

اندازه‌گیری سرعت ارتعاش لحظه‌ای بلندگو با کنترل عملکرد درست آن با

استفاده از ارتعاش سنج لیزری مبتنی بر اثر داپلر

فرشید صیدی پور

فاطمه رضائی*

کارشناسی ارشد

استادیار

گروه اتمی و مولکولی و نجوم، دانشکده فیزیک

گروه اتمی و مولکولی و نجوم، دانشکده فیزیک،

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

fsp1375@gmail.com

fatemehrezaei@kntu.ac.ir

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

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

از دیرباز جهت به دست 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 به دست می‌آوردند. از آنجاکه روش‌های مذکور دارای معایبی نظیر عدم کارکرد مناسب در شرایط آب و هوایی نامساعد، نیاز به محیط مادی

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 به‌کار بردن این روش، می‌توان 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 به‌کار 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 مایکلسون^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.

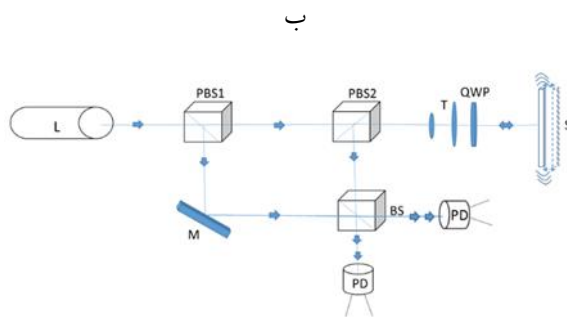
۲. تئوری تحقیق

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. تداخل‌سنج‌ها از برهم‌نهی دو موج مرجع و بازتابی یک سیگنال‌زنش تولید می‌کنند که شامل اطلاعات مربوط به

L لیزر، P قطبنده، QWP تیغه ربع موج^۱، 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 قطبنده و دو تیغه ربع موج 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، به‌منظور ایجاد زنش اپتیکی^۹ از یک قطبنده 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 قطبنده 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.

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 به‌منظور حذف مؤلفه‌های DC طبق معادله ۳ استفاده کرد. از مزایای این امر می‌توان در تداخل سنج مایکلسون نیز بهره

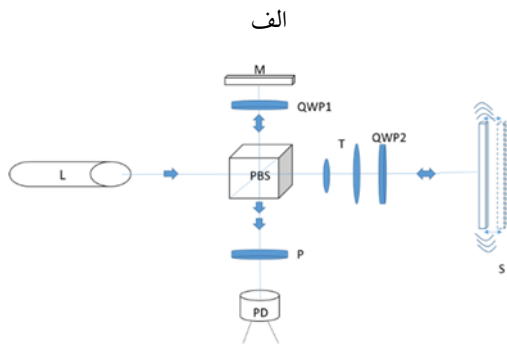
تغییرات فرکانس و فاز امواج اولیه است. پرتو مرجع و بازتابی از جسم به ترتیب با میدان‌های E_1 و E_2 نمایش داده می‌شوند:

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

در این معادلات، E_{01} و E_{02} به ترتیب دامنه‌های مربوط به 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:

$$\begin{aligned} I &= |E_1 + E_2|^2 \\ &= I_1 + I_2 \\ &\quad + E_{01}E_{02} \cos(2\pi(f_1 - f_2)t + \phi_1 - \phi_2) \end{aligned} \quad (3)$$

شکل ۱-الف و شکل ۱-ب به ترتیب شماتیک دو تداخل سنج مایکلسون و ماخ-زندر^۶ را نمایش می‌دهند. در این شکل‌ها، M آینه، BS یک باریکه‌شکن، PBS باریکه‌شکن قطبنده^۷،



در این چیدمان، قطبش نور بازتابی توسط تیغه ربع موج 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 متعامد هستند. بنابراین، از یک باریکه‌شکن غیرقطبنده BS جهت هم‌راستا کردن پرتوها به سمت آشکارساز استفاده می‌شود. قابل ذکر است که اگر از

جست. با استفاده از این دو آشکارساز و یک تیغه ربع موج در جلوی یکی از آشکارسازها به نحوی که باعث یک اختلاف فاز ۹۰ درجه بین سیگنال ورودی به آشکارسازها شود را می توان به منظور تعیین جهت ارتعاش استفاده کرد. به چنین چیدمان هایی که در شکل ۱ نیز نمایش داده شده است چیدمان هموداین گفته می شود. اگر از معادله ۳ برای این چیدمان ها استفاده شود، آنگاه معادله زیر به دست می آید:

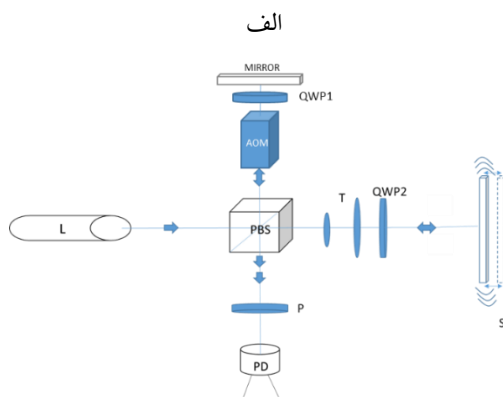
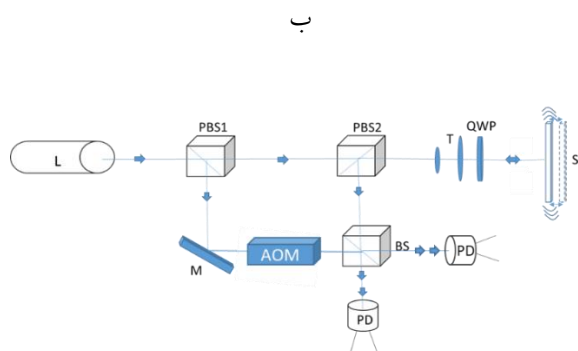
$$f_1 = f_2 = f_0 \quad (4)$$

معمولاً برای تشخیص جهت حرکت و ارتعاش از چیدمان های هترودااین که در آنها یک مدولاتور صوتی-

نوری^{۱۰} مانند سلول براگ^{۱۱} در یکی از بازوهای تداخلی قرار می گیرد، استفاده می شود. نمونه هایی از این چیدمان ها برای دو تداخل سنج مایکلسون و ماخ-زندر در شکل ۲ قابل مشاهده است. اگر از معادله ۳ برای چیدمان های هترودااین در شکل ۲ استفاده شود آنگاه روابط فرکانسی به صورت زیر نوشته می شود:

$$f_1 = f_0, \quad f_2 = f_0 + f_b \quad (5)$$

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 هترودااین تداخل های الف) مایکلسون و ب) ماخ-زندر

دیجیتال می توان به روش تانژانت معکوس^{۱۴} و روش شمارش فریز اشاره کرد. روش تانژانت معکوس در چیدمان های هموداین دوفوتودیودی و چیدمان های هترودااین قابل استفاده است، اما روش شمارش فریز را می توان برای چیدمان های هموداین تک فوتودیودی نیز استفاده نمود. در این روش از شمارش عبور از صفر^{۱۵} سیگنال خام برای به دست آوردن سرعت یا جابه جایی استفاده می شود.

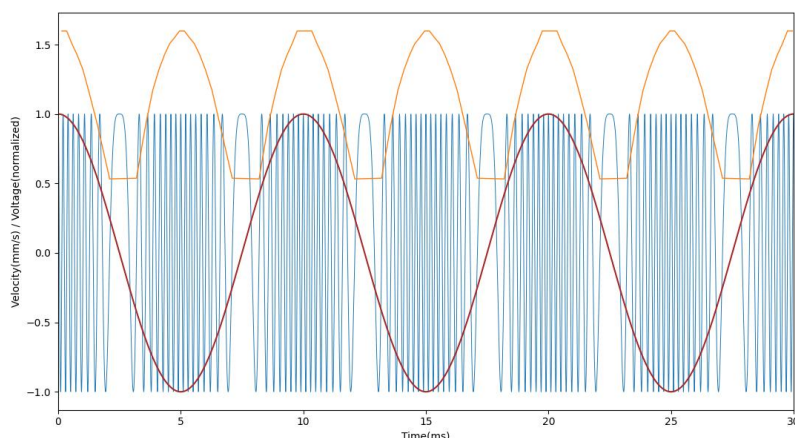
در این پژوهش به دلیل سادگی چیدمان و همچنین عدم اندازه گیری جهت ارتعاش، از چیدمان هموداین تک فوتودیودی استفاده شده است.

از مشاهده سیگنال خام خروجی بر روی آشکارساز نمی توان به سادگی اطلاعات دقیقی درباره سرعت به دست آورد. به طور کلی، روش های مختلفی به منظور استخراج سرعت وجود دارد که به دو دسته آنالوگ و دیجیتال تقسیم می شوند. در روش های آنالوگ از سخت افزارهای الکترونیکی مانند مبدل های فرکانس به ولتاژ، حلقه های قفل فاز^{۱۲} و فریز شمارها^{۱۳} استفاده می شود و در روش های دیجیتال ابتدا سیگنال توسط یک مبدل آنالوگ به دیجیتال به داده های دیجیتال تبدیل می شود. سپس، این داده ها به کامپیوتر یا برد پردازنده منتقل می شوند و از الگوریتم هایی برای استخراج سرعت استفاده می شود. از روش های استخراج سرعت

۳. شبیه سازی

سیگنال تحریک کننده اعمالی (توسط سیگنال ژنراتور) را نمایش می دهد. لازم به ذکر است که در این شبیه سازی، تحریک سینوسی دارای فرکانس ۱۰۰ هرتز و دامنه ۴λ است.

در شکل ۳ یک شبیه سازی از سیگنال خروجی از آشکارساز (با رنگ آبی) نمایش داده شده است. نمودار یا قرمز رنگ



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

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

۴. چیدمان آزمایش

در این مقاله از چیدمان هموداین مایکلسون تک فوتودیودی به عنوان LDV برای اندازه گیری سرعت ارتعاش یک بلندگو استفاده شده است. در شکل ۴ چیدمان LDV استفاده شده در این مقاله نشان داده می شود. در این آزمایش از یک لیزر هلیوم-نئون غیرقطبیده با طول موج ۶۳۳ نانومتر استفاده شده است که نور آن توسط یک باریکه شکن قطبیده به دو پرتو مرجع و اندازه گیری تقسیم می شود که پرتو اندازه گیری به سمت جسم تائیده 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.

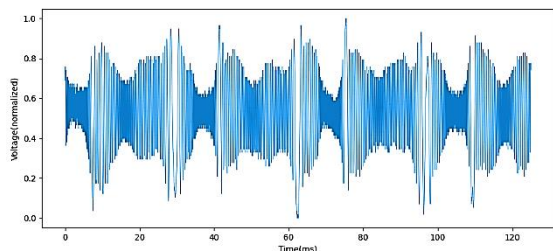
از روش شمارش عبور از صفرها برای محاسبه سرعت لحظه ای استفاده می شود. برای این منظور این مراحل طی می شود: ابتدا عبور از صفرها یا همان محل های تقاطع سیگنال با محور x شناسایی می شوند. اگر فاصله زمانی بین دو عبور از صفر متوالی که معادل با نصف یک طول موج است برابر t در نظر گرفته شود فرکانس لحظه ای به صورت $f = \frac{1}{2t}$ است. با جای گذاری f در معادله ۱ می توان 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 می شود:

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

در این آرایه t_k ها زمان هایی 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 بازه زمانی بین دو عبور از صفر متوالی از رابطه ۷ به دست می آید:

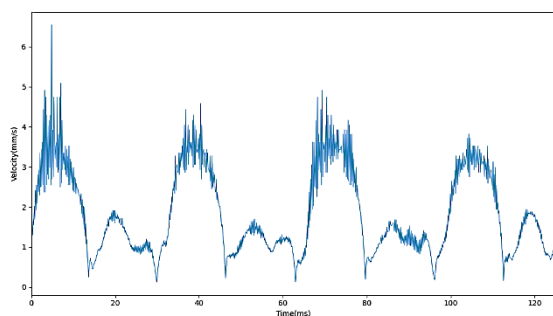
$$V_k = \frac{\lambda}{4(t_{k+1} - t_k)} \quad (7)$$

در شکل ۵ سیگنال دریافتی توسط کامپیوتر نمایش داده می‌شود.



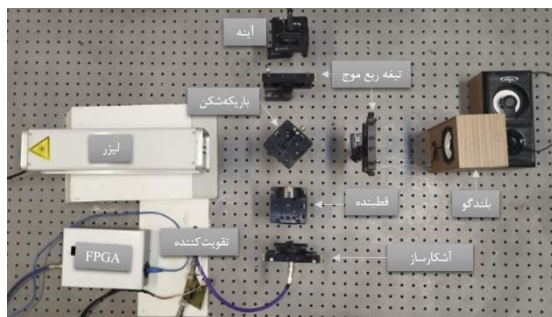
شکل ۵. سیگنال خروجی از آشکارساز برای فرکانس ۱۷ هرتز اعمالی به بلندگو

با اعمال روش شمارش عبور از صفرها به همان ترتیبی که در بخش شبیه‌سازی عنوان شد سرعت ارتعاش لحظه‌ای بلندگو به صورت شکل ۶ به دست می‌آید. با توجه به این شکل می‌توان نوفه‌هایی را در سیگنال مشاهده نمود که منشا آنها می‌تواند هر کدام از نوفه‌های اسپکل^{۱۸}، شات^{۱۹}، و حرارتی باشد که به ترتیب توسط جسم متحرک، لیزر و قطعات الکترونیکی به سیگنال وارد می‌شوند.



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

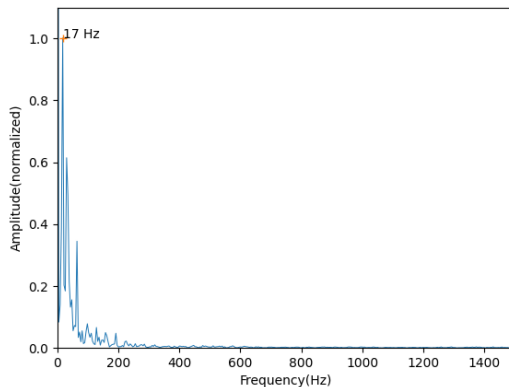
در اینجا با صرف نظر از نوع و منشا نوفه، روش میانگین متحرک به سیگنال سرعت اولیه اعمال می‌شود که نتیجه آن را می‌توان در شکل ۷ مشاهده نمود. از مقایسه دو نمودار اخیر می‌توان تأثیر روش میانگین متحرک را در کاهش نوفه‌ها به خوبی مشاهده نمود. همان‌طور که در این شکل به خوبی مشخص است از میزان نوفه‌ها به شدت کاسته شده و سرعتی از مرتبه چند میلی‌متر بر ثانیه برای جسم متحرک



شکل ۴. چیدمان آزمایشگاهی به منظور اندازه‌گیری سرعت حرکت جسم مرتعش

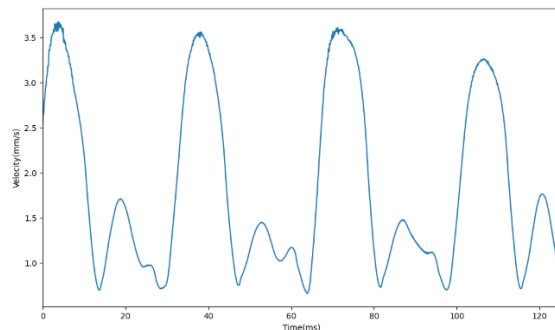
همچنین، در این چیدمان از یک قطبنده قابل چرخش بین لیزر و باریکه‌شکن استفاده شده که علاوه بر اینکه نور غیرقطبیده لیزر را قطبیده می‌کند با چرخش قطبش آن می‌تواند میزان توان پرتو را در دو بازو تنظیم کند. به علاوه، از یک تیغه ربع موج بین باریکه‌شکن و آینه استفاده شده که باعث چرخش نور بازتابی از آینه به اندازه ۹۰ درجه می‌شود و در نتیجه از بازتاب آن به داخل محیط کاواک^{۱۶} و ناپدید کردن لیزر جلوگیری می‌کند. همچنین، از یک تیغه ربع موج در بازوی اندازه‌گیری نیز استفاده شده که با عملکردی مشابه علاوه بر اینکه باعث جلوگیری از برگشت نور به لیزر می‌شود، سبب رسیدن توان بیشتری از سیگنال بازتابی به آشکارساز می‌شود. از آنجایی که دو پرتو بر روی آشکارساز دارای قطبش تقریباً عمود بر هم هستند از یک قطبنده خطی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به دو پرتوی تداخلی استفاده می‌شود. سیگنال خروجی از آشکارساز پس از عبور از یک تقویت‌کننده و حذف‌کننده مؤلفه DC توسط یک کارت داده‌برداری FPGA با فرکانس داده‌برداری ۲MSa/s دریافت و به کامپیوتر منتقل می‌شود. یک پس‌بازتابنده^{۱۷} روی نقطه مورد اندازه‌گیری از بلندگو چسبانده می‌شود 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 می‌شود و فرایند اندازه‌گیری ارتعاش صورت می‌پذیرد.

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

اندازه‌گیری می‌شود. شایان ذکر است این روش از اندازه‌گیری برای سایر فرکانس‌ها و سرعت‌ها نیز تکرار شد و نتایج مشابهی حاصل گردید. در نهایت با اعمال تبدیل فوریه سریع (FFT)^{۲۰} روی سیگنال سرعت، نمودار شکل ۸ حاصل شد.



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

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.

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 به‌کار 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