

پایدارسازی فرکانس و توان لیزر گازی هلیوم- نئون مورد استفاده در سامانه‌ی نانومترولوژی بر مبنای منطق فازی

سعید علیائی^۱، مهسا باقری^۲

^۱ دانشیار دانشکده‌ی مهندسی برق، آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، s_olyae@srttu.edu

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده‌ی مهندسی برق، آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، nbm.bagheri@gmail.com

چکیده - در این مقاله، طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده‌ی فرکانس و توان لیزر گازی هلیوم- نئون بر اساس منطق فازی با عملکرد بهینه و مطلوب با استفاده از نرم‌افزار قدرتمند *MATLAB/SIMULINK* انجام و نتایج به دست آمده بیان شده است. اساس طراحی این سیستم کنترلی فازی، روش ترکیبی تعادل توان و قفل فرکانسی است تا هر چه بیشتر بتوان پایداري سیستم را بالا برد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نوسانات فرکانسی و توان خروجی لیزر به ترتیب به 10^{-11} و $\pm 0.1\%$ می‌رسد. تفکیک‌پذیری اندازه‌گیری جابه‌جایی برابر با 0.06 نانومتر است. همچنین، میزان خطای *IAE* به $6/557$ کاهش یافته و عملکرد سیستم در مقایسه با سایر کنترل‌کننده‌های مرسوم بهبود یافته است. کلید واژه - طول کاواک، کنترل‌کننده‌ی لیزر، لیزر گازی *He-Ne*، منطق فازی، ناپایداری‌های حرارتی

۱- مقدمه

وجود یک چشمه‌ی نور با تکفامی بالا و فرکانس پایدار، امری ضروری است.

در لیزرهای گازی به ویژه لیزر هلیوم- نئون، فرکانس نور خروجی به سبب تغییر دما و در نتیجه تغییر طول کاواک تشدید، متغیر است. گرچه ارتعاش‌های آکوستیکی نیز می‌تواند موجب ناپایداری فرکانسی شود، ولی در تقریب اول از آن در مقایسه با اثر دما می‌توان صرف‌نظر کرد. در اثر تغییر طول لیزر، فرکانس هر مود روی خط بهره‌ی لیزر حرکت می‌کند و موجب تغییر شدت هر مود می‌شود. در راستای تثبیت نگه داشتن طول کاواک، روش کنترل جریان تخلیه‌ی لیزر و یا استفاده از یک سیم‌پیچ حرارتی که دور لوله‌ی لیزر پیچیده می‌شود، به کار می‌رود.

قبل از سال ۱۹۶۱، بهترین چشمه‌های نور از نظر تکفامی، لامپ‌های تخلیه‌ی عناصر کادمیوم و سزیوم بودند [۳]. در این سال با کشف لیزر هلیوم- نئون به وسیله‌ی علی جوان و همکارانش، معلوم شد که تکفامی نور لیزر بسیار بیشتر است. با گذشت زمان، محققان متوجه شدند که فرکانس نوسان لیزر در اثر عوامل مختلفی به ویژه دما ثابت نیست و با سپری شدن زمان، به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. به این ترتیب با توجه

لیزر یک موج‌بر نوری است که توسط آینه یا دیوارهای بازتابگر به شکل یک کاواک تشدیدگر محدود شده باشد. لیزر، نور را به صورت پرتوهای موازی بسیار باریکی که طول‌موج مشخصی دارند، ساطع می‌کند. یکی از رایج‌ترین لیزرهای مورد استفاده در سامانه‌ی نانومترولوژی، لیزر گازی هلیوم- نئون است. لیزرهای هلیوم- نئون معمولی با تک رنگی بالا، فقط یک تک فرکانس از نور را تولید نمی‌کنند. در این لیزرها، تعداد متعددی فرکانس نزدیک به هم به طور همزمان و شدت‌های متفاوت فعال هستند. برای بسیاری از کاربردها ممکن است که این موضوع از اهمیت بالایی برخوردار نباشد اما برای اندازه‌گیری ابعاد با دقت بالا از اهمیت و جایگاه بالایی برخوردار است. در تداخل‌سنجی- های بسیار دقیق، وجود یک چشمه‌ی نوری با پهنای فرکانس باریک مورد نیاز است. برای مثال، در آشکارسازی امواج گرانشی از طریق تداخل‌سنجی که امروزه مورد توجه نظری و تجربی بسیاری در جهان قرار گرفته است، تغییر فرکانس یک هرتز هم زیاد است [۱-۲]. به طور کلی در اندازه‌گیری هر کمیت فیزیکی که با استفاده از تداخل‌سنجی صورت بگیرد، تغییر فرکانس ناخواسته‌ی نور موجب تغییر اختلاف فاز ناخواسته می‌شود و در نتیجه دقت اندازه‌گیری را محدود می‌کند. لذا، در موارد بسیاری

$$FSR = \frac{c}{2nL} \quad (1)$$

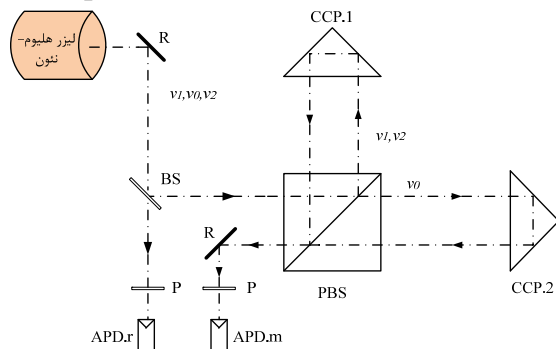
با توجه به معادله بالا، با افزایش طول کاواک لیزر، فاصله-ی مودی کاهش می‌یابد. فرکانس تداخلی درون مودی با انبساط حرارتی کاواک کاهش می‌یابد. با مشتق گرفتن از معادله (۱) داریم:

$$dv_b = -\frac{c}{2nL^2} dL \quad (2)$$

در اینجا dv_b رانش فرکانس تداخلی درون مود و dL انبساط حرارتی کاواک است.

در لیزر هلیوم-نئون سه مود، سه فرکانس تداخلی درون-مودی وجود دارد. بنابراین، در لیزر سه مود، فرکانس تداخلی دوم، ν_b ، بسیار کوچکتر از دیگر فرکانس‌های تداخلی ν_H و ν_L است. شکل ۱ ساختار نوری سیستم اندازه‌گیری جابه‌جایی با استفاده از لیزر هلیوم-نئون سه مودی پایدار شده را نشان می‌دهد. پایداری کاواک برای دقت بالا در سیستم‌های اندازه‌گیری جابه‌جایی ضروری است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، پرتو با فرکانس ν_0 از میان شکافنده-قطبنده‌ی پرتو (PBS) می‌گذرد و فرکانس‌های دیگر ν_1 و ν_2 بازتاب می‌شود. با توجه به قانون مربع آشکارساز نوری، سیگنال مرجع به صورت زیر بیان می‌شود:

$$I_{APD_r} = [E_r \cos(2\pi\nu_r t) + E_s \cos(2\pi\nu_s t) + E_0 \cos(2\pi\nu_0 t)]^2 \quad (3)$$



شکل ۱: ساختار نوری سیستم اندازه‌گیری سرعت و جابه‌جایی با لیزر هلیوم-نئون سه مودی؛ BS: شکافنده‌ی پرتو، APD: دیود نوری بهمنی، CCP: منشور مکعبی گوشه‌دار، PBS: شکافنده-قطبنده‌ی پرتو، P: قطبنده، T: مرجع، m: اندازه‌گیری [۹]

عبارت‌های فرکانس بالا با دیود نوری بهمنی مرجع، I_{APD_r} حذف می‌شوند، معادله (۳) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$I_{APD_r} = A \cos(2\pi(\nu_2 - \nu_1)t) + B \cos(2\pi(\nu_2 - \nu_0)t) + C \cos(2\pi(\nu_0 - \nu_1)t) + D = A \cos(2\pi(\nu_H + \nu_L)t) + B \cos(2\pi\nu_H t) + C \cos(2\pi\nu_L t) + D \quad (4)$$

در اینجا $A=E_1E_2$ ، $B=E_0E_2$ ، $C=E_0E_1$ و $D=0.5(E_1^2 + E_2^2 + E_0^2)$ است. جریان خروجی دیود نوری بهمنی اندازه‌گیری، I_{APD_m} برابر است با:

به اهمیت مسأله‌ی پایداری لیزر هلیوم-نئون، از آن زمان تا کنون بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بالهون و همکارانش در سال ۱۹۷۲ از اولین کسانی بودند که فرکانس این نوع لیزر را پایدار کردند [۴]. آن‌ها با توجه به تغییراتی که در شدت هر یک از موده‌های لیزر مشاهده می‌شد، با استفاده از یک سیستم الکترونیکی سعی کردند تا ولتاژ تغذیه‌ی لیزر را در جهت تثبیت فرکانس نور لیزر کنترل کنند. در این تلاش، آن‌ها توانستند افت و خیزهای فرکانس را تا ۳۰ برابر کاهش دهند. پس از آن بنت در سال ۱۹۷۳ از روش سیم‌پیچ حرارتی توانست پایداری توان دو مود لیزر را بهبود دهد و به پایداری تا ۱۰۰ برابر دست یابد [۵]. فرانک در سال ۱۹۷۳ اثر Zeeman برای پایداری لیزر گازی هلیوم-نئون استفاده کرد که توانست نوسانات توان را به $\pm 0.05\%$ برساند [۶]. اولین بار، پایداری لیزر فرکانس و توان لیزر هلیوم-نئون سه مود توسط سو در سال ۱۹۹۳ معرفی شد که میزان پایداری 5×10^{-11} حاصل شد [۷]. سعید علیائی در سال ۲۰۰۷ روشی مبنی بر ترکیب قفل فرکانسی و تعادل توان به منظور پایداری لیزر هلیوم-نئون مطرح کرد که توانست میزان پایداری را به 3×10^{-11} برساند [۸].

در این مقاله، پایداری لیزر هلیوم-نئون با استفاده از کنترل فازی بر اساس روش ترکیبی قفل فرکانسی و تعادل توان مطرح شده است که میزان پایداری به 10^{-11} رسید و خطای IAE برابر با ۶/۵۵۷ شد.

۲- ضرورت پایداری لیزر هلیوم-نئون در سامانه‌ی

نانومترولوژی

علم اندازه‌گیری در مقیاس نانو، نانومترولوژی نامیده می‌شود. با پیشرفت سریع فن‌آوری، بدون شک ساخت و توسعه قطعات میکروالکترونیک و فرایندهای مختلف فوتولیتوگرافی و ماسک-سازی در ابعاد بسیار کوچک، بدون وجود سامانه‌های کنترل و اندازه‌گیری دقیق جابه‌جایی و سرعت در محورهای مختلف، امکان‌پذیر نیست. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های نانومتری موجود است، اما کارآمدترین روش به خصوص در سرعت‌های بالا، روش تداخل سنج داپلری است. برای این منظور یا از لیزرهای چندمودی و یا ترکیبی از چند لیزر با طول‌موج‌های مختلف استفاده می‌شود که در این صورت پایدار بودن این منابع لیزری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۹].

محدوده‌ی طیفی آزاد یا فاصله‌ی مودی در کاواک‌های لیزر به صورت زیر بیان می‌شود:

سیگنال به مبدل فرکانس به ولتاژ (F/V) فرستاده می‌شود. سیگنال خروجی F/V می‌تواند به عنوان بخشی از سیگنال خطا استفاده شود. به عبارت دیگر، در مسیر موازی، یک تقویت‌کننده-ی تفاضلی بخش دیگری از سیگنال خطا را تولید می‌کند. بر طبق شکل ۳، مود مرکزی و مدهای کناری به ترتیب روی APD.2 و APD.3 هستند. بنابراین، یک فیلتر پایین‌گذر در انتهای IVC.1 نیاز داریم. دو سیگنال خطا به اضافه سطح DC، سیگنال کنترلی را تولید می‌کنند. اگر موقعیت ایستای مودها تغییر نکند، سیگنال کنترلی ثابت خواهد بود. تغییرات در طول کاواک موجب ایجاد سیگنال خطا می‌شود. سیگنال کنترلی به نوسان‌ساز کنترل‌شونده با ولتاژ (VCO) ارسال می‌شود و از طریق آشکارساز فاز/فرکانس و حلقه‌ی فیلتر به کنترل‌کننده‌ی مدولاسیون پهنای پالس (PWM) ارسال می‌شود. نوسان فرکانس لیزر هلیوم-نئون به وسیله‌ی اندازه‌گیری شدت پرتوها یا فرکانس نوسان‌ساز کنترل شده با ولتاژ انجام می‌شود. سپس این فرکانس تولید شده در نوسان‌ساز با یک فرکانس مرجع در یک نوسان‌ساز فاز/فرکانس مقایسه می‌شود. همان‌طور که در بلوک دیاگرام شکل ۳ مشاهده می‌شود، در اینجا دو حلقه‌ی خودتنظیم وجود دارد. حلقه‌ی اول، حلقه‌ی پیش‌گرمایش است. حلقه‌ی دوم همان حلقه‌ی پایدارسازی بر اساس روش ترکیبی قفل فرکانسی و تعادل توان است. زمانی که لیزر روشن می‌شود، مطابق با شکل ۳، یک دوره‌ی پیش‌گرمایش فعال می‌شود. بنابراین، دمای لیزر به مقدار مناسب می‌رسد. سپس، حلقه‌ی پایدارسازی بسته می‌شود و طول کاواک کنترل می‌شود.

در اینجا حلقه‌ی فیلتر، کنترل‌کننده‌ی فازی انتخاب شده است تا بتوان زمان گذرا و پاسخ حالت پایدار را به صورت مطلوبی تنظیم کرد و میزان خطای IAE را در سیستم کنترلی کاهش داد.

رفتار دمایی لیزر و محفظه‌ی آن بسیار پیچیده است اما برای سادگی می‌توان آن را با فیلتر پایین‌گذر با ثابت زمانی RC مدل کرد. بنابراین تابع تبدیل لیزر کنترل شده PLL دمایی، از رابطه-ی زیر پیروی می‌کند:

$$\begin{cases} H(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\omega_n\zeta S + \omega_n^2} \\ \zeta = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{RC K_1 K_2 G} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \omega_n = \left(\frac{K_1 K_2 G}{RC} \right)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (7)$$

$$I_{APD_m} = [E_1 \cos(2\pi\nu t) + E_2 \cos(2\pi\nu t) + E_0 \cos(2\pi(\nu_0 \pm \Delta\nu_0)t + \Phi)]^2 \quad (5)$$

$$= A \cos(2\pi(\nu_H + \nu_L)t) + B \cos(2\pi(\nu_H \mp \Delta\nu)t - \Phi) + C \cos(2\pi(\nu_L \pm \Delta\nu)t + \Phi) + D$$

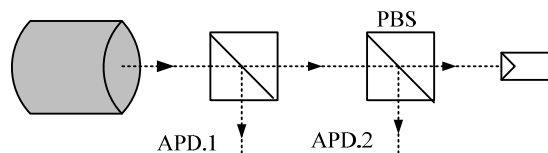
اگر اختلاف فازهای اولیه و نهایی بین سیگنال‌های مرجع و مبنا به ترتیب با Φ_1 و Φ_2 نشان داده شود و فرکانس جابه‌جایی داپلر با N بیان شود، آنگاه جابه‌جایی از معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\Delta d = \frac{N\lambda}{4n} + \frac{\lambda}{8n\pi}(\Phi_2 - \Phi_1) \quad (6)$$

با توجه به معادله‌ی بالا می‌توان دریافت که در صورت ناپایدار بودن لیزر هلیوم-نئون، طول موج آن ثابت نخواهد بود که نتیجه‌ی آن تغییر در اندازه‌گیری جابه‌جایی است.

۳- سیستم کنترلی مبنی بر منطق فازی

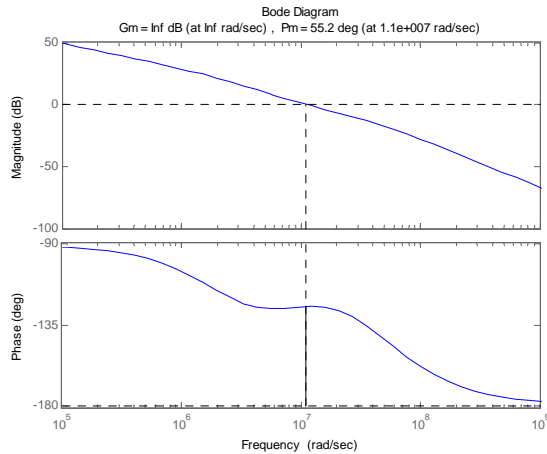
در این جا فرض می‌کنیم که طول کاواک ۳۵ سانتی‌متر است، در نتیجه نمودار بهره‌ی منبع لیزر شامل سه مود طولی است. قطبش مدهای کناری (λ_1 و λ_3) متعامد با قطبش مود مرکزی (λ_2) است که این به علت قطبش ناهمسانگرد آینه‌های لیزر است. شکل ۲ بخش نوری یک ساختار پایدارساز فرکانسی لیزر به وسیله‌ی ترکیب دو روش قفل فاز و تعادل توان را نشان می‌دهد. پرتوی عقبی لیزر هلیوم-نئون سه‌مود به وسیله‌ی شکافنده‌ی پرتو (BS) جدا شده است. بعد از عبور پرتوی بازتاب شده با قطبندگی خطی ۴۵ درجه، روی یک دیود نوری بهمنی SILK کم‌نویز و سرعت بالا (APD.1) متمرکز می‌شود. یک سیگنال دارای فرکانس‌های اولیه به وسیله‌ی دیود نوری بهمنی در اثر تداخل میدان‌های الکتریکی سه مود بعد عبور از قطبندگی خطی تولید شده است. پرتوی عبوری از شکافنده‌ی پرتو به سمت شکافنده-قطبندگی پرتو هدایت می‌شود و دو جریان نوری متناسب با دامنه‌ی میدان‌های الکتریکی تولید می‌شود [۸].



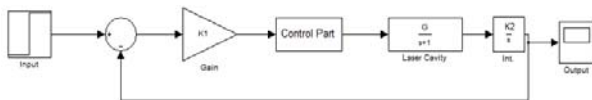
شکل ۲: بخش نوری پایدارساز فرکانسی لیزر با دو روش ترکیبی قفل فرکانسی و تعادل توان [۸]

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، سیگنال خروجی APD.1 از طریق مبدل جریان به ولتاژ به فیلتر میان‌گذر فرستاده می‌شود. در ابتدا، تداخل بین مدها، مولفه‌های DC و فرکانس-های درون مودی ایجاد می‌کند. بنابراین، باید فرکانس دوم را به وسیله‌ی مخلوط‌کننده و فیلتر میان‌گذر استخراج کنیم. سپس،

نمودار بود $G_C(S)G(S)$ در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل به وضوح دیده می‌شود، حاشیه‌ی فاز 50° و حاشیه‌ی بهره $+\infty$ dB است. بنابراین به خواسته‌های مطلوب در طراحی دست یافته‌ایم. بلوک دیاگرام کاواک لیزر و پایدارساز آن در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴: نمودار بود تابع $G_C(S)G(S)$



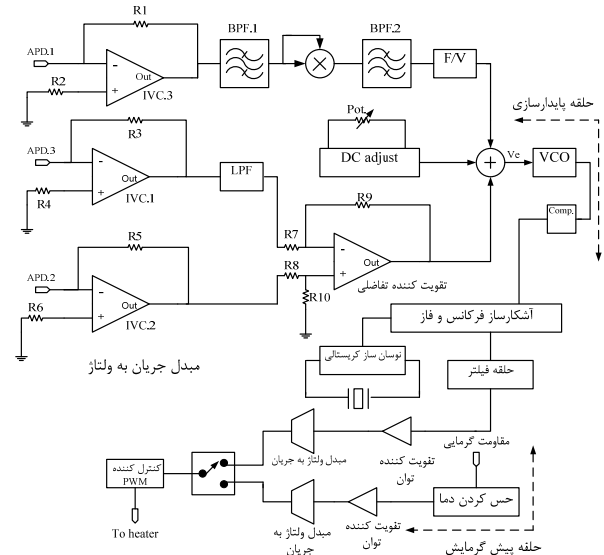
شکل ۵: بلوک دیاگرام کاواک لیزر و پایدارساز آن

در اینجا، کنترل‌کننده‌ی موازی Fuzzy P+ Fuzzy I+ Fuzzy D جهت تحلیل پاسخ سیستم و پایداری لیزر استفاده شده است. این کنترل‌کننده از سه کنترل‌کننده‌ی فازی متناسبی، انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر که به صورت موازی با هم قرار دارند، تشکیل می‌شود. سیگنال کنترلی کنترل‌کننده‌ی موازی Fuzzy P، Fuzzy I+ Fuzzy D از جمع جبری سیگنال‌های کنترلی کنترل‌کننده‌های Fuzzy P، Fuzzy I و Fuzzy D ایجاد می‌شود. بنابراین تابع کنترلی این کنترل‌کننده به صورت زیر است:

$$u(nT) = u_P(nT) + u_I(nT) + u_D(nT) \quad (10)$$

$$u(nT) = G_P u_P(nT) + u_I(nT - T) + G_I \Delta u_I(nT) - u_D(nT - T) + G_D \Delta u_D(nT)$$

شکل ۶، بلوک دیاگرام سیستم پایدارسازی لیزر با کنترل‌کننده‌ی موازی فازی P + فازی I + فازی D را نشان می‌دهد. در اینجا، $K_{p1}e(nT)$ و $K_{p2}\Delta e(nT)$ ورودی‌های کنترل‌کننده‌ی فازی P هستند. $K_{i1}e(nT)$ و $K_{i2}r(nT)$ ورودی‌های کنترل‌کننده‌ی فازی I هستند. $u_P(nT)$ و $\Delta u_I(nT)$ خروجی‌ها هستند. توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی‌های تعریف شده در مدل سیمولینک در شکل ۷ نشان داده شده است که با توجه به قوانین فازی تعیین



شکل ۳: سیستم پایدارسازی لیزر گازی هلیوم- نئون با روش ترکیبی قفل فرکانسی و تعادل توان [۸]

که در آن K_1 بهره‌ی مقایسه‌کننده‌ی فاز، $\frac{G}{\tau S + 1}$ تبدیل لوله‌ی لیزر با ثابت زمانی $\tau = RC$ و K_2 بهره‌ی نوسان- ساز کنترل‌شونده با ولتاژ است [۱۰-۱۱]. در اینجا بهره‌ی لیزر را $G=65$ و ثابت زمانی آن را $\tau=4 \times 10^{-7}$ در نظر گرفته‌ایم. همچنین $K_1 \approx 1M$ و $K_2 \approx 1.6$ است. به منظور داشتن حاشیه‌ی فاز و حاشیه‌ی بهره مناسب برای پایداری بالا، جبران‌ساز پیش‌فازی با مشخصات زیر را طراحی شده است:

$$8) \quad 50^\circ = \text{حاشیه‌ی فاز}$$

$$\geq 10 \text{ dB} = \text{حاشیه‌ی بهره}$$

$$k_v = 20$$

نمودار بود تابع حلقه باز حاشیه‌ی فاز را برابر با $8/87^\circ$ به دست می‌دهد. حاشیه‌ی بهره نیز $+\infty$ dB است. چون باید حاشیه‌ی فاز برابر 50° باشد، پیش‌فازی لازم برای ارضای حاشیه- ی فاز $41/13^\circ$ است که یک جبران‌ساز پیش‌فاز می‌تواند این پیش‌فازی را ایجاد کند. با گذاشتن جبران‌ساز پیش‌فاز، منحنی دامنه‌ی نمودار بود تغییر کرده و فرکانس عبور بهره به سمت راست جابه‌جا می‌شود. باید پس‌فازی ناشی از این جابه‌جایی فرکانس بهره نیز در نظر گرفته شود. برای منظور کردن اثر این جابه‌جایی ϕ_m ، بیشینه‌ی پیش‌فازی را $46/13^\circ$ فرض می‌کنیم (یعنی تقریباً 5° اضافی برای خنثی کردن اثر جابه‌جایی فرکانس عبور بهره). برای تابع تبدیل حلقه باز سیستم طراحی شده می- توان نوشت:

$$G_C(S) = \frac{176.8 \times 10^6 S + 1.3166 \times 10^{15}}{4 \times 10^{-7} S^3 + 19.3797 S^2 + 45.9494 \times 10^6 S} \quad (9)$$

جدول ۱: قوانین کنترل فازی برای کنترل کننده‌ی فازی P در سیستم کنترلی موازی فازی +P +I فازی D

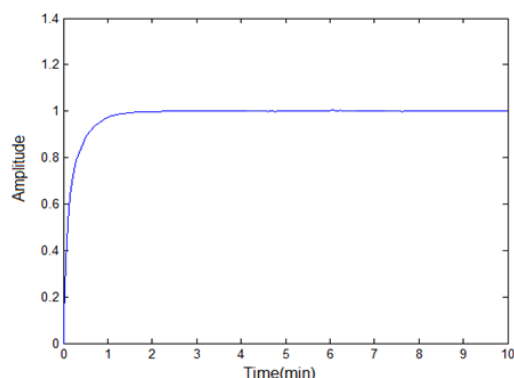
$K_{p1}e(nT)$	$K_{p2}\Delta e(nT)$	$u_P(nT)$
n	n	oz
n	p	op
p	n	on
p	p	oz

جدول ۲: قوانین کنترل فازی برای کنترل کننده‌ی فازی I در سیستم کنترلی موازی فازی +P +I فازی D

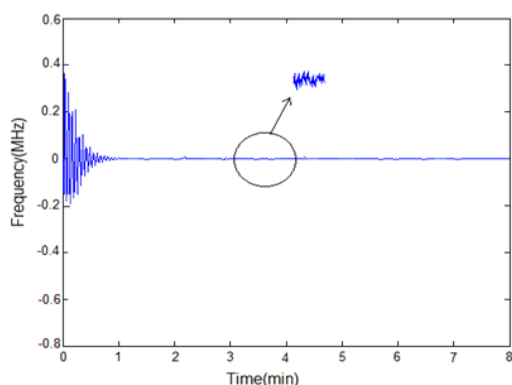
$K_{i1}e(nT)$	$K_{i2}r(nT)$	$\Delta u_I(nT)$
n	n	on
n	p	oz
p	n	oz
p	p	op

جدول ۳: قوانین کنترل فازی برای کنترل کننده‌ی فازی D در سیستم کنترلی موازی فازی +P +I فازی D

$K_{d1}r(nT)$	$K_{d2}e(nT)$	$\Delta u_D(nT)$
n	n	oz
n	p	on
p	n	op
p	p	oz

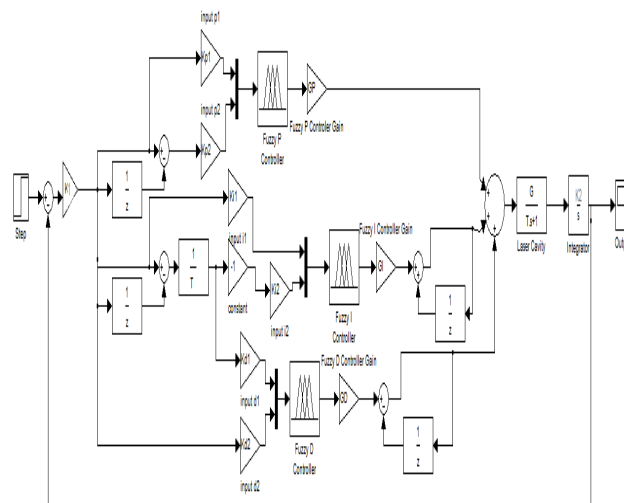


شکل ۸: پاسخ پله‌ی سیستم کنترلی با کنترل کننده‌ی موازی فازی +P فازی +I فازی D

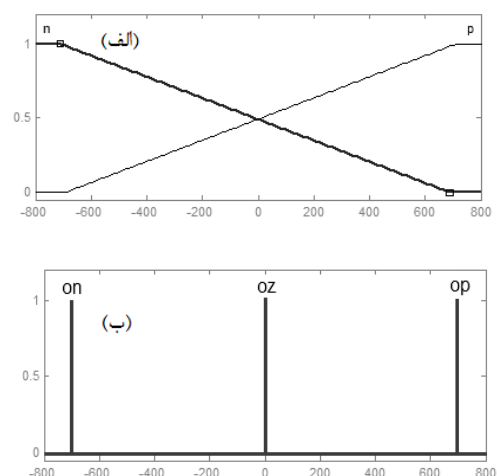


شکل ۹: نوسانات فرکانسی لیزر در سیستم کنترلی با کنترل کننده‌ی موازی فازی +P فازی +I فازی D

شده بر اساس روابط، عمل می‌کنند. قوانین فازی برای سه کنترل کننده‌ی فازی P، فازی I و فازی D به ترتیب در جدول-های ۱، ۲ و ۳ بیان شده‌اند که p مخفف عبارت positive، n مخفف عبارت negative و z مخفف عبارت zero است.



شکل ۶: بلوک دیاگرام کاواک لیزر گازی و پایدارساز آن با کنترل کننده‌ی موازی فازی +P فازی +I فازی D



شکل ۷: توابع عضویت کنترل کننده‌ی موازی فازی +P فازی +I فازی D؛ الف- توابع عضویت ورودی، ب- توابع عضویت خروجی

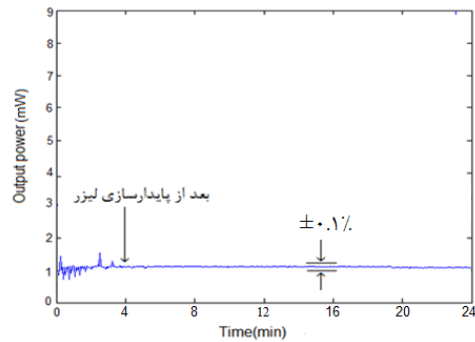
حال در نظر داریم پاسخ پله‌ی این سیستم را بررسی نماییم. پاسخ خروجی سیستم به ازای ورودی پله در شکل ۸ نشان داده شده است. در اینجا خطای IAE برابر با ۶/۵۵۷ است. شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب نوسانات فرکانسی و توان خروجی لیزر در قبل و بعد از اعمال سیستم پایدار شده فازی را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر با 10^{-11} و $\pm 0.1\%$ هستند. ناپایداری فرکانسی از نوسانات سیگنال خطا تخمین زده شده است که تقریباً برابر با ۵۰ کیلوهرتز است. شکل ۱۱، شیفت فازی بر حسب جابه‌جایی را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

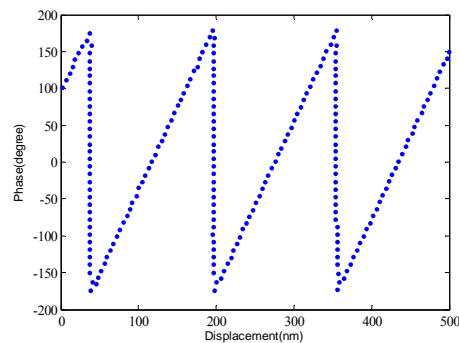
در این مقاله، طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده‌ی فرکانس و توان لیزر گازی هلیوم-نئون بر اساس منطق فازی با عملکرد بهینه و مطلوب با استفاده از نرم‌افزار قدرتمند MATLAB/SIMULINK انجام و نتایج به دست آمده بیان شده است. اساس طراحی این سیستم کنترلی فازی، روش ترکیبی تعادل توان و قفل فرکانسی است تا هر چه بیشتر بتوان پایداری سیستم کنترلی را بالا برد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با ساختار کنترلی موازی فازی P+I فازی +I فازی D ارائه شده می‌توان نوسانات فرکانسی و توان خروجی لیزر را به ترتیب به 10^{-11} و $\pm 0.1\%$ رساند. علاوه بر این، تفکیک‌پذیری اندازه‌گیری جابه‌جایی برابر با 0.06 نانومتر است. همچنین، میزان خطای IAE به $6/557$ کاهش یافته و عملکرد سیستم در مقایسه با اعمال سایر کنترل‌کننده‌های مرسوم بهبود یافته است.

مراجع

- [1] M. J. Beesley, *Lasers and Their Applications*, 1990.
- [2] J. Wilson and J. F. B. Hawkes, *Lasers Principles and Application*, 1995.
- [3] K. Levine, *Lasers*. American Scientist, pp. 14-31, 1963.
- [4] R. Balhorn, H. Kunzmann and F. Lebowsky, "Frequency Stabilization of Internal-Mirror Helium-Neon Lasers," *Appl. Opt.*, pp. 742-744, 1972.
- [5] S. J. Bennett, R. E. Ward and D. C. Wilson, "Frequency Stabilization of Internal Mirror He-Ne Lasers," *Appl. Opt.*, pp. 1406, 1973.
- [6] A. Franke, "Power Stabilization of a Helium-Neon Laser Using the Zeeman Effect," *Review of Scientific Instruments*, pp. 1515-1518, 1973.
- [7] H. S. Suh, T. H. Yoon, M. S. Chung, and O. S. Choi, "Frequency and Power Stabilization of a Three Longitudinal Mode He-Ne Laser using Secondary Beat Frequency," *American Institute of physics*, pp. 2027-2029, 1993.
- [8] S. Olyae and Sh. Mohammad Nejad, "Stabilization of laser frequency based on the combination of frequency locking and power balance methods," *Journal of Applied Sciences*, pp. 3965-3970, 2007.
- [9] S. Olyae and S.M. Nejad, "Design and Simulation of velocity and displacement measurement system with subnanometer uncertainty based on a new stabilized laser Doppler-interferometer," *Arabian J. Sci. Eng.*, pp. 89-99, 2007.
- [10] P. E. Ciddor and R. M. Duffy, "Two-mode frequency-stabilised He-Ne (633 nm) lasers: studies of short- and long-term stability," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, pp. 1223-1227, 1983.
- [11] P. Y. Chien and C. L. Pan, "A Thermal Phased-Locked Loop for Frequency Stabilization of Internal-Mirror He-Ne Lasers," *Rev. Sci. Instrum.*, pp. 933-935, 1991.

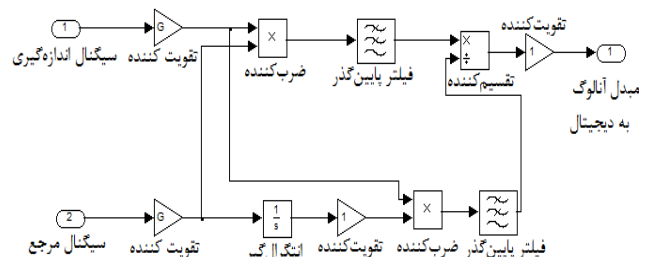


شکل ۱۰: نوسانات توان خروجی لیزر در سیستم کنترلی با کنترل‌کننده‌ی موازی فازی P+I فازی +I فازی D



شکل ۱۱: شیف فازی بر حسب جابه‌جایی

به منظور به دست آوردن تفکیک‌پذیری اندازه‌گیری جابه‌جایی، ابتدا شیف فازی را به دست می‌آوریم. بلوک دیاگرام مدار آشکارساز فاز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ابتدا سیگنال‌های مبنا و اندازه‌گیری تقویت می‌شوند. از سیگنال مرجع تقویت شده انتگرال گرفته می‌شود. سیگنال اندازه‌گیری یک بار با سیگنال مبنا و بار دیگر با انتگرال آن مخلوط می‌شود. فرکانس‌های مرتبه بالاتر با دو فیلتر پایین‌گذر حذف می‌شوند. سیگنال‌های خروجی آن‌ها به صورت $P=\sin(2\Phi)$ و $Q=\cos(2\Phi)$ هستند. در نهایت فاز $\Phi=0.5\tan^{-1}(P/Q)$ از طریق یک تقسیم‌کننده و مبدل آنالوگ به دیجیتال به مدار پردازشگر فرستاده می‌شود. تفکیک‌پذیری فاز به دست آمده تقریباً برابر با 0.05 درجه است، بنابراین تفکیک‌پذیری اندازه‌گیری جابه‌جایی حاصل شده برابر با 0.06 نانومتر است.



شکل ۱۲: بلوک دیاگرام مدار آشکارساز فاز