

ارتعاش سنج لیزر داپلر

راضیه قبادی^{۱*}، بیژن غفاری^۱

^۱ دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

*rghobadi@physics.iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۶/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۸/۰۴

چکیده

ارتعاش سنج لیزر داپلر ابزاری برای اندازه‌گیری اپتیکی دامنه، فرکانس و سرعت اشیاء مرتعش بدون تماس می‌باشد. با توجه به کاربردهای متنوع و روزافزون ارتعاش سنج‌های لیزر داپلر در این مقاله طرحی ساده و کاربردی از این دستگاه با استفاده از تداخل سنج مایکلسون و نصب آینه بر روی شیء مرتعش ارائه شده است. فرکانس و دامنه ارتعاش، از جابه‌جایی داپلر فرکانس نور لیزر حاصل می‌شود. با استفاده از این چیدمان آزمایشگاهی، فرکانس، دامنه و سرعت بیشینه اجسام مرتعش توسط سیگنال دریافتی توسط اسپیلوسکوپ اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل با دستگاه شتاب‌سنج و طیف تبدیل فوریه حاصل از نوسانات اندازه‌گیری شده، که در تطابق خوبی با هم می‌باشند. با استفاده از این روش حداقل سرعت بیشینه و دامنه ارتعاشی قابل اندازه‌گیری به ترتیب $8 \times 10^{-4} (m/s)$ و $3 \mu m$ بوده است.

واژه‌های کلیدی: ارتعاش سنج لیزر داپلر، تداخل سنج مایکلسون، اندازه‌گیری فرکانس، اثر داپلر

۱. مقدمه

ارتعاش سنج لیزر داپلر^۱ وسیله‌ای است که از تکنیک اندازه‌گیری جابه‌جایی و سرعت براساس اثر داپلر استفاده می‌کند [۹-۱]. این پدیده در هر شکلی از انتشار موج که حرکت نسبی منبع و دریافت‌کننده سبب جابه‌جایی فرکانسی وابسته به سرعت نسبی شود، ظاهر خواهد شد. همچنین با اندازه‌گیری این تغییر فرکانس می‌توان سرعت شیء متحرک را به آسانی بدست آورد. نکته قابل توجه در ارتعاش سنج لیزر داپلر این است که، در این دستگاه حرکت نسبی بین منبع و دریافت‌کننده (ناظر) وجود ندارد و شیء متحرک بین دریافت‌کننده و منبع، سبب انعکاس نور می‌شود. از آنجایی که ارتعاش سنج لیزر داپلر بر اساس تکنیک اندازه‌گیری بدون تماس استوار است، قسمت‌های مورد آزمایش در طول اندازه‌گیری ثابت باقی می‌مانند. همچنین، از این تکنیک برای اندازه‌گیری در شرایطی که اجسام دمای بالا دارند یا بسیار کوچک هستند استفاده می‌شود.

پایه و اساس دستگاه ارتعاش سنج بر روش تداخل سنجی استوار است زیرا سرعت‌های موجود در مقایسه با سرعت نور خیلی کوچک هستند، امکان به‌کاربردن سرعت

اندازه‌گیری شده به طور مستقیم براساس اثر داپلر وجود ندارد و نیز این سرعت‌های کوچک، جابه‌جایی داپلر کوچکی را در مقایسه با فرکانس نور لیزر، $4.74 \times 10^{14} Hz$ ، ایجاد می‌کنند که به طور الکترونیکی قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. بنابراین برای ترکیب نور پراکنده شده با پرتو مرجع، که هر دو از یک منبع همدوس انتشار می‌یابند، از یک تداخل سنج اپتیکی مانند تداخل سنج مایکلسون استفاده می‌شود. به دلیل کاربردهای فراوان و هزینه بالای وارد نمودن LDV لزوم طراحی و ساخت این دستگاه در داخل کشور احساس می‌شود به همین دلیل در این مقاله طرحی از چیدمان ارتعاش سنج لیزر داپلر براساس تداخل سنج مایکلسون ارائه و بررسی می‌شود.

۲. تئوری

تداخل سنج مایکلسون نور انتشار یافته از منبع لیزر توسط جداساز پرتو را به دو پرتو مرجع و اندازه‌گیری با دامنه یکسان تقسیم می‌کند [۹-۱]. پرتو مرجع به طرف شیء ثابت، پرتو اندازه‌گیری به سمت شیء متحرک هدایت می‌شود. پرتوهای بازتابی پس از عبور مجدد از

که در آن:

$$d' = 2d = m \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

در رابطه فوق، d دامنه نوسان شیء مرتعش در حالت رفت (برگشت)، m تعداد کل نوارهای تاریک (روشن) در مسیر رفت یا برگشت می‌باشد و d' دامنه نوسان شیء مرتعش در حالت رفت و برگشت می‌باشد. همچنین ترم تصحیح داپلری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A = (m - n) \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

که n تعداد نوارهای تاریک (یا روشن) مربوط به پدیده داپلر است.

روش دوم برای محاسبه فرکانس استفاده از تبدیل فوریه می‌باشد که به کمک این روش می‌توان داده‌های موجود در فضای زمان را به فضای فرکانس و برعکس تبدیل نمود [۱۰، ۱۱]:

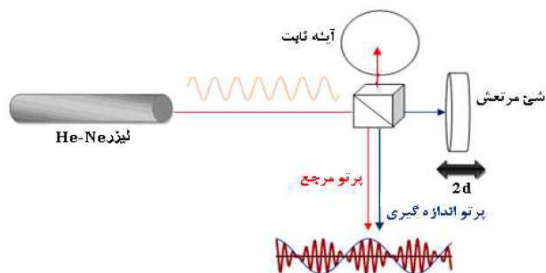
$$F(i\omega_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-i\omega_0 t) dt \quad (5)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(i\omega_0) \exp(i\omega_0 t) d\omega_0$$

که در رابطه فوق، $f(t)$ مؤلفه سیگنال در حوزه زمان و $F(\omega)$ مؤلفه سیگنال در حوزه فرکانس هستند. همچنین تبدیل فوریه سریع (FFT) ^۳ برای سیگنال‌های با طول نامحدود و تبدیل فوریه گسسته (DFT) ^۴ برای سیگنال‌های دارای طول محدود استفاده می‌شود. از طرفی از پنجره همینگ ^۵ و هنینگ ^۶ برای اجتناب از به‌وجود آمدن نشت در سیستم بهره می‌گیریم.

۳. شرح کار

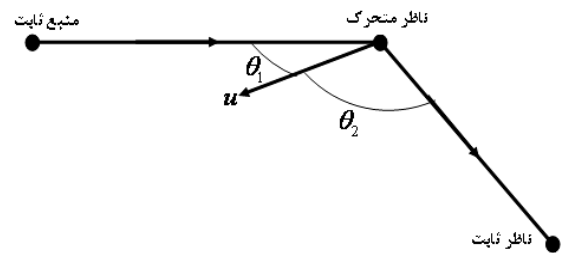
با استفاده از مطالب ذکر شده در بخش قبل چیدمان آزمایشگاهی انجام شده در شکل (۲) آمده است.



شکل ۲. چیدمان آزمایشگاهی ارتعاش سنج لیزر داپلر

میان جداسازپرتو به سمت آشکارساز هدایت شده و در آنجا با یکدیگر تداخل می‌نمایند. سیگنال حاصل از این تداخل را بر روی اسیلوسکوپ می‌توان مشاهده نمود. همان طور که گفته شد زمانی که منبع و دریافت‌کننده موج اپتیکی حرکت می‌کنند، جابجایی داپلر به وجود می‌آید و یکی از اثرات این جابجایی تغییر در فرکانس ظاهری موجی که توسط دریافت‌کننده دیده می‌شود، خواهد بود.

در ارتعاش سنج لیزر داپلر از ترکیب دو حالت داپلر که در حالت اول منبع ثابت و ناظر متحرک و حالت دوم هنگامی است که منبع متحرک و ناظر ثابت است، استفاده می‌شود. در واقع در این حالت قسمت متحرک یک شیء واسط است و نور انتشار یافته از یک منبع ثابت را دریافت نموده و سپس آن را با تغییر فرکانس به یک ناظر ثابت منتقل می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱. اثر داپلر در ارتعاش سنج لیزر داپلر [۱].

در این حالت جابجایی داپلر پراکننده به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Delta f = \frac{u \cos \theta}{\lambda} \quad (1)$$

در رابطه فوق، λ طول موج نور لیزر، θ زاویه بین جهت حرکت شیء مرتعش و پرتو لیزر، u سرعت شیء مرتعش و Δf همان فرکانس تپش (فرکانس داپلر) [۹-۱۱] می‌باشد.

از دیگر اثرات جابجایی داپلر اوج‌هایی ^۲ است که علاوه بر اوج‌های مربوط به جابجایی آینه، در سیگنال مشاهده شده در اسیلوسکوپ وجود دارد که به آنها اوج‌های داپلری می‌گویند. برای محاسبه صحیح دامنه نوسان شیء مرتعش (D) باید تصحیح داپلری (A)، که حذف این اوج‌های اضافی است، اعمال شود:

$$D = 2d' \pm A \quad (2)$$

جابه‌جایی فرکانسی نیز کمینه می‌شود که نتیجه آن پهن‌شدگی مذکور در حوزه زمان است. می‌توان با محاسبه اوج‌های موجود در شکل (۳) و اعمال تصحیح داپلری دامنه ارتعاش شیء مرتعش را نیز توسط رابطه (۲) به دست آورد.

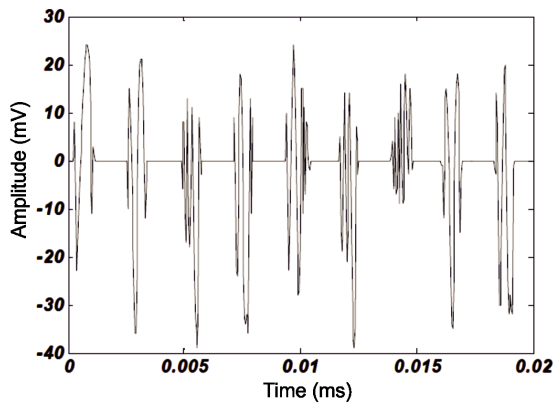
جدول ۱. مقادیر فرکانس، دامنه و سرعت متوسط به دست آمده برای سشوار برقی

T	f	$2d' \pm A$	\bar{v}	m	$f - f'$
$4.4 \times 10^{-3} (s)$	$227.27 (Hz)$	$4.4 \times 10^{-6} (m) \pm 0.63 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-3} (m/s)$	7	1.6%

جدول ۲. مقادیر فرکانس، دامنه و سرعت متوسط به دست آمده برای تلفن همراه

T	f	$2d' \pm A$	\bar{v}	m	$f - f'$
$5.4 \times 10^{-3} (s)$	$185.18 (Hz)$	$8.8 \times 10^{-6} (m) \pm 1.2 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-3} (m/s)$	14	6.42%

فرکانس‌های اندازه‌گیری شده با فرکانس به دست آمده از دستگاه شتاب‌سنج (f') در تطابق خوبی است. برای سشوار برقی $f' = 223.5 Hz$ و برای تلفن همراه $f' = 174 Hz$ می‌باشد.

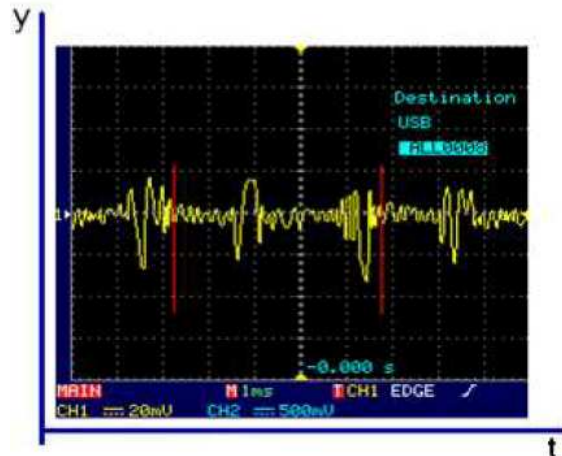


شکل ۴. منحنی دامنه برحسب زمان به دست آمده برای سشوار برقی در حالتی که جابه‌جایی‌های آینه در آن صفر شده است.

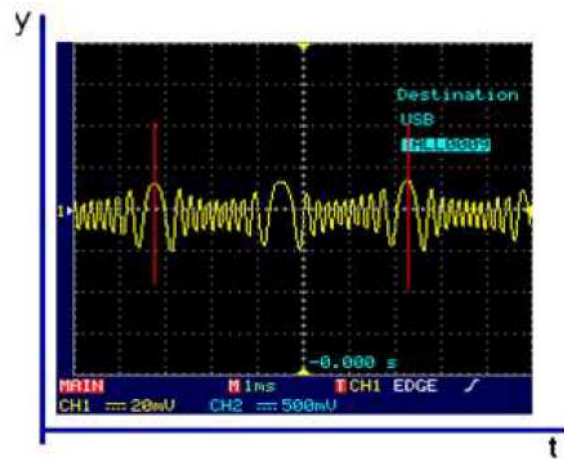
۳.۲. روش دوم

پس از حذف جابه‌جایی مربوط به چگالی طیفی توان متقابل^۷ داده‌های حاصل از اسیلوسکوپ را بدست آورده که همزمان تبدیل فوریه سریع و پنجره همینگ (یا هنینگ) را بر روی داده‌ها اعمال می‌کند. پایین‌ترین هارمونیک (فرکانس اصلی) در شکل (۵) مشخص شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود یکی از آینه‌های تداخل‌سنج مایکلسون را بر روی شیء مرتعش قرار می‌دهیم. طرح تداخلی مشاهده شده در اسیلوسکوپ برای دو شیء مرتعش سشوار برقی و تلفن همراه در ادامه آمده است.



(الف)



(ب)

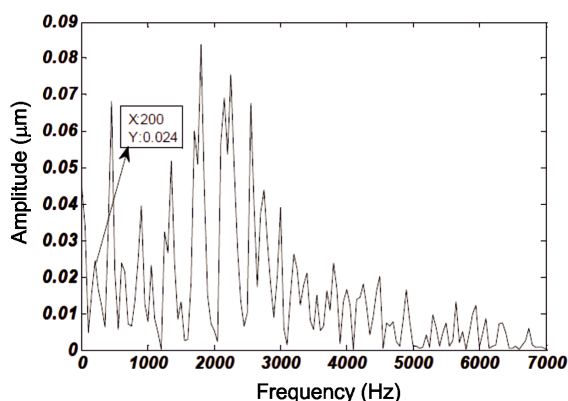
شکل ۳. نمایش ارتعاش (الف) سشوار برقی، (ب) تلفن همراه در خروجی تداخل‌سنج

۳.۱. روش اول

فاصله مشخص شده در شکل‌های فوق دوره تناوب ارتعاش اشیای مرتعش را نشان می‌دهد و از رابطه $f = 1/T$ فرکانس شیء مرتعش به دست می‌آید. نکته قابل توجه، پهن‌شدگی به وجود آمده می‌باشد که وقتی شیء به بیشینه مقدار جابه‌جایی خود رسیده و سرعت آن کمینه می‌شود اتفاق می‌افتد. در این حالت بر اساس پدیده داپلر

مراجع

- [1] M. Martarelli, *Exploiting the Laser Scanning Facility for Vibration Measurements*, Doctoral Dissertation, Imperial college of Science, Technology & Medicine, Univ. London, 2001.
- [2] O. Marchenko, S. Kazantsev and L. Windholz, *Demonstrational optics*, Springer, 2006.
- [3] J. Wilson, J.F.B. Hawkes, *Laser Principles and Applications*, Prentice Hall, 1987.
- [4] C. Neipp, A. Hernandez, J.J. Rodes, A. Marquez, T. Belendez and A. Belendez, An Analysis of the Classical Doppler Effect, *European Journal Of Physics*, IOP Publishing Ltd 497-505, 2003.
- [5] R. Prislán, *Laser Doppler Vibrometry and Modal Testing*, Univ. Ljubljana, April 2008.
- [6] P. Castellini, L. Scalise, G.M. Revel, Vibration measurements for diagnosis of Structural Defects on Human Teeth, Elsevier Science Ltd, 2000.
- [7] P. Castellini, L. Scalise, Teeth Mobility Measurement by Laser Doppler Vibrometer, *American Institute of Physics*, Volume 70, Number 6, 1999.
- [8] Polytec Company, [online] , available: <http://www.polytec.com>
- [9] K.G. Macconne, P.S. Varoto, *Vibration testing: theory and practice*, Second Edition, John Wiley, 2008.
- [10] S. S. Sastry, *Introductory Methods of Numerical Analysis*, Fourth Edition, India: Prentice Hall, 2005.
- [11] Eetimes web page, available: <http://www.eetimes.com>



شکل ۵. منحنی FFT بدست آمده برای سشوار برقی در حالتی که جابه‌جایی‌های آینه در آن صفر شده است.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به تصاویر ثبت‌شده بر روی اسیلوسکوپ می‌توان نتایج به‌دست‌آمده را به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

الف. طراحی ارتعاش‌سنج لیزر داپلر با استفاده از چیدمان آزمایشگاهی تداخل‌سنج مایکلسون و اندازه‌گیری فرکانس، دامنه و سرعت ارتعاش وسایل مختلف قابل انجام است.

ب. در این چیدمان فرکانس‌های بالاتر از 100Hz و سرعت‌های حدود $7\ \mu\text{m/s}$ و بالاتر قابل اندازه‌گیری می‌باشد. همچنین با در نظر گرفتن یک رفت یا یک برگشت، دامنه نوسان شیء مرتعش با محاسبه تعداد اوج‌ها به دست می‌آید.

ج. فرکانس ارتعاش شیء با فرکانس حاصل از دستگاه شتاب‌سنج در تطابق خوبی است.

د. داده‌های ثبت شده توسط اسیلوسکوپ مربوط به جابه‌جایی‌های آینه و فرکانس شیء مرتعش می‌باشد، لذا قبل از اعمال تبدیل فوریه بر داده‌ها باید داده‌های مربوط به جابه‌جایی‌های آینه حذف شود.

پی‌نوشت

1. Laser Doppler vibrometry (LDV)
2. Peaks
3. Fast Fourier transform
4. Discrete Fourier transform
5. Hamming
6. Hanning
7. Cross power spectral density