بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

# ساخت و شبیه سازی دستگاه ارتعاش‌سنج و سرعت‌سنج لیزری مبتنی بر اثر دوپلر

**ونداد صانعی‌نژاد[۱]، فاطمه رضائی[۱]، امیرحسین براتی سده[۲]، پویا گورانی[۲]**

۱. تهران، شریعتی، دانشکده فیزیک، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی.

۲. تهران، اوین، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی.

**چکیده –در این مقاله، ساخت و شبیه سازی دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری مبتنی بر اثر دوپلر مورد مطالعه قرار گرفته است. از چیدمان تداخلی مایکلسون جهت تجزیه باریکه‌ی لیزر به دو بازوی مرجع و اندازه‌گیری بهره‌گیری شده است. چیدمان مورد استفاده در این آزمایش از نوع همودایِن می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان دهنده همخوانی قابل قبولی بین نتایج حاصل از اندازه گیری‌های دستگاه با فرکانس مشخص داده شده به دستگاه می‌باشد که این موضوع نشان دهنده دقت بالای دستگاه در اندازه گیری‌هاست. همچنین، با پردازش مناسب سیگنال‌ها و حذف کلیه نوفه های اپتیکی، الکتریکی و محیطی می‌توان فرکانس جسم مرتعش را با تمایز سیگنال از نوفه استخراج نمود.**

کلید واژه- ارتعاش‌سنج، لیزر، دوپلر، هدف متحرک، نوفه.

# Construction of laser Doppler vibrometer and velocimeter device

Vandad Saneinejad 1, Fatemeh Rezaei 1, Am**irho**ssein Barati Sedeh 2, Pouya gourani 2

**1. Tehran, Shariati, Physics Faculty, Khajeh Nasir Toosi University of Technology.**

**2. Tehran, Evin, Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University.**

Abstract- In this paper, construction of laser Doppler vibrometer device is studied. Michelson interferometer has been used to divide the laser beam into two reference and measurement arms. The used set-up in this experiment is from kind of hemodyne group. The results indicate an acceptable consistency between the results of the measurement of device with identified frequency given to device which shows the high accuracy of the device in the measurements. Furthermore, by suitable signal processing and omitting all of optical, electrical and background noises, the frequency of vibrating object can be extracted with discrimination of the signal from noise.

Keywords: vibrometer, laser, Doppler, moving target, noise.



این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

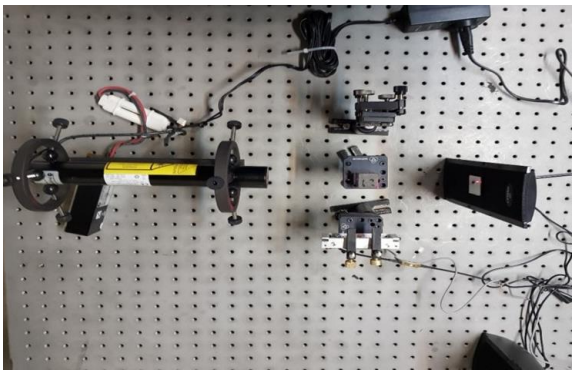
[ Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13 ]

## مقدمه

امروزه دستگاه ارتعاش‌سنج و سرعت‌سنج لیزری مبتنی بر اثر دوپلر (LDV) کاربردهای متعددی در اندازه‌گیری سرعت شاره‌ها و اجزای تشکیل دهنده آنها [۱]، تخمین سرعت اجسام متحرک از قبیل سرعت حرکت موجودات زنده، خودرو و هواپیما [۲] و همچنین تخمین سرعت اجسام چرخان مانند پره‌های هواپیما، هلیکوپتر [۳]، اندازه-گیری ضربان قلب و ارتعاشات پرده گوش [۴] و همچنین بررسی رسیدگی در میوجات و سبزیجات [5] را دارا می باشد. بعلاوه، اندازه‌گیری‌های زیستی از قبیل برآورد ضربان قلب، آهنگ تنفس، میزان قند و فشار خون و... با این دستگاه می‌تواند صورت پذیرد. گروه‌های متعددی به اندازه-گیری سرعت اجسام متحرک و چرخان با استفاده از دستگاه LDV پرداختند. به‌عنوان مثال، کینان و همکارانش [۶] سرعت حرکت ذرات در شاره‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که اندازه و قطر ذرات در نتیجه بدست آمده بی‌تاثیر می‌باشد، درحالی‌که افزایش سرعت شاره منجر به افزایش فرکانس اندازه‌گیری شده می‌شود. در این تحقیق ساخت دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری مبتنی بر اثر دوپلر که با استفاده از چیدمان تداخلی مایکلسون، مورد مطالعه قرار گرفته است.

## چیدمان آزمایشگاهی

برای ساخت این دستگاه، از چیدمان همودایِن تداخل‌سنج مایکلسون جهت براورد ارتعاش و سرعت هدف مورد نظر استفاده شده است. طرح‌واره‌ای از این چیدمان در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود پرتوی لیزر ابتدا به یک جدا کننده پرتو برخورد می‌کند و سپس، به دو پرتوی مرجع و اندازه‌گیری تجزیه می‌گردد. پرتوی مرجع دارای فرکانس نور لیزر می‌باشد. در بازوی مرجع نور به آینه برخورد می‌کند و پس از بازتاب با همان فرکانس لیزر به سمت آشکارساز می‌رود. در بازوی اندازه‌گیری نور به جسم مرتعش برخورد می‌کند و دچار شیفت فرکانسی دوپلر می‌شود. این دو پرتوی مرجع و اندازه‌گیری در فوتودیودها تداخل کرده و از آنجا که سیگنال تداخلی با تفاضل فرکانسی دو بازو متناسب است، می‌توان از تبدیل فوریه نور تداخلی، فرکانس جسم مرتعش را مشاهده کرد. لازم به ذکر است که از مدار تفاضلی quadrature جهت کاهش نوفه‌ها در بخش الکترونیک دستگاه استفاده شده است. این مدار، نوسانات تداخلی دو بازو را در فوتودیودها به ولتاژ تبدیل کرده و سپس، آن را به اسیلوسکوپ هدایت می‌کند. در اسیکوسکوپ، رفتار زمانی و فرکانسی جسم متحرک مشاهده می‌شود.



شکل ۱: نمایی از اجزای داخلی دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری مبتنی بر اثر دوپلر جهت اندازه‌گیری سرعت و ارتعاش جسم متحرک.

## پردازش سیگنال و حذف نوفه

در یک دستگاه LDV، رزولوشن جابجایی و سرعت، نشانگر مینیمم جابجایی و سرعت قابل اندازه‌گیری این سیستم می‌باشد. به‌طور کلی، معمولاً این رزولوشن به‌واسطه نوفه



این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13 ]

سیستم محدود می‌شود. در این مقاله، نوفه‌های اصلی که رزولوشون سیستم LDV را محدود می‌کنند، شامل موارد ذیل می‌باشد: الف) نوفه شات که توسط لیزر و مدارهای الکترونیکی ایجاد می‌شود. ب) نوفه گرمایی آشکارساز و پیش‌تقویت کننده که به نوفه جانسون موسوم می‌باشد. ج) نوفه فلیکر که ناشی از قطعات نیمه‌رسانای مدار الکتریکی می‌باشد. د) نوفه پردازش سیگنال که شامل نوفه‌های ایجاد شده به سبب پردازش سیگنال می‌باشد. ه) نوفه اسپکل که به ارتعاش سطح و یا چرخش هدف مربوط می‌شود. شدت سیگنال تداخلی دریافتی توسط آشکارساز از حاصل‌ضرب میدان‌های دو بازوی مرجع و اندازه‌گیری از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$I=\frac{1}{2}[I_{01}+I_{02}+2\sqrt{I_{01}I_{02}}\cos[(k_1-k_2).r-(\omega_1-\omega_2).t]].$$

(۱)

که در رابطه فوق $I_{01}$، $I_{02}$، $k_1$، $k_2$، $\omega_1$، $\omega_2$ به ترتیب نشان دهنده شدت سیگنال اول، شدت سیگنال دوم، عدد موج سیگنال اول، عدد موج سیگنال دوم، فرکانس سیگنال اول و فرکانس سیگنال دوم می‌باشند.

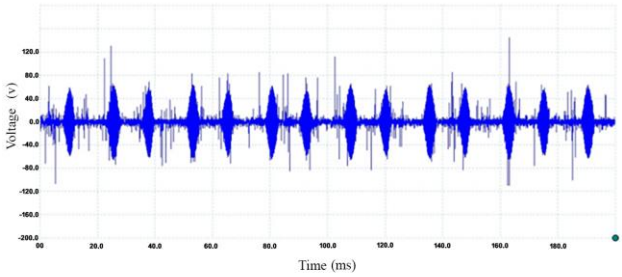
جابجایی فرکانسی دوپلر که ناشی از سرعت هدف متحرک است از رابطه زیر برحسب سرعت جسم مرتعش بدست می‌آید:

$$f_d=2f\frac{v}{c}=2\frac{v}{\lambda}. \qquad (۲)$$

در رابطه فوق، $c$ سرعت نور، $v$ سرعت جسم هدف و $\lambda$ طول‌موج نور می‌باشد.

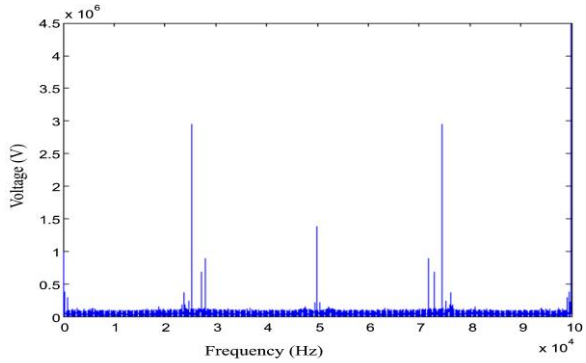
## نتایج و بحث

در این بخش تحلیل رفتار زمانی و فرکانسی سیگنال‌ها قبل و بعد از پردازش نوفه ارائه شده است. برای شروع آزمایشات از بلندگویی که به یک مولد تولید پالس با فرکانس مشخص متصل شده است، استفاده شده است. رفتار زمانی سیگنال تداخلی در شکل ۲ برای فرکانس ۳۰ هرتز نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود زنش‌های منظمی روئیت می‌گردد.




شکل ۲: فرکانس سیگنال تداخلی برای فرکانس ۳۰ هرتز.

سپس، فرکانس مولد روی ۳۸۰ هرتز تنظیم شده است. شکل ۳، تحولات فرکانسی سیگنال تداخلی را برای بلندگوی مرتعش که فرکانس ارتعاش آن با دستگاه LDV اندازه‌گیری شده است را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است این رفتار فرکانسی از تبدیل فوریه شکل‌های زمانی حاصل شده است.




شکل ۳: تحولات فرکانسی جسم مرتعش قبل از حذف نوفه ها.

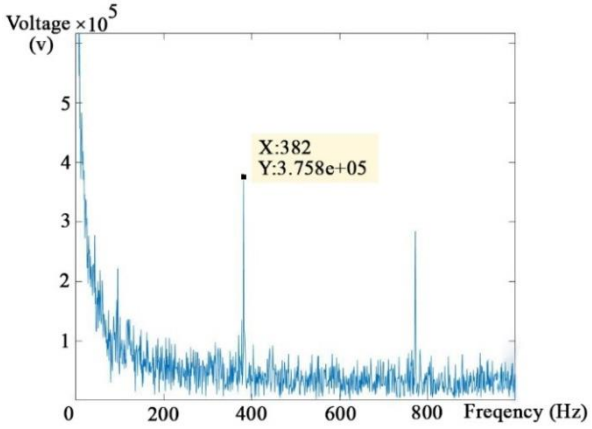
همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، نوفه‌های متعددی در شکل ملاحظه می‌شود که برخی در مضارب ۵۰ ظاهر می‌شوند که بر سیگنال برق شهر دلالت می‌کنند. همچنین، برخی از نوفه‌ها که به اتصالات الکترونیکی سیم‌ها و بخش‌های مداری مربوط می‌شوند، در این شکل به همراه هماهنگ‌های آن ظاهر شده‌اند. نور محیط، تابش زمینه شدیدی را دربر دارد که از سیگنال کل حذف خواهد شد. بعلاوه، سهم نوفه‌های اپتیکی شات مربوط به لیزر و قطعات



این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

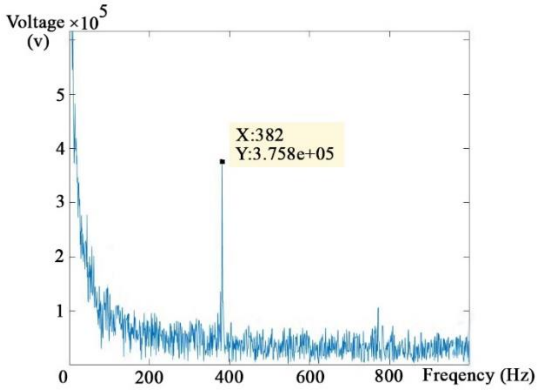
[ Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13 ]

اپتیکی در این شکل ظاهر شده است که محاسبه می‌شود و از سیگنال برایند حذف می‌گردد. با بزرگنمایی کردن بر نواحی فرکانسی پایین فرکانس ۳۸۰ هرتز به خوبی مشاهده می‌شود که در شکل ۴ نشان داده شده است.




شکل ۴: رفتار زمانی سیگنال مرتبط با جسم مرتعش در نواحی پایین فرکانسی.

برای حذف نوفه‌ها از روش آماری آنوا استفاده شده است که طرح‌واره‌ای از شکل پردازش شده در شکل ۵ ارائه شده است. شکل ۵ نمایی از سیگنال پردازش شده را طی حذف نوفه‌ها نشان می‌دهد.




شکل ۵: رفتار فرکانسی جسم مرتعش بعد از پردازش سیگنال و حذف نوفه‌ها برای فرکانس مولد ۳۸۰ هرتز.

با محاسبه فرکانس، از رابطه (۲) می‌توان سرعت حرکت جسم مرتعش را بدست آورد که برابر است با m/s

۱۰^-۴×۱,۲.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با بهره‌گیری از چیدمان همودایِن تداخل-سنج مایکلسون و درنظر گرفتن کلیه نوفه‌های موجود و پردازش مناسب سیگنال‌ها، دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری دوپلری ساخته شده است. همانطور که در نتایج بدست آمده مشخص است همخوانی بسیار مناسبی بین فرکانس ایجاد شده توسط مولد فرکانسی متصل به بلندگو و فرکانس اندازه گیری شده به کمک دستگاه ارتعاش‌سنج و سرعت‌سنج لیزری وجود دارد. لذا، می‌توان سرعت و ارتعاشات که اجسام جامد مرتعش و متحرک را به آسانی با این دستگاه اندازه-گیری نمود.

## مراجع

1. Sato, H. and M. Takagi, *Airflow Measurement Around Passenger Car Models Using a Two-Channel Laser Doppler Velocimeter*. 1993, SAE Technical Paper.
2. Mues, W., J. Hens, and L. Boiy, *Observation of a dynamic wetting process using Laser-Doppler velocimetry*. AIChE journal, 1989. **35**(9): p. 1521-1526.
3. Martin, P., G. Pugliese, and J. Leishman. *Laser Doppler velocimetry uncertainty analysis for rotor blade tip vortex measurements*. in *38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 2000.
4. G. Cosoli, L Casacanditella, EP. Tomasini, L. Scalise, *Evaluation of Heart Rate Variability by means of Laser Doppler Vibrometry measurements*, Journal of Physics: Conference Series, 2015, 658, p. 012002.
5. Muramatsu, N., et al., *Remote sensing of fruit textural changes with a laser Doppler vibrometer*. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2000. **125**(1): p. 120-127.
6. Keenan, L. and K.O. Chapin, *Laser Doppler Velocimetry*. Final Report, Physic 173: Biophysic Laboratory, 2009.



این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13 ]