارتعاش محاسبه شد. سپس، به صورت تجربی از چیدمان LDV هموداین مایکلسون تک فوتودیودی^۲ به کمک پردازش‌های آنالوگ و همچنین دیجیتال مانند شمارش عبور از صفرها و میانگین‌گیری متحرک جهت اندازه‌گیری سرعت ارتعاش یک بلندگو استفاده شد. نتایج نشان داد که با اعمال یک فرکانس ۱۷ هرتز به بلندگو، سرعت ارتعاش آن از مرتبه چند میلی‌متر بر ثانیه محاسبه شده است. همچنین، قبل و بعد از اعمال میانگین متحرک سرعت‌های بلندگو با هم مقایسه شدند و مشخص شد که بعد از حذف نوفه سیگنال‌ها به طور دقیق‌تری سرعت حرکت جسم مرتعش را نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: ارتعاش‌سنج لیزری، اثر داپلر، تداخل‌سنج مایکلسون، تداخل‌سنجی هموداین

۱. مقدمه

از دیرباز جهت به‌دست آوردن سرعت و ارتعاش جسم متحرک، از روش‌های قدیمی مانند امواج آکوستیک استفاده می‌کردند. بدین ترتیب که با بررسی سیگنال‌های دریافتی از هدف متحرک، سرعت و ارتعاش آن را به‌دست می‌آوردند. از آنجاکه روش‌های مذکور دارای معایبی نظیر عدم کارکرد

مناسب در شرایط آب و هوایی نامساعد، نیاز به محیط مادی برای انتشار امواج آکوستیک و عدم دقت کافی به دلیل وجود نوفه‌های فراوان و غیره هستند، روش‌های مناسبی برای اندازه‌گیری دقیق نیستند. اما در روش ارتعاش‌سنج لیزری مبتنی بر اثر داپلر، علاوه بر رفع معایب بالا، مزایایی از قبیل کاربرد این روش در هرگونه شرایط آب و هوایی وجود دارد.

همچنین، غیرتماسی بودن اندازه‌گیری‌های این چیدمان آزمایشگاهی در این پژوهش فراهم شده است به نحوی که این چیدمان، از هدف مرتعش در شرایط داغ یا سرد بودن بیش از حد و در وضعیت عدم دسترسی به هدف می‌تواند اندازه‌گیری انجام دهد. با به کار بردن این روش، می‌تواند به‌طور هم‌زمان ارتعاش و سرعت هدف مورد نظر را تنها به‌وسیله یک دستگاه و بهره‌گیری از یک پالس لیزر به‌دست آورد که این امر به‌منزله کاهش هزینه‌ها نسبت به سایر روش‌های متداول است. این روش، به‌دلیل واگرایی بسیار پایین نور لیزر در مسافت‌های طولانی و با لحاظ نمودن لیزری با طول همدوسی^۳ بالا، می‌تواند ارتعاش و سرعت سازه متحرک را با دقت و سرعت بالا محاسبه نماید. با استفاده از روش‌های سنتی مانند شتاب‌سنج‌ها در بهترین شرایط می‌توان به حساسیت از مرتبه میکرومتر رسید [۱]، این درحالی‌است که دستگاه‌های LDV قادر به اندازه‌گیری جابه‌جایی از مرتبه نانومتر هستند. به‌علاوه، به‌دلیل عدم آسیب‌رسانی به هدف مورد نظر، می‌تواند در اندازه‌گیری‌های نمونه‌های بیولوژیکی نظیر سرعت و ارتعاش تپش قلب و تنفس نیز به کار رود. لازم به ذکر است که به علت عدم نیاز نور لیزر به محیط مادی جهت انتشار، محدودیت‌های مکانی روش‌های دیگر وجود ندارد و بدین ترتیب ارتعاش‌سنج لیزری مبتنی بر اثر داپلر نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد. اثر داپلر نخستین بار توسط کریستین داپلر در سال ۱۸۴۲ مطرح شد. او در این سال نظریه‌اش را در باب تغییر نور رنگی ستارگان دوگانه در حین حرکت نسبی نسبت به مشاهده‌گر عنوان کرد. بیش از یک قرن پس از بیان این نظریه، در سال ۱۹۶۴ اولین بار در دانشگاه کلمبیا سرعت‌سنج‌های لیزری مبتنی بر اثر داپلر برای اندازه‌گیری سرعت شاره‌ها مورد استفاده قرار گرفتند [۲]. سپس، در سال ۱۹۸۲ در سازمان تحقیقات انرژی اتمی انگلستان از ارتعاش‌سنج‌های لیزری مبتنی بر اثر داپلر جهت اندازه‌گیری ارتعاش استفاده شد [۳]. این دهه را می‌توان یک نقطه عطف برای LDVها و ورود حرفه‌ای آنها

به‌عنوان یک ابزار قدرتمند و رقیب جدی برای سایر دستگاه‌های اندازه‌گیری دانست. از آن زمان تاکنون به‌روزرسانی‌ها و بهینه‌سازی‌های متعدد این دستگاه‌ها سبب رشد روز افزون استفاده از آنها در صنایع مختلف مانند هوافضا [۴]، صوت [۵]، خودرو [۶]، زیست‌شناسی [۷]، کالیبراسیون [۸]، آشکارسازی مین‌های زمینی [۹، ۱۰] و شنود [۱۱] شد. در این مقاله از روش شمارش عبور از صفرها به‌منظور اندازه‌گیری سرعت ارتعاش یک بلندگو به‌وسیله چیدمان میکلسون^۴ هموداین^۵ تک فوتودیودی استفاده شده است. در ابتدا سیگنال LDV شبیه‌سازی شده و سپس، سرعت لحظه‌ای سیگنال شبیه‌سازی شده محاسبه می‌شود. پس از آن چیدمان تجربی جهت اندازه‌گیری سرعت ارتعاش بلندگو شرح داده می‌شود، سیگنال خام تداخلی خروجی از دستگاه LDV نمایش داده شده و سرعت ارتعاش از این سیگنال استخراج می‌شود. در نهایت جهت کاهش نوفه روش میانگین متحرک روی سیگنال سرعت اعمال می‌شود.

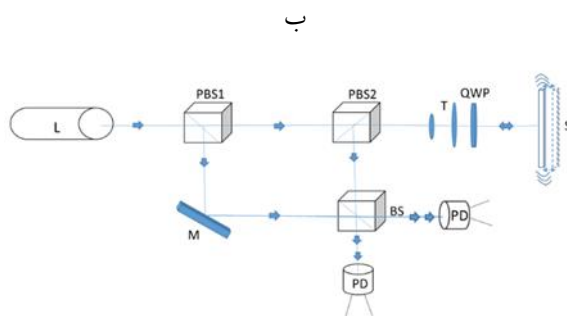
۲. تئوری تحقیق

در دستگاه LDV پرتو لیزر با فرکانس f_0 به جسم مرتعش تابیده می‌شود و از تجزیه و تحلیل پرتوی بازتابی اطلاعات ارتعاشی به‌دست می‌آید. در این روش، مطابق معادله ۱، تحت اثر داپلر فرکانس جسم مرتعش به اندازه Δf متناسب با سرعت جسم V نسبت به پرتو فرودی تغییر می‌کند [۱۲].

$$\Delta f = 2Vf_0/v \quad (۱)$$

در این معادله v سرعت نور در محیط انتشار است. شایان ذکر است در این روش از آشکارسازهای فوتونی جهت تبدیل شدت نور دریافتی به سیگنال الکتریکی استفاده می‌شود که دارای محدودیت پهنای باند هستند و قادر به آشکارسازی فرکانس‌های بسیار بالای نور نیستند. بنابراین، برای اینکه فقط تغییر فرکانس پرتو بازتابی توسط آشکارساز دریافت شود، از تداخل‌سنج‌های اپتیکی استفاده می‌شود.

M آینه، BS یک باریکه‌شکن، PBS باریکه‌شکن قطبیده^۷، L لیزر، P قطبیده، QWP تیغه ربع‌موج^۸، PD آشکارساز فوتونی، و T تلسکوپ است. در شکل ۱-الف پرتوی فرودی از لیزر توسط یک باریکه‌شکن به دو پرتوی مرجع و اندازه‌گیری تقسیم می‌شود. اغلب از ترکیب یک باریکه‌شکن قطبیده و دو تیغه ربع‌موج در بازوهای مرجع و اندازه‌گیری برای جلوگیری از بازتاب نور به لیزر و افزایش سیگنال اپتیکی در آشکارساز استفاده می‌شود. قرار دادن تیغه‌ها در جلوی آینه و جسم باعث می‌شود قطبش نور تابیده شده به آنها پس از بازتاب و عبور دوباره از تیغه‌ها به اندازه ۹۰ درجه بچرخد و در نتیجه پرتوها بر روی آشکارساز دارای قطبش، عمود بر هم هستند. بنابراین، به منظور ایجاد زنش اپتیکی^۹ از یک قطبیده که دارای محور عبوری با زاویه حدود ۴۵ درجه نسبت به قطبش دو پرتوی تداخلی است، در جلوی آشکارساز استفاده می‌شود. در تداخل سنج ماخ-زندر نیز مطابق شکل ۱-ب پرتو توسط یک باریکه‌شکن قطبیده به دو باریکه تقسیم می‌شود و باریکه‌شکن دوم PBS2 پرتو را به سمت نمونه هدایت می‌کند.



شکل ۱. چیدمان اپتیکی تداخل سنج‌های الف) مایکلسون و ب) ماخ-زندر.

سمت آشکارساز استفاده می‌شود. قابل ذکر است که اگر از دو آشکارساز استفاده شود می‌توان از تمام توان پرتوی مرجع و اندازه‌گیری حداکثر استفاده را نمود. از آنجایی که سیگنال‌های تداخلی در دو آشکارساز اختلاف فاز ۱۸۰ درجه دارند، می‌توان از تفاضل سیگنال‌های خروجی از دو آشکارساز

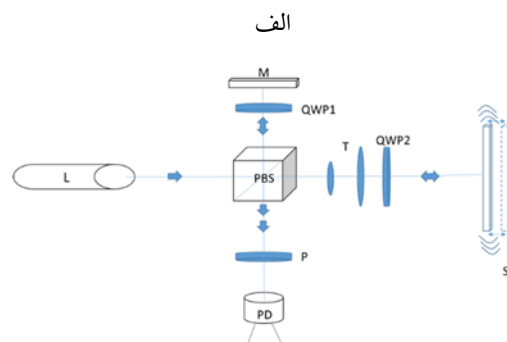
تداخل سنج‌ها از برهم‌نهی دو موج مرجع و بازتابی یک سیگنال‌زنش تولید می‌کنند که شامل اطلاعات مربوط به تغییرات فرکانس و فاز امواج اولیه است. پرتو مرجع و بازتابی از جسم به ترتیب با میدان‌های E_1 و E_2 نمایش داده می‌شوند:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01} \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) \\ E_2 &= E_{02} \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) \end{aligned} \quad (۲)$$

در این معادلات، E_{01} و E_{02} به ترتیب دامنه‌های مربوطه میدان‌های الکتریکی پرتوی مرجع و بازتابی هستند. f_1 فرکانس پرتوی مرجع، f_2 فرکانس پرتوی بازتابی و ϕ_1 و ϕ_2 فاز این دو پرتو روی آشکارساز هستند. جریان خروجی ثبت شده بر روی آشکارساز حاصل از تداخل این دو پرتو به صورت معادله ۳ است:

$$\begin{aligned} I &= |E_1 + E_2|^2 \\ &= I_1 + I_2 \\ &\quad + E_{01}E_{02} \cos(2\pi(f_1 - f_2)t + \phi_1 \\ &\quad - \phi_2) \end{aligned} \quad (۳)$$

شکل ۱-الف و شکل ۱-ب به ترتیب شماتیک دو تداخل سنج مایکلسون و ماخ-زندر^۶ را نمایش می‌دهند. در این شکل‌ها،



در این چیدمان، قطبش نور بازتابی توسط تیغه ربع‌موج حدود ۹۰ درجه می‌چرخد و سپس PBS2 نور را به سمت آشکارساز هدایت می‌کند. تا اینجا پرتو مرجع و اندازه‌گیری دارای قطبش یکسان اما با جهت متعام هستند. بنابراین، از یک باریکه‌شکن غیرقطبیده BS جهت هم‌راستا کردن پرتوها به

به منظور حذف مؤلفه‌های DC طبق معادله ۳ استفاده کرد. از مزایای این امر می‌توان در تداخل سنج مایکلسون نیز بهره جست. با استفاده از این دو آشکارساز و یک تیغه ربع‌موج در جلوی یکی از آشکارسازها به نحوی که باعث یک اختلاف فاز ۹۰ درجه بین سیگنال ورودی به آشکارسازها شود را می‌توان به منظور تعیین جهت ارتعاش استفاده کرد. به چنین چیدمان‌هایی که در شکل ۱ نیز نمایش داده شده است چیدمان هموداین گفته می‌شود. اگر از معادله ۳ برای این چیدمان‌ها استفاده شود، آنگاه معادله زیر به دست می‌آید:

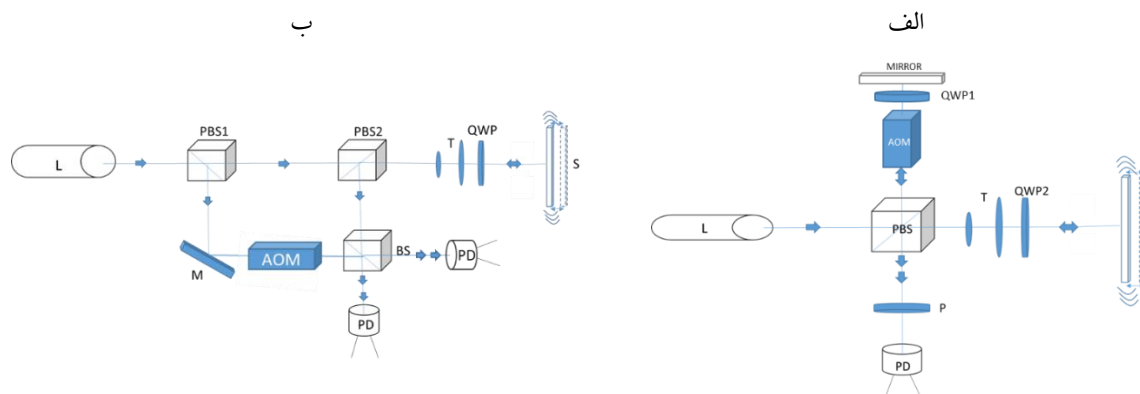
$$f_1 = f_2 = f_0 \quad (۴)$$

معمولاً برای تشخیص جهت حرکت و ارتعاش از چیدمان‌های هتروداین که در آنها یک مدولاتور صوتی-

نوری^{۱۰} مانند سلول براگ^{۱۱} در یکی از بازوهای تداخلی قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. نمونه‌هایی از این چیدمان‌ها برای دو تداخل سنج مایکلسون و ماخ-زندر در شکل ۲ قابل مشاهده است. اگر از معادله ۳ برای چیدمان‌های هتروداین در شکل ۲ استفاده شود آنگاه روابط فرکانسی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$f_1 = f_0, \quad f_2 = f_0 + f_b \quad (۵)$$

که در معادله فوق، f_b مقدار تغییر فرکانسی است که توسط دستگاه تغییر فرکانس به پرتوی مرجع اعمال شده است [۱۲، ۱۳].



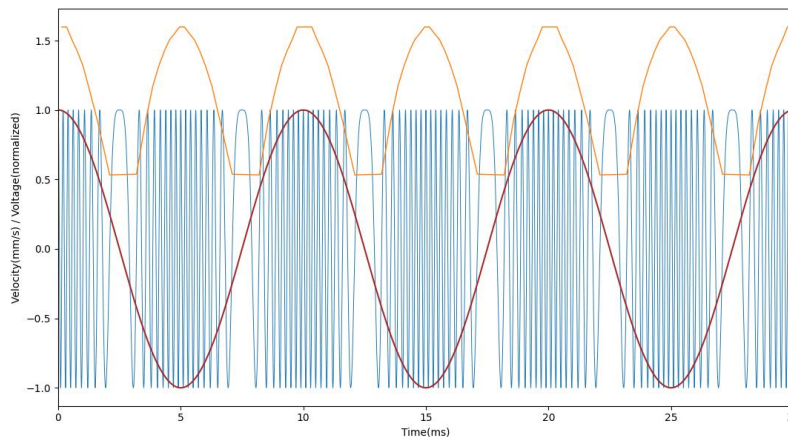
شکل ۲. چیدمان اپتیکی هتروداین تداخل سنج‌های الف) مایکلسون و ب) ماخ-زندر

پردازنده منتقل می‌شوند و از الگوریتم‌هایی برای استخراج سرعت استفاده می‌شود. از روش‌های استخراج سرعت دیجیتال می‌توان به روش تانژانت معکوس^{۱۴} و روش شمارش فریز اشاره کرد. روش تانژانت معکوس در چیدمان‌های هموداین دوفوتودیودی و چیدمان‌های هتروداین قابل استفاده است، اما روش شمارش فریز را می‌توان برای چیدمان‌های هموداین تک فوتودیودی نیز استفاده نمود. در این روش از شمارش عبور از صفر^{۱۵} سیگنال

از مشاهده سیگنال خام خروجی بر روی آشکارساز نمی‌توان به سادگی اطلاعات دقیقی درباره سرعت به دست آورد. به طور کلی، روش‌های مختلفی به منظور استخراج سرعت وجود دارد که به دو دسته آنالوگ و دیجیتال تقسیم می‌شوند. در روش‌های آنالوگ از سخت‌افزارهای الکترونیکی مانند مبدل‌های فرکانس به ولتاژ، حلقه‌های قفل فاز^{۱۶} و فریز شمارها^{۱۳} استفاده می‌شود و در روش‌های دیجیتال ابتدا سیگنال توسط یک مبدل آنالوگ به دیجیتال به داده‌های دیجیتال تبدیل می‌شود. سپس، این داده‌ها به کامپیوتر یا برد

خام برای به دست آوردن سرعت یا جابه‌جایی استفاده می‌شود. در این پژوهش به دلیل سادگی چیدمان و همچنین عدم اندازه‌گیری جهت ارتعاش، از چیدمان هموداین تک فوتودیودی استفاده شده است.

۳. شبیه‌سازی



شکل ۳. سیگنال شبیه‌سازی شده خروجی از آشکارساز برای یک تحریک سینوسی با فرکانس ۱۰۰ هرتز و دامنه ارتعاش ۴λ

بازه زمانی بین دو عبور از صفر متوالی از رابطه ۷ به دست می‌آید:

$$V_k = \frac{\lambda}{4(t_{k+1} - t_k)} \quad (7)$$

با استفاده از این معادله، سرعت برای کل سیگنال محاسبه می‌شود و در نهایت سیگنال سرعت به صورت نمودار نارنجی رنگ در شکل ۳ به دست می‌آید.

۴. چیدمان آزمایش

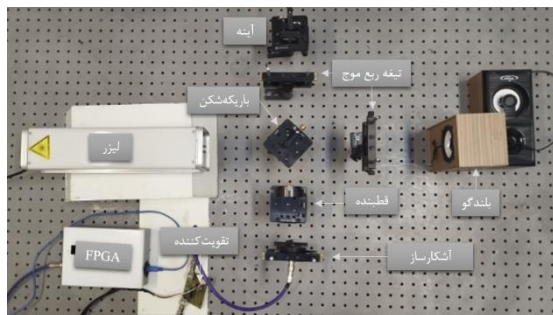
در این مقاله از چیدمان هموداین مایکلسون تک فوتودیودی به عنوان LDV برای اندازه‌گیری سرعت ارتعاش یک بلندگو استفاده شده است. در شکل ۴ چیدمان LDV استفاده شده در این مقاله نشان داده می‌شود. در این آزمایش از یک لیزر هلیوم-نئون غیرقطبیده با طول موج ۶۳۳ نانومتر استفاده شده است که نور آن توسط یک باریکه‌شکن قطبیده به دو پرتو مرجع و اندازه‌گیری تقسیم می‌شود که پرتو اندازه‌گیری

از روش شمارش عبور از صفرها برای محاسبه سرعت لحظه‌ای استفاده می‌شود. برای این منظور این مراحل طی می‌شود: ابتدا عبور از صفرها یا همان محل‌های تقاطع سیگنال با محور x شناسایی می‌شوند. اگر فاصله زمانی بین دو عبور از صفر متوالی که معادل با نصف یک طول موج است برابر t در نظر گرفته شود فرکانس لحظه‌ای به صورت $f = \frac{1}{2t}$ است. با جای‌گذاری f در معادله ۱ می‌توان V یا سرعت را در هر لحظه محاسبه نمود. پس از اینکه همه عبور از صفرها شناسایی شد، زمان رخ دادن هر عبور از صفر به ترتیب زمانی در یک آرایه ذخیره می‌شود:

$$L = [t_k, t_{k+1}, t_{k+2}, \dots], k = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

در این آرایه t_k ها زمان‌هایی هستند که عبور از صفر در آن اتفاق افتاده است. با فرض اینکه سرعت حرکت از یک عبور از صفر تا عبور از صفر بعدی ثابت است، سرعت جسم در

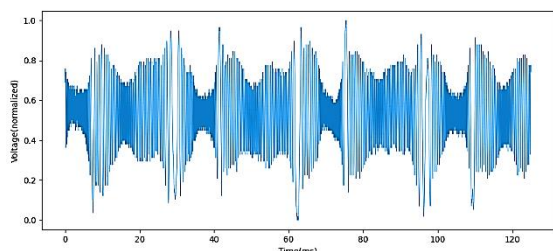
به سمت جسم تابیده و پس از بازتاب از آن به وسیله باریکه شکن به سمت آشکارساز هدایت می شود و پرتو مرجع که به سمت آینه حرکت کرده توسط آن بازتاب یافته و به سمت آشکارساز هدایت می شود و این دو پرتو در آشکارساز با هم تداخل می کنند.



شکل ۴. چیدمان آزمایشگاهی به منظور اندازه گیری سرعت

حرکت جسم مرتعش

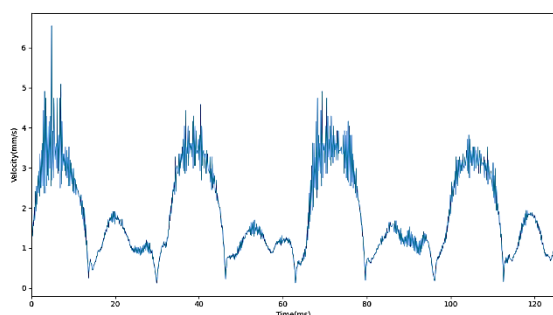
روی نقطه مورد اندازه گیری از بلندگو چسبانده می شود که علاوه بر افزایش نسبت سیگنال به نوفه منجر به عدم نیاز به عدسی نیز است. در نهایت به منظور تست عملکرد این چیدمان، فرکانس ۱۷ هرتز توسط سیگنال ژنراتور به بلندگو اعمال می شود و فرایند اندازه گیری ارتعاش صورت می پذیرد. در شکل ۵ سیگنال دریافتی توسط کامپیوتر نمایش داده می شود.



شکل ۵. سیگنال خروجی از آشکارساز برای فرکانس ۱۷ هرتز

اعمالی به بلندگو

با اعمال روش شمارش عبور از صفرها به همان ترتیبی که در بخش شبیه سازی عنوان شد سرعت ارتعاش لحظه ای بلندگو به صورت شکل ۶ به دست می آید. با توجه به این شکل می توان نوفه هایی را در سیگنال مشاهده نمود که منشا آنها می تواند هر کدام از نوفه های اسپیکل^{۱۸}، شات^{۱۹}، و حرارتی باشد که به ترتیب توسط جسم متحرک، لیزر و قطعات الکترونیکی به سیگنال وارد می شوند.



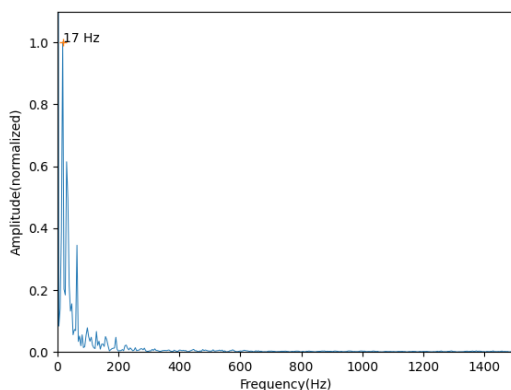
شکل ۶. سرعت ارتعاش بلندگو بر حسب زمان قبل از اعمال

میانگین متحرک

در اینجا با صرف نظر از نوع و منشا نوفه، روش میانگین متحرک به سیگنال سرعت اولیه اعمال می شود که نتیجه

همچنین، در این چیدمان از یک قطبیده قابل چرخش بین لیزر و باریکه شکن استفاده شده که علاوه بر اینکه نور غیرقطبیده لیزر را قطبیده می کند با چرخش قطبش آن می تواند میزان توان پرتو را در دو بازو تنظیم کند. به علاوه، از یک تیغه ربع موج بین باریکه شکن و آینه استفاده شده که باعث چرخش نور بازتابی از آینه به اندازه ۹۰ درجه می شود و در نتیجه از بازتاب آن به داخل محیط کاواک^{۱۶} و ناپایدار کردن لیزر جلوگیری می کند. همچنین، از یک تیغه ربع موج در بازوی اندازه گیری نیز استفاده شده که با عملکردی مشابه علاوه بر اینکه باعث جلوگیری از برگشت نور به لیزر می شود، سبب رسیدن توان بیشتری از سیگنال بازتابی به آشکارساز می شود. از آنجایی که دو پرتو بر روی آشکارساز دارای قطبش تقریباً عمود بر هم هستند از یک قطبیده خطی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به دو پرتوی تداخلی استفاده می شود. سیگنال خروجی از آشکارساز پس از عبور از یک تقویت کننده و حذف کننده مؤلفه DC توسط یک کارت داده برداری FPGA با فرکانس داده برداری ۲MSa/s دریافت و به کامپیوتر منتقل می شود. یک پس بازتابنده^{۱۷}

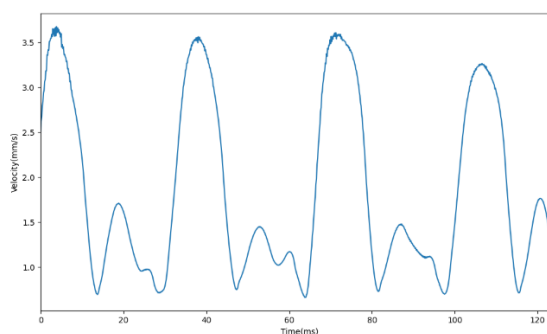
مشابهی حاصل گردید. در نهایت با اعمال تبدیل فوریه سریع (FFT)²⁰ روی سیگنال سرعت، نمودار شکل ۸ حاصل شد. در این نمودار می‌توان مشاهده نمود که اولین قله، همان فرکانس اعمالی به بلندگو یعنی ۱۷ Hz است. سایر قله‌ها در نمودار FFT ناشی از وجود هماهنگ‌های^{۲۱} این فرکانس در سیگنال ارتعاشی هستند.



شکل ۸. نمودار FFT سیگنال سرعت بلندگو

مقایسه شدند. نتایج نشان دادند که روش میانگین متحرک تا حد بسیار خوبی می‌تواند منجر به کاهش نوفه‌ها شود. در نهایت مشخص شد که می‌توان از روش شمارش عبور از صفر دیجیتال به‌عنوان یک روش بسیار کارآمد جهت استخراج سرعت در LDV استفاده نمود و روش میانگین متحرک نیز می‌تواند به‌عنوان یک مکمل بسیار مناسب برای این روش در نظر گرفته شود. قابل ذکر است که بخش قابل‌ملاحظه‌ای از پردازش‌ها به‌صورت دیجیتال صورت گرفت که از مزیت‌های آن نسبت به سایر روش‌هایی که استخراج سرعت به‌صورت آنالوگ انجام می‌شود می‌توان به عدم حضور نوفه‌های ناشی از قطعات الکترونیکی متعدد که در این روش‌ها استفاده می‌شود اشاره نمود.

آن را می‌توان در شکل ۷ مشاهده نمود. از مقایسه دو نمودار اخیر می‌توان تأثیر روش میانگین متحرک را در کاهش نوفه‌ها به خوبی مشاهده نمود. همان‌طور که در این شکل به خوبی مشخص است از میزان نوفه‌ها به شدت کاسته شده و سرعتی از مرتبه چند میلی‌متر بر ثانیه برای جسم متحرک اندازه‌گیری می‌شود. شایان ذکر است این روش از اندازه‌گیری برای سایر فرکانس‌ها و سرعت‌ها نیز تکرار شد و نتایج



شکل ۷. سرعت ارتعاش بلندگو بر حسب زمان پس از اعمال روش میانگین متحرک ۱۰ جمله‌ای

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، در ابتدا سیگنال تداخلی خروجی از آشکارساز در دستگاه LDV با چیدمان هموداین شبیه‌سازی و با استفاده از روش شمارش عبور از صفرها، سرعت ارتعاش محاسبه شد. سپس، به‌صورت تجربی چیدمان LDV هموداین مایکلسون تک فوتودیودی به کمک پردازش‌های آنالوگ و همچنین محاسبات دیجیتال از قبیل شمارش عبور از صفرها و میانگین‌گیری متحرک جهت اندازه‌گیری سرعت ارتعاش یک بلندگو به کار گرفته شد. به‌منظور تست عملکرد چیدمان یک فرکانس ۱۷ هرتز به بلندگو اعمال شد و نمودار سرعت ارتعاش بلندگو که از مرتبه چند میلی‌متر بر ثانیه بود قبل و بعد از اعمال میانگین متحرک رسم گردید و با هم

۶. مأخذ

- [1] Li, Rui-Jun, Ying-Jun Lei, Zhen-Xin Chang, Lian-Sheng Zhang, and Kuang-Chao Fan, "Development of a high-sensitivity optical accelerometer for low-frequency vibration measurement", *Sensors*, 2018, Vol.18, no.9, p.2910.
- [2] Yeh, Y., and H. Z. Cummins, "Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer", *Applied Physics Letters*, 1964, Vol.4, no.10, pp.176-178.
- [3] *The Harwell laser interferometer*, UKAEA Atomic Energy Research Establishment, 1982.
- [4] Kilpatrick, James M., and Vladimir Markov, "Matrix laser vibrometer for transient modal imaging and rapid nondestructive testing" In *Eighth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications 2008*, Vol.7098, pp.103-114. SPIE, 2008.
- [5] Bissinger, George, and David Oliver, "3-D laser vibrometry on legendary old Italian violins", *Sound and Vibration*, 2007, Vol.41, no.7, pp.10-15.
- [6] Moir, Christopher I., "Miniature laser doppler velocimetry systems", In *Optical Sensors 2009*, vol.7356, pp.122-133. SPIE, 2009.
- [7] Huber, Alexander M., Christoph Schwab, Thomas Linder, Sandro J. Stoeckli, Mattia Ferrazzini, Norbert Dillier, and Ugo Fisch, "Evaluation of eardrum laser Doppler interferometry as a diagnostic tool", *The Laryngoscope*, 2001, Vol.111, no.3, pp.501-507.
- [8] Sutton, C. M., "Accelerometer calibration by dynamic position measurement using heterodyne laser interferometry", *Metrologia*, 1990, Vol.27, no.3, p.133.
- [9] Xiang, Ning, and James M. Sabatier, "Land mine detection measurements using acoustic-to-seismic coupling", In *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets V*, 2000, Vol.4038, pp.645-655. SPIE, 2000.
- [10] Lal, Amit, Slava Aranchuk, Valentina Doushkina, Ernesto Hurtado, Cecil Hess, Jim Kilpatrick, Drew L'Esperance et al. "Advanced LDV instruments for buried landmine detection", In *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets XI*, Vol.6217, pp.358-365. SPIE, 2006.
- [11] Li, Rui, Tao Wang, Zhigang Zhu, and Wen Xiao, "Vibration characteristics of various surfaces using an LDV for long-range voice acquisition", *IEEE Sensors Journal*, 2010, Vol.11, no.6, pp.1415-1422.
- [12] Tomasini, Enrico Primo, and Paolo Castellini, *Laser Doppler Vibrometry*, Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- [13] Rembe, Christian, Georg Siegmund, Heinrich Steger, and Michael Wörtge, "Measuring MEMS in motion by laser Doppler vibrometry", In *Optical Inspection of Microsystems, Second Edition*, 2019, pp.297-347. CRC Press.

پی نوشت

-
1. Laser Doppler Vibrometer (LDV)
 2. Single detector Michelson Homodyne
 3. Coherence
 4. Michelson Interferometer
 5. Homodyne
 6. Mach-Zehnder Interferometer
 7. Polarizing beam splitter
 8. Quarter wave plate
 9. Optical beat
 10. Acousto-Optic Modulator (AOM)
 11. Bragg cell
 12. Phase lock loop
 13. Fringe counter

-
14. Arctan
 15. Zero-crossing
 16. Cavity space
 17. Retro-reflector
 18. Speckle noise
 19. Shot noise
 20. Fast Fourier Transform (FFT)
 21. Harmonic