بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

اندازه گیری پهنای طیفی لیزرهای Narrow linewidth با استفاده از روش Self-Homodyne و به کار بردن مدولاتور فاز

نرگس شهریاری، اصغر غلامی، محمدجواد حکمت، نسترن پورشب، محمد کنعانی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده– در این مقاله یک روش همودایِن اصلاح شده با مدولاتور فاز و فیبر تاخیر کوتاه به منظور اندازه گیری پهنای طیفی یک لیزر دیود ارائه شده است. با بکارگیری فیبر تاخیردهنده کوتاه در ساختار همودایِن، نویز فرکانس پایین از طیف پرتوی خروجی حذف شده و امکان اندازه‌گیری پهن‌شدگی طیف ناشی از نویز سفید فراهم می‌شود. با استفاده از این روش، پهنای طیف یک لیزر دیود ۸۳کیلوهرتزی با طول موج ۱۵۵۰ نانومتر، اندازه‌گیری شده است. در این پژوهش اندازه‌گیری طیف نهایی با استفاده از دستگاه *RF spectrum analyzer* و با محاسبات نرم افزاری صورت گرفته است.

کلید واژه- لیزرهای با پهنای طیفی کم، لورنتزین، مدولاتور فاز ، Self Homodyne

Spectrum Width Measurement of narrow linewidth lasers based on self Homodyne method using phase modulator

Narges Shahriari, Asghar Gholami, Mohammad Javad Hekmat, Nastaran Pourshab, Mohammad Kanani

Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract-In this paper, a modified Self Homodyne using phase modulator and short delay fiber length in order to measure the spectral width of a laser diode is presented. By using short delay fiber in homodyne structure, 1/f low frequency noise has been filtered from spectrum of the output beam. So possibility of measuring the broadening of the spectrum due to white noise (the width of the Lorentzian spectrum) is provided. By use of this method, the linewidth of a 1550 nm laser diode with 83 kHz spectrum width has been measured. The result data of linewidth measurement using RF spectrum Analyzer (directly) and software are compared.

Keywords: Narrow linewidth Laser, Lorentzian, Phase modulator, Self-Homodyne

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

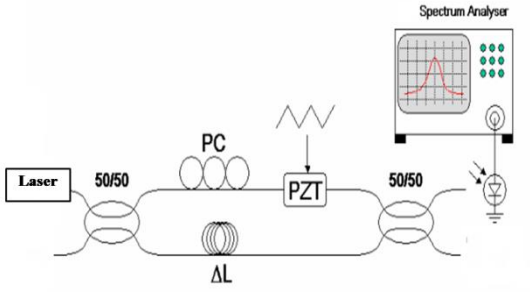
۱. مقدمه

لیزرهای Narrow linewidth باتوجه به پهنای طیف باریک و نویز فازکم، به طورگسترده درکاربردهایی نظیر سیستم های حسگر اپتیکی، سیستم های ارتباطات نوری وغیره استفاده می شوند[۱]. یکی از چالش هایی که سازندگان با آن روبه رو بوده اند، اندازه گیری دقیق طیف چنین لیزرهایی است. هنگامی که خروجی لیزر دارای طیف باریک است، دستگاه های تحلیل گر طیف اپتیکی (OSA)، تجزیه و تحلیل طیف نوری را با دقت و وضوح کافی ارایه نمی دهد. تکنیک های تشخیص هترودین و هموداین برای اندازه گیری پهنای طیف با وضوح مناسب، ارائه شده است[2].

روش اندازه گیری هموداین و هترودین یک روش تعیین شده برای اندازه گیری پهنای طیف لیزر است. ایده اصلی این روش بر مبنای تبدیل فاز یا فرکانس نوسانات نوری لیزر به تغییرات شدت نور در یک تداخل سنج مانند تداخل سنج ماخ زندر است. در تداخل سنج، میدان نوری با پرتوی تاخیر یافته از خود آن سیگنال ترکیب شده و سیگنال تداخل با یک فوتودیود حساس آشکارسازی می شود. فرکانس مرکزی طیف حاصل از تداخل برابر با اختلاف فرکانس اپتیکی دو پرتو است. پهنای طیف لیزر از طیف توان ثبت شده از نوسانات شدت محاسبه می شود. در ساختار هموداین هر دو پرتو دارای فرکانس اپتیکی یکسان بوده و طیف حاصل از تداخل در باند پایه قرار می گیرد. در ساختار هترودین، مدولاتور آکوستواپتیک نوری که یک المان گران قیمت با اتلاف بالا است، برای شیفت فرکانس مرکزی طیف استفاده می شود. با این دو روش طیف تداخلی در پهنای باند دستگاه های الکترونیکی قرار خواهد گرفت لذا امکان استفاده از ادوات الکترونیکی مهیا می شود[1] .

بطور کلی نویز لیزر را می توان به دوسته نویز سفید و نویز رنگی تقسیم کرد[۴]. طیف حاصل از نویز سفید یک طیف لورنتزی و طیف حاصل از نویز رنگی یک طیف گوسی است. در سیستم های تداخل سنج به هنگام محاسبه طیف سیگنال تداخلی، یک تابع بالا گذر وابسته به میزان تاخیر سیستم ظاهر می شود که به ازای تاخیرهای کم، نویز های رنگی فرکانس پایین (1/f) را فیلتر می کند. در سیستم های انتقال داده همدوس با نرخ انتقال بالا که نویز 1/f در عملکرد آن ها تاثیرگذار نیست لازم است پهنای طیف لورنتزی لیزر محاسبه شود، لذا در این موارد امکان اندازه گیری با طول تاخیر کوتاه مهیا می شود. [3] تلفات نوری مدولاتور آکوستواپتیک قابل توجه می باشد و این به طور معمول سبب کاهش حساسیت کلی سیستم در ساختار هترودین در حدود چند دسی بل می شود. در این پژوهش یک ساختار هموداین اصلاح شده با استفاده از یک مدولاتور فاز و یک فیبر تاخیردهنده 1km، بررسی شده است و پهنای طیف لیزر به دو روش مستقیم و روش تطبیق محاسبه شده است.

سیستم اندازه گیری با استفاده ازروش هموداین در باند پایه است و یکی از دلایل ایجاد شیفت فرکانسی بین دو پرتوی تداخلی حذف سیگنال DC آشکارسازی شده در فتودیود است. در باند پایه نویز فرکانس پایین فتودیود مطرح می شود. با استفاده از ساختار هموداین اصلاح شده SNR سیستم نسبت به روش هموداین معمولی به طور قابل ملاحظه ای بهبود می یابد.[1]



شکل ۱: ساختار هموداین اصلاح یافته با استفاده از مدولاتور فاز

۲. روش اندازه گیری هموداین اصلاح شده

در سیستم تداخلی وقتی تفاوت مسیر دو پرتو بیشتر از طول همدوسی لیزر باشد، فاز میدان ها ناهمبسته خواهد بود و سیگنال تداخل اندازه گیری شده، حساس به متوسط اختلاف فاز میدان ها نیست اما برای میدان هایی با فاز مرتبط، طیف هموداین مشاهده شده شدیدا به فاز نوری وابسته است. در این روش پیشنهادی، با استفاده از یک مدولاتور فاز که در یکی از شاخه های تداخل سنج وارد می شود، مشکل وابستگی فاز بین پرتوهای تداخلی به اختلاف فاز تا حد قابل قبولی برطرف می شود. در

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

روش همودائین اصلاح یافته امکان استفاده از مسیرهای تاخیر کوتاه، وجود دارد.

با فرض این که نوسانات فاز نوری لیزر یک فرآیند گوسی تصادفی با میانگین صفر باشد در ساختار هترودائین با طیف نویز فرکانسی $S(\omega)$، تابع خودهمبستگی شدت فتودیود به صورت زیر خواهد بود:[4]

$$G_E^2(\tau) = E_0^4[(1+\alpha^2)^2 + 2\alpha^2 Cosw_m \tau e^{-2s(\tau,\tau_0)}] \quad (۱)$$

$$s(\tau,\tau_0) = \frac{2}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \sin^2(\omega\tau/2)\sin^2(\omega\tau_0/2)S(\omega)\omega^{-2}d\omega \quad (۲)$$

τ_0 میزان تاخیر از دو مسیر نوری، α پارامتر نسبت دامنه میدان های تداخلی و ω_m فرکانس مدولاتور آکوستواپتیک است.

برای ساختار همودائین، تابع خود همبستگی شدت فتودیود به صورت زیر است:

$$\boxed{\begin{array}{l} G_E^2(\tau) = E_0^4[(1+\alpha^2)^2 + 4\alpha(1+\alpha^2)Cos\theta \\ e^{-c(\tau,\tau_0)/2} + 2\alpha^2[Cos2\theta \times e^{-2c(\tau,\tau_0)} + e^{-2s(\tau,\tau_0)}]] \end{array}} \quad (۳)$$

$$c(\tau,\tau_0) = \frac{2}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \cos^2(\omega\tau/2)\sin^2(\omega\tau_0/2)S(\omega)\omega^{-2}d\omega \quad (۴)$$

$\theta = \varpi_0\tau_0$ متوسط اختلاف فاز میدان های تداخلی در فتودیود است که به اختلاف مسیرهای نوری بستگی دارد. در ساختار همودائین اصلاح شده ترم های وابسته به $\cos\theta$ و $\cos 2\theta$ در معادله به طور متوسط صفرخواهند شد. در این صورت توابع همبستگی مربوط به دو ساختار هترودائین و همودائین از رابطه۱ و ۳، تنها در عبارت $COS\omega_m\tau$ که ناشی از شیفت فرکانسی مدولاتور آکوستواپتیک است، متفاوت خواهند بود. طیف توان لیزر با تبدیل فوریه گرفتن از تابع G حاصل می شود. [1]

برای هر دو روش، طیف توان نشات گرفته از نویز فاز سفید، تنها شامل یک پیک ضربه باریک که در روی یک پایه شبه لورنتزی گسترده شده، قرار می گیرد. میزان همبستگی میدان های تداخلی بستگی به طول خط تاخیر دارد. برای مدت زمان تاخیر کوتاه تر از زمان همدوسی لیزر، فاز میدان در دو شاخه تا حدی همبسته است. لذا یک الگوی نوسانی سوار بر خط لورنتزی با دوره نوساناتیکه مرتبط با $\frac{1}{\tau_0}$ است، مشاهده خواهد شد. افزایش تاخیر سبب می شود که درطیف توان سیگنال، به تدریج دامنه پیک ضربه کم و همزمان، فرکانس نوسانات در بال طیف افزایش یابد. برای تاخیر طولانی $\tau_0 \gg \tau_c$ فاز میدان ها کاملا ناهمبسته و مجزای از یکدیگر هستند و در این حالت طیف توان کاملا لورنتزی و با پهنایی دو برابر FWHM لیزر خواهد بود.[1, 4]

در ساختار همودائین اصلاح شده با یک مدولاتور فاز که با استفاده از یک ولتاژ مثلثی درایو می شود، فاز به صورت خطی مدوله شده و از وابستگی شدید به θ در حالتی که طول تاخیرکوتاهتر از زمان همدوسی لیزر است، متوسط گیری می شود. عبارت $\sin^2(\omega\tau_0/2)$ در رابطه های ۲ و ۴ به عنوان یک فیلتر بالا گذر در طیف نویز فرکانس عمل می کند. این ترم سبب می شود که مقدار نویز فرکانس پایینی که وارد طیف اندازه گیری می شود به طول خط تاخیر بستگی داشته باشد. برای تاخیر کوتاه، نویز فرکانس پایین به طور موثر از طیف حذف می شود، در حالی که برای تاخیر طولانی، این نویز تاثیر برجسته تری دارد. این واقعیت می تواند برتری در روش اندازه گیری همودائین اصلاح شده با طول تاخیر کوتاه را که در آن پهنای طیف لورنتزی پارامتر موردنظر است، نشان دهد.

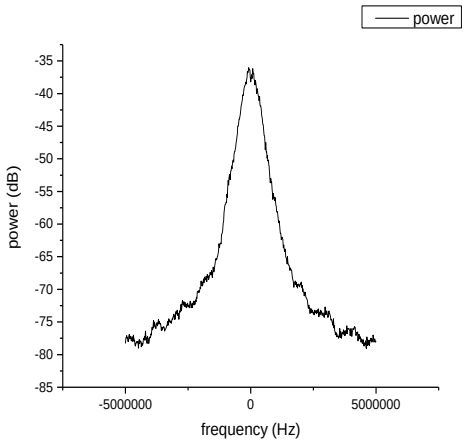
۳. سخت افزار و نتایج آزمایشگاهی

ساختار استفاده شده برای استخراج پهنای طیف لیزر در شکل ۱ آورده شده است. از یک دیود لیزر SFL1550 با جریان درایو 150mA برای تست استفاده شده است. پرتوی خروجی لیزر توسط یک کوپلر ۵۰/۵۰ به ساختار تداخل سنج ماخ زندر وارد می شود. یک مدولاتور فاز با ولتاژ نیم موج ۱۰ ولت در بازوی تاخیر قرار داده شده است. این مدولاتور با استفاده از یک موج مثلثی با فرکانس 555Hz که توسط یک مدار الکترونیکی تولید می شود با ولتاژ Vpp=60v درایو می شود لذا میزان تغییرات فاز اعمال شده توسط مدولاتور 6π است. یک فتودیود به همراه تقویت کننده و دستگاه طیف سنج با پهنای باند 3Hz- 6.7GHz به کار گرفته شده است. زمان اندازه گیری ۱۰ ثانیه در ۶۰۱ کانال است لذا زمان ماندگاری هر کانال۱۶.۶ میلی ثانیه خواهد بود. بنابراین تغییرات کل فاز

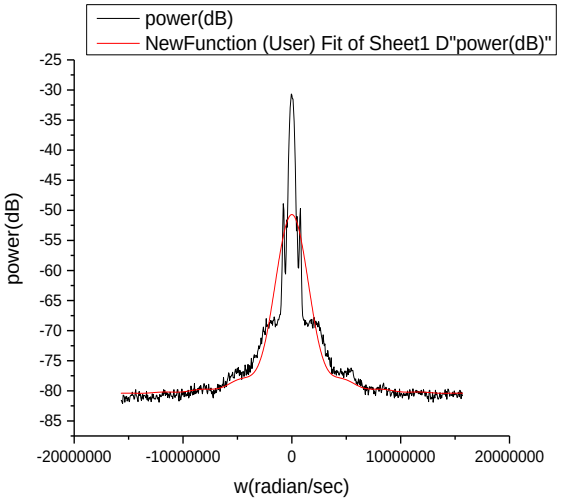
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

$8*6\pi$ است و طیف نهایی پس از ۱۰۰ مرتبه متوسط گیری ثبت شده است است برای افزایش SNR سیستم از یک کنترل کننده قطبش در یک بازو استفاده شده است. با تغییر موقعیت دیسک ها سطح طیف تغییر می کند.

شکل ۲ و ۳ طیف سیگنال تداخلی را با طول تاخیر 1km، $5.07\,\mu\sec$ نشان می دهد که با استفاده از نرم افزار تطبیقی، به ازای $\Delta\nu = \Delta\omega/2\pi = 83KHz$ تطبیق خوبی در بخش باله های طیف که ناشی از نویز سفید است، مشاهده می شود. پهنای طیفی با تطبیق طیف دو طرفه که با استفاده از تبدیل فوریه از تابع خودهمبستگی حاصل می شود، استخراج می شود. در اندازه گیری با روش مستقیم، مقدار پهنای طیفی لیزر $\Delta\nu = f3dB/2 = 233.3/2 = 116.5KHz$ بدست می آید که بیشتر از مقدار واقعی و بدست آمده از روش تطبیق است و این اختلاف به دلیل اثر نویز فرکانس پایین است.



شکل۲: طیف تداخل با پهنای طیف 3dB ، 233KHz در محدوده فرکانسی 5MHz (روش مستقیم)



شکل۳: طیف حاصل از تداخل در محدوده فرکانسی 100MHz

نتیجه‌گیری

در این پژوهش سیستم اندازه گیری پهنای طیف لیزر با استفاده از ساختار همودین اصلاح شده با مدولاتور فاز و فیبرتاخیر با طول کوتاه بررسی و پیاده سازی گردید که این ساختار درحالتی که رفتار فرکانس بالای طیف نویز فاز مورد توجه باشد، نتایج قابل قبولی از پهنای طیف لورنتزی لیزر بدست می دهد.

مراجع

[1] Ludvigsen H., Bordtker E., *New method for self-homodyne laser linewidth measurements with short delay fiber*, **Optics Communications**. 110 (1994) 595-598.

[2] Chen X., *Ultra-Narrow Laser Linewidth Measurement*, **Virginia Polytechnic Institute and State University** (2006).

[3] Mercer L., *1/f frequency noise effect on self heterodyne linewidth measurements*, **Lightwave Technology**. 9 (*1991*).

[4] Ludvigsen H., Tossavainen M, Kaivola M., *Laser linewidth measurements using self-homodyne detection with short delay*, **Optics Communications**. 115 (1998) 180-186.

[5] Nguyen L., *DFB laser coherence and linewidth broadening*, **Electronic wafer & radar division system science laboratory Australia, (**2002).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]