

ORIGINAL ARTICLE

Phase Fluctuation Reduction in Holographic Grating Recording Using Optical Feedback and a PID Controller

Mohsen Ruzbehani^{1*}, Naser Partovi Shabestari², Hamid Ghaemi Bafghi³

1 Assistant Professor, Photonic and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.

2 Lecturer, Photonic and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.

3 M.Sc., School of Physics, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

Correspondence

Mohsen Ruzbehani

Email: mruzbehani@yahoo.com

How to cite

Ruzbehani, M. Partovi Shabestari, N. Ghaemi Bafghi, H. (2026). Phase Fluctuation Reduction in Holographic Grating Recording Using Optical Feedback and a PID Controller, Optoelectronic, 8(2), 55-64.

ABSTRACT

Holographic diffraction gratings play a key role as dispersive optical elements in spectrometers, diode lasers, optical filters, and communication systems. This paper presents the design and development of an active stabilization system for maintaining the stability of interference fringes during the recording process of holographic gratings. In holographic setup, interference fringes are susceptible to displacement due to factors such as environmental vibrations, temperature fluctuations, air currents, and laser source instability. Some of these disturbances, for instance random vibrations, can only be effectively managed using active control methods. In this paper, an active feedback system based on a PID controller is employed to stabilize the interference fringes. The fringes detect using a CCD camera, and after software-based analysis, the displacement compensate by adjusting the path of one of the laser beams using a piezoelectric actuator attached to a mirror. The piezoelectric device control by applying an appropriate voltage. This method is capable of reducing environmental fluctuations to approximately $\lambda/24$ (for a wavelength of 442 nm), equivalent to about 18 nanometers.

KEYWORDS

Holographic Diffraction Grating, Interference Stabilization, PID Controller, Piezoelectric Mirror, Optical Feedback.

فصلنامه علمی
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

کاهش نوسانات فاز در ثبت توری‌های تمام‌نگاری با استفاده از بازخورد نوری و کنترل کننده PID

محسن روزبهانی^{۱*}، ناصر پرتوی شبستری^۲، حمید قائمی بافقی^۳

چکیده

توری‌های پراش هولوگرافیک به عنوان عناصر نوری پاشنده در طیف‌سنج‌ها، لیزرهای دیودی، فیلترهای نوری و سیستم‌های ارتباطی نقش کلیدی ایفا می‌کنند. در این مقاله، طراحی و توسعه یک سامانه پایدارساز فعال برای تثبیت نوارهای تداخلی در فرآیند ثبت توری‌های تمام‌نگاری معرفی می‌گردد. در چیدمان تمام‌نگاری، نوارهای تداخلی تحت تأثیر عواملی مانند ارتعاشات محیطی، تغییرات دما، جریان هوا و ناپایداری منبع لیزر دچار جابه‌جایی می‌شوند. برخی از این اختلالات، مانند ارتعاشات کاتوره‌ای، تنها با روش‌های فعال قابل کنترل هستند. در این مقاله، برای تثبیت نوارهای تداخلی از یک سامانه فیدبک فعال مبتنی بر کنترل کننده PID استفاده شده است. آشکارسازی نوارها توسط CCD انجام می‌شود و پس از تحلیل نرم‌افزاری، با تغییر مسیر یکی از باریکه‌های لیزر به کمک یک پیزوالکتریک متصل به آینه، جبران حرکت صورت می‌گیرد. پیزوالکتریک با اعمال ولتاژ مناسب کنترل می‌شود. این روش قادر است نوسانات محیطی را تا حدود $\lambda/24$ (برای طول موج ۴۴۲ نانومتر) معادل حدود ۱۸ نانومتر، کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی

توری پراش تمام‌نگاری، پایدارسازی تداخلی، کنترل کننده PID، آینه پیزوالکتریک، بازخورد نوری.

۱. استادیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

۲. مربی، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

نویسنده مسئول:

محسن روزبهانی

رایانامه: mruzbehani@yahoo.com

استناد به این مقاله:

محسن روزبهانی، ناصر پرتوی شبستری، حمید قائمی بافقی (۱۴۰۴). کاهش نوسانات فاز در ثبت توری‌های تمام‌نگاری با استفاده از بازخورد نوری و کنترل کننده PID. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، ۸(۲)، ۵۵-۶۴.

مقدمه

توری‌های پراش، به واسطه توانایی منحصربه‌فرد خود در تجزیه نور و تغییر فاز آن، به عنوان اجزای کلیدی در مدولاسیون باریکه نوری در حوزه‌های گوناگونی مانند مدولاسیون لیزر، تحلیل طیفی، آشکارسازی جابه‌جایی، زیست‌پزشکی، نمایشگرهای محاسباتی و بوم‌شناسی به کار می‌روند، آنها به عنوان ابزارهایی دقیق و پرکاربرد، در حوزه‌هایی چون فیزیک، نجوم، شیمی، زیست‌شناسی و متالورژی، برای اندازه‌گیری‌های حساس و تحلیل‌های نوری به کار می‌روند [۱].

این توری‌ها به عنوان اجزای اصلی در فناوری‌های دقیق پیشرفته‌ای همچون گداخت به روش محصورسازی لختی، طیف‌سنج‌های نجومی، دستگاه‌های لیتوگرافی پیشرفته، ماشین‌ابزارهای کنترل عددی کامپیوتری (CNC)، نمایشگرهای سب‌بعدی تمام‌نگاشتی و تجهیزات زیست‌پزشکی استفاده می‌شوند [۲].

از میان روش‌های متفاوت ساخت توری‌های پراش، روش تمام‌نگاری مزیت‌های عمده‌ای دارد. مزیت اصلی توری‌های تمام‌نگاری (هولوگرافیک) نسبت به روش‌های حکاکی ساخت توری این است که اگر به درستی ساخته شوند، کاملاً عاری از خطاهای کوچک تناوبی و خطاهای تصادفی در جای‌گذاری شیارها هستند؛ خطاهایی که حتی در بهترین توری‌های مکانیکی حکاکی‌شده نیز دیده می‌شوند.

مزیت مهم دیگر روش ثبت تمام‌نگاری، دست‌کم به لحاظ نظری، این است که نسبت به روش حکاکی سریع‌تر است. شیارها به صورت هم‌زمان در سراسر سطح شکل می‌گیرند و چون از الماس استفاده نمی‌شود، فرسایشی نیز در کار نیست؛ از این رو می‌توان انتظار داشت که پروفیل شیارها یکنواخت‌تر باشد [۳].

با پیشرفت فناوری و کوچک‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر شدن سامانه‌های آزمایشگاهی بزرگ و پرهزینه، کاربردهای مرتبط با تداخل‌سنجی تمام‌نگاری روزبه‌روز عملی‌تر و قابل‌دسترس‌تر می‌شوند. اصل تداخل‌سنجی تمام‌نگاری ساده است: دو باریکه نوری هم‌دوس، یکی باریکه سیگنال حاوی اطلاعات و دیگری باریکه مرجع، در یک ماده حساس به نور بر هم‌نهی می‌شوند.

تداخل این دو باریکه، الگویی از نوارهای تداخلی (یک باریکه نوری با شدت متغیر در فضا) ایجاد می‌کند. این الگوی شدت مدوله‌شده به صورت تغییر در خواص نوری ماده حساس به نور ثبت می‌شود و توری یا تمام‌نگاری را شکل می‌دهد.

این الگو می‌تواند جذب ماده را تغییر داده و توری دامنه‌ای ثبت کند، یا ضریب شکست محیط را مدوله کرده و توری فازی

تشکیل دهد، یا ترکیبی از هر دو فرایند باشد. هنگام تاباندن دوباره باریکه مرجع به توری ثبت‌شده، باریکه‌ای دقیقاً مشابه با باریکه سیگنال اولیه از توری پراش می‌یابد. نسبت شدت این باریکه پراش‌یافته به شدت باریکه مرجع خوانش، بازده پراش توری تمام‌نگاری نامیده می‌شود [۴].

هنگام نوردهی صفحه حساس به نور، جهت ساخت توری پراش تمام‌نگاشتی، عوامل مختلفی از قبیل ارتعاش، جریان هوا و جریان هوای ناشی از تغییرات دمایی محیط، اختلاف فاز بین باریکه‌های تداخل‌کننده را تغییر داده و باعث می‌شود نوارهای تداخلی به صورت کاتوره‌ای جابه‌جا شوند. بر اساس یک معیار تجربی برای اینکه توری حاصل از این نوردهی، بازدهی پراش بالایی داشته باشد، جابه‌جایی نوارهای تداخلی باید کمتر از $\lambda/8$ باشد. هر چه از این مقدار بالاتر برویم کیفیت توری به تدریج بدتر شده و در نهایت طرح تداخلی محو می‌شود. بنابراین حتماً لازم است جابه‌جایی نوارهای تداخلی کنترل و به کمتر از $\lambda/8$ محدود شود. اگر از لیزر هلیوم کادمیم با طول موج ۴۴۲ نانومتر استفاده نمائیم، طبق محاسبات بالا باید نوسانات محیطی باعث جابه‌جایی کمتر از ۵۵ نانومتر گردد.

پایدارسازی فعال با استفاده از آینه پیزوالکتریک و کنترل‌کننده‌های PID

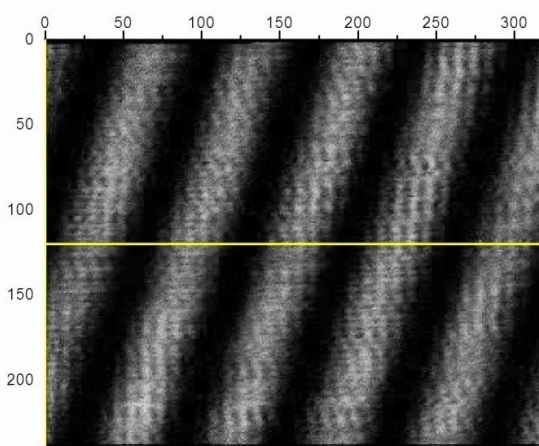
عملکرد پایه‌ای یک پایدارکننده فعال این است که هرگونه جابه‌جایی در الگوی تداخل را در طول یک جلسه ضبط تمام‌نگاری پایش کرده و آن جابه‌جایی را با جابه‌جا کردن یکی از پرتوهای ضبط جبران کند. بدیهی است که پایداری، متناسب با دقت اندازه‌گیری و صحت جبران‌سازی است؛ بنابراین حذف نویز زمینه یک عامل کلیدی برای پایدارسازی محسوب می‌شود.

در فرآیند ثبت تمام‌نگاری، پایداری نوارهای تداخلی نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت و دقت تصویر نهایی ایفا می‌کند. یکی از روش‌های مؤثر برای دستیابی به این پایداری، استفاده از پایدارساز فعال است که با رصد و جبران لحظه‌ای نوسانات فازی، الگوی تداخلی را در وضعیت پایدار نگه می‌دارد. اساس کار این سامانه بر تشخیص هرگونه جابه‌جایی در نوارهای تداخلی در حین ثبت تمام‌نگاری و اصلاح آن از طریق تغییر فاز یکی از باریکه‌های لیزر است [۴-۶].

در این مقاله، از یک آینه پیزوالکتریک (PZM) به عنوان عنصر تغییر فاز دقیق استفاده شده است. این آینه قابلیت جابه‌جایی محوری با دقت زیرمیکرونی و مدولاسیون فاز در فرکانس‌های بالا را داراست. الگوی تداخلی توسط تداخل‌سنج ماخ-زندر تولید و روی یک آشکارساز نوری با پوشش روزنه‌ای

HV در شکل نشان داده شده) تشکیل شده است. آینه‌ای که به مبدل پیزوالکتریک کوپل شده، در مسیر یکی از باریکه‌ها قرار دارد و امکان تغییر مسیر نوری برای جبران تغییرات فاز را فراهم می‌کند.

برای آشکارسازی نوارهای تداخلی، یک آینه نیمه‌شفاف در بالای صفحه تمام‌نگاری قرار گرفته تا بخشی از نوارها را به دوربین CCD بازتاب دهد. این نوارها با استفاده از یک عدسی واگرا گسترده شده و به CCD منتقل می‌شوند. اطلاعات شدت روشنایی از CCD دریافت شده و از طریق کارت DAQ شرکت دازل مدل DVC103 به رایانه منتقل می‌شود. نمونه‌ای از تصویر ثبت‌شده در شکل ۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، نوارهای تداخلی به‌وضوح در تصویر قابل مشاهده‌اند.



شکل ۲. تصویر طرح تداخلی ایجاد شده توسط دوربین CCD

برای محاسبه میزان جابه‌جایی این نوارها، لازم است نقطه‌ای به‌عنوان مرجع انتخاب شود تا بتوان تغییر موقعیت نوارها را نسبت به آن سنجید. این نقطه باید به‌گونه‌ای انتخاب گردد که در صورت جابه‌جایی زیاد نوارها نیز همچنان در محدوده دید دوربین باقی بماند. در غیر این صورت، با خروج نوار مرجع از میدان دید CCD، فرآیند پایش دچار اختلال خواهد شد.

در این پژوهش، به‌منظور انتخاب نقطه مرجع، ستون دهم از ششمین فریم تصویر انتخاب شده است. دلیل انتخاب فریم ششم این است که تصاویر اولیه معمولاً به‌دلیل ناپایداری اولیه سیستم کاملاً سیاه هستند و از فریم ششم به بعد کیفیت مناسبی دارند. همچنین، ستون‌های اولیه معمولاً دارای نویز بیشتر در لبه‌های تصویر هستند و ستون دهم انتخابی مناسب‌تر به‌شمار می‌رود.

پس از حذف نویز تصویر، اکستریم‌های (نقاط ماکزیمم و مینیمم) روشنایی در آن خط مشخص می‌شوند و دومین اکستریم به‌عنوان نقطه مرجع در نظر گرفته می‌شود. قابل توجه

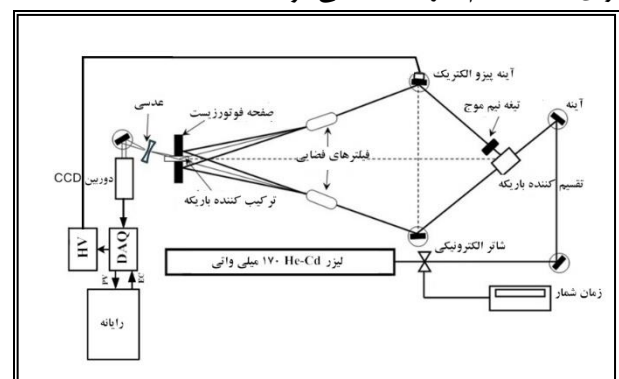
متمرکز شده است. خروجی آشکارساز به‌عنوان «متغیر فرآیند» (PV) با مقدار مرجع انتخاب‌شده (نقطه تنظیم) مقایسه شده و خطای حاصل به‌عنوان ورودی به حلقه کنترل اعمال می‌شود.

در این روش، سامانه کنترل از دو بخش تشکیل شده است [۴]: نخست، یک کنترل‌کننده PID که وظیفه جبران پویای اختلالات را برعهده دارد؛ دوم، خطای پردازش‌شده در نهایت به PZM منتقل شده تا با تغییر موقعیت آینه، تغییرات فازی در نوارهای تداخلی جبران گردد و حلقه کنترل بسته کامل شود.

مزیت مهم این سامانه، انعطاف‌پذیری بالای پیاده‌سازی نرم‌افزاری است در حالی که پیاده‌سازی سخت‌افزاری مشابه، پیچیده و پرهزینه خواهد بود.

شرح سامانه ثبت توری پراش تمام‌نگاشتی و تثبیت نوارهای تداخلی

چیدمان به کار رفته برای تثبیت نوارهای تداخلی در شکل ۱ نشان داده شده است [۷]. این سیستم دارای دو بخش است. بخش نخست بر پایه تداخل‌سنج ماخ‌زندر است و بخش دیگر برای تثبیت تمام‌نگار استفاده می‌شود.



شکل ۱. چیدمان به کار رفته برای تثبیت نوارهای تداخلی در سیستم

تولید توری‌های پراش به روش تمام‌نگاری

بخش نخست سامانه نوری، برای ثبت توری تمام‌نگاشتی طراحی شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، باریکه لیزر He-Cd به‌وسیله یک شکافنده باریکه به دو پرتو تقسیم می‌شود. این دو پرتو با زاویه‌ای مساوی از دو طرف به صفحه حساس به نور می‌تابند و با تداخل در آن، الگوی تداخلی مورد نظر را شکل می‌دهند. فاصله بین نوارهای تداخلی ایجادشده، از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta / 2)}$$

در این رابطه، d فاصله نوارهای تداخلی، λ طول موج نور و θ زاویه بین دو پرتو است.

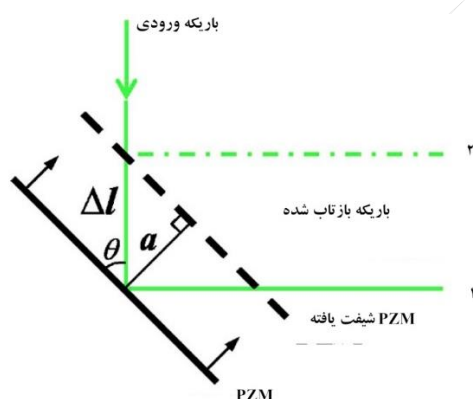
بخش دوم سامانه شامل مدار کنترل پایداری است. این بخش از اجزایی نظیر آینه نیمه‌شفاف، عدسی واگرا، دوربین CCD، رایانه، بردهای الکترونیکی و مبدل پیزوالکتریک (که با

پیزویی (PZM) در شکل ۳ نشان داده شده است. از طریق تحلیل هندسی در شکل ۳، تغییر در طول مسیر باریکه سیگنال، یعنی Δl ، برحسب جابه‌جایی PZM به اندازه a برابر است با $\Delta l = a / \sin(\theta)$ و برای $\theta = 45^\circ$ خواهیم داشت $\Delta l = \sqrt{2}a$. بنابراین شرط پایداری بصورت $|k\sqrt{2}a| = |\delta(t)|$ خواهد شد [۸، ۴]. در واقع این رابطه نسبت تغییرات لازم برای آینه جهت رفع اختلال را نشان می‌دهد. با توجه به این رابطه می‌توان پیزو مناسب که دارای دامنه حرکتی مطلوب باشد را در شرایط آزمایشگاه به‌دست آورد.

پردازش تصویر

در این سامانه از دوربین CCD با نرخ نمونه‌برداری ۲۵ فریم بر ثانیه استفاده شده است. اگرچه اندازه‌گیری مستقیم طیف ارتعاشات مکانیکی انجام نشد؛ اما فرکانس‌های غالب نویز مکانیکی در میزهای اپتیکی آزمایشگاهی که چیدمان ما نیز بر آن قرار داده شده است، معمولاً در محدوده ۰/۱ تا ۱۰ هرتز قرار دارند [۹]. بنابراین، نرخ نمونه‌برداری سیستم کنترل (۲۵ هرتز) دست‌کم دو تا سه برابر بیش از بیشینه فرکانس نوسانات محیطی است و شرط نایکوئیست به‌خوبی برقرار است. بدین ترتیب، پدیده تداخل فرکانسی (aliasing) در فرآیند نمونه‌برداری از داده‌های CCD رخ نمی‌دهد و دقت تشخیص جابه‌جایی نوارهای تداخلی حفظ می‌شود.

تصویر ثبت‌شده توسط دوربین CCD از طریق کارت مبدل تصویر به رایانه منتقل می‌شود. تصویر دریافتی در محیط نرم‌افزار MATLAB فراخوانی و پردازش می‌گردد.



شکل ۳. شماتیکی از جابه‌جایی آینه پیزو (PZM) و اثر آن بر باریکه سیگنال. در این جا Δl تغییر در طول مسیر پرتو است، a میزان جابه‌جایی آینه، θ زاویه بین باریکه و آینه PZM، (۱) باریکه بازتابی قبل از جابه‌جایی PZM را نشان می‌دهد و (۲) باریکه بازتابی پس از جابه‌جایی. پس از بارگذاری تصویر، نقطه مرجع در آن تعیین می‌شود و یک خط افقی از این نقطه در تصویر جدا می‌گردد. همان‌طور که در این شکل ۴ مشاهده می‌شود، نویزهای قابل‌توجهی در

است که نقاط ماکزیمم در نوارهای تیره و نقاط مینیمم در نوارهای روشن واقع می‌شوند.

پس از تعیین نقطه مرجع، رایانه با استفاده از نرم‌افزار متلب میزان جابه‌جایی نوارها را محاسبه کرده و سیگنال کنترلی مناسب را به مدار پیزوالکتریک ارسال می‌کند. با حرکت رفت و برگشتی مبدل پیزو، آینه متصل به آن نیز جابه‌جا شده و موجب تغییر در مسیر نوری باریکه و در نتیجه جبران اختلاف فاز می‌شود. بدین ترتیب، نوارهای تداخلی تثبیت می‌گردند.

نتیجه اختلال‌های خارجی در سامانه تمام‌نگاری، جابه‌جایی الگوی نوارهای تداخلی روی صفحه است. با توجه به رابطه تناسبی بین شدت I و میانگین‌گیری زمانی از E^2 ، معادله شدت به این صورت $I = A \langle E^2 \rangle$ نوشته می‌شود که در آن $\langle \rangle$ نشان‌دهنده میانگین‌گیری زمانی و A یک ثابت است. میدان‌های الکتریکی دو موج تداخل‌کننده E_1 و E_2 هر دو دارای فرکانس یکسان بوده و میدان کل به صورت $E = E_1 + E_2$ تعریف می‌شود. فرض می‌کنیم که این باریکه‌ها در صفحه (x, y) قرار دارند؛ در این صورت میدان الکتریکی هر یک از دو موج تداخل‌کننده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E_1(x, y, t) = A_1 \exp(j(\omega t + \phi_1(x, y) + \delta_1(t)))$$

$$E_2(x, y, t) = A_2 \exp(j(\omega t + \phi_1(x, y) + \delta_2(t) + k\Delta I(t)))$$

در اینجا، E_1 مربوط به باریکه مرجع و E_2 مربوط به باریکه سیگنال است که توسط آینه جابه‌جاگر پیزو (PZM) تنظیم می‌شود. همچنین، A_1 و A_2 دامنه‌های میدان، ω فرکانس زاویه‌ای و $\Delta\phi$ اختلاف فاز اولیه بین دو موج نوری تحت شرایط کاملاً پایدار هستند، به‌طوری‌که $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ و $\delta_i (i=1,2)$ بیانگر اختلال فاز است که ناشی از هرگونه تغییر در طول مسیر باریکه ۱ و ۲ است، k ثابت انتشار است و $\Delta l(t)$ تفاوت طول مسیر بین دو موج را در زمان t نشان می‌دهد.

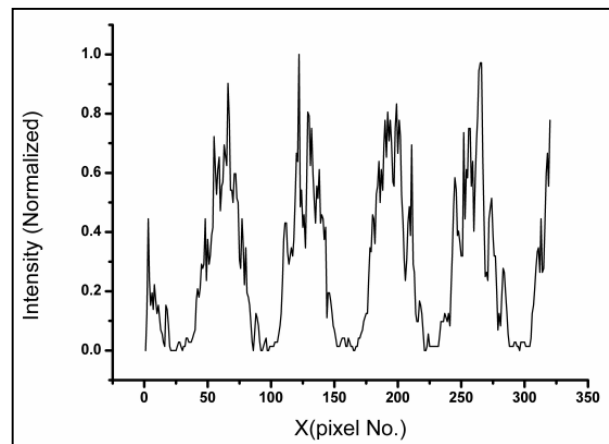
با فرض اینکه هر دو موج دارای قطبش خطی و به‌طور کامل همدوس باشند، الگوی تداخلی در صفحه تمام‌نگار به‌صورت زیر خواهد بود:

$$I(x, y, t) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\Delta\phi + \delta(t) + k\Delta I(t))$$

که در آن $\delta = \delta_1 - \delta_2$ بیانگر اغتشاش خالص فاز نسبی است.

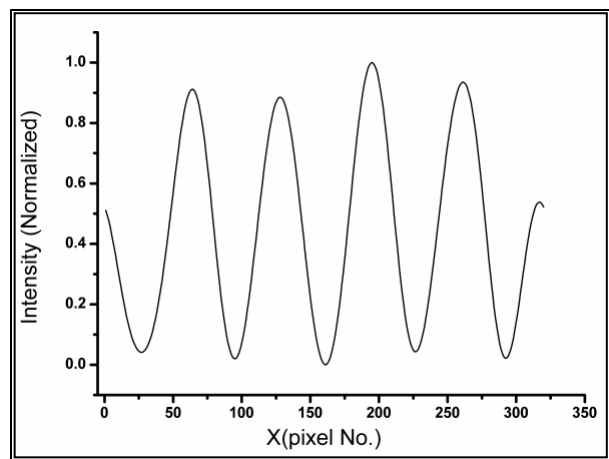
رابطه تفاوت طول مسیر نوری بر حسب جابه‌جایی آینه

تصویر وجود دارند که بر کیفیت تحلیل تأثیر گذارند.



شکل ۴. توزیع شدت در راستا خط افقی در شکل ۲.

برای حذف نویزها، ابتدا تبدیل فوریه خط مورد نظر محاسبه می‌شود. تحلیل تبدیل فوریه نشان می‌دهد که فرکانس فضایی نویزها به مراتب بالاتر از فرکانس الگوی اصلی تداخلی است. بنابراین با حذف مؤلفه‌های فرکانسی بالا که غالباً ناشی از نویز هستند و انجام تبدیل فوریه معکوس، نویزها از تصویر حذف شده و شکل جدیدی حاصل می‌شود که در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودار قابل مشاهده است، پس‌زمینه به‌طور قابل ملاحظه‌ای یکنواخت شده و الگوی تداخلی به‌وضوح قابل استخراج است.



شکل ۵. نمودار شکل ۴ پس از پالایش.

در روش به‌کاررفته، فیلتر فرکانسی تنها برای حذف مؤلفه‌های نویزی با فرکانس‌های فضایی بالا استفاده شده است که این مؤلفه‌ها معمولاً ناشی از نویز CCD و نوسان‌های نوری موضعی هستند. از آنجا که مؤلفه‌های فرکانسی اصلی الگوی تداخلی در بازه بسیار پایین‌تری از طیف فضایی قرار دارند، حذف فرکانس‌های بالا تأثیری بر فاز مؤلفه‌های اصلی نوارهای

تداخلی ندارد و عملاً تأخیر فاز قابل ملاحظه‌ای در سیگنال خط ایجاد نمی‌کند.

شکل‌های ۴ و ۵ این موضوع را به‌خوبی نشان می‌دهند: در شکل ۴، نویزهای فرکانسی بالا باعث نوسانات سریع و بی‌قاعده در دامنه شدت نور شده‌اند؛ در حالی که در شکل ۵ پس از اعمال فیلتر، منحنی شدت به یک تابع سینوسی نرم و پایدار تبدیل شده است، بدون آن‌که جابه‌جایی فازی در موقعیت قله‌های اصلی مشاهده شود. این شباهت در موقعیت نسبی قله‌ها نشان می‌دهد که عملیات فیلترینگ، صرفاً به افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR) انجامیده و تغییری در فاز مؤلفه اصلی ایجاد نکرده است.

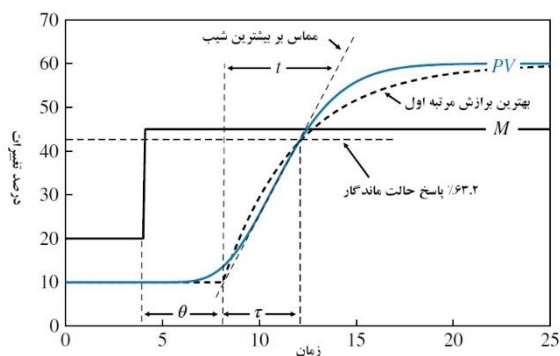
به‌علاوه، سایر تأخیرهای زمانی سیستم - شامل زمان پاسخ CCD، تأخیر کارت DAQ و زمان پاسخ مکانیکی پیرو - در مجموع در حد چند ده میلی‌ثانیه بوده و فرکانس غالب آن‌ها بسیار کمتر از محدوده فرکانس‌های کنترلی سیستم است. بنابراین مجموع این تأخیرها تأثیر محسوسی بر حاشیه فاز و بهره حلقه بسته ندارد.

کلیه محاسبات بعدی بر پایه این نمودار اصلاح‌شده انجام می‌شود. برای تعیین میزان جابه‌جایی نوارهای تداخلی، نقطه ماکزیمم این نمودار با نقطه متناظر در تصویر بعدی که از CCD دریافت می‌شود، مقایسه می‌گردد. از آن‌جا که فاصله بین دو نقطه ماکزیمم متوالی در الگوی تداخلی معادل ۱۸۰ درجه فاز است، می‌توان با استفاده از میزان جابه‌جایی نوار بین دو تصویر، مقدار جابه‌جایی فازی بین آن‌ها را نیز محاسبه نمود.

جبران‌سازی

با تعیین موقعیت پیکسل‌هایی که اولین نقطه بیشینه شدت نور را نشان می‌دهند، می‌توان جابه‌جایی آن‌ها را در طول زمان ردیابی کرد. هنگام حرکت نوارهای تداخلی، موقعیت این نقاط بیشینه نیز به همان میزان جابه‌جا می‌شود. از آن‌جا که میزان حرکت ایجادشده توسط عملگر پیروالکتریک (پیرو) به دامنه ولتاژ اعمال‌شده وابسته است، افزایش ولتاژ موجب افزایش میزان جابه‌جایی و کاهش آن باعث کاهش حرکت خواهد شد.

با این حال، باید توجه داشت که رابطه میان ولتاژ و جابه‌جایی در پیرو خطی نیست و ویژگی‌هایی مشابه حلقه هیستریزیس دارد؛ به‌عبارتی پیرو نسبت به تاریخچه تحریک ولتاژی خود حساس است. زمانی که مقدار جابه‌جایی به‌درستی با داده‌های مرجع کالیبره شد، رایانه ولتاژ مناسب را به‌عنوان سیگنال بازخورد برای کنترل حرکت پیرو اعمال می‌کند. لازم به ذکر است در این تحقیق روشی برای کاهش هیستریزیس پیرو به کار گرفته شده است که بعداً توضیح داده خواهد شد. با توجه به اینکه رفتار هیستریزیسی پیرو، همراه با



شکل ۶. روش تندترین شیب زیگلر - نیکولز

در این پژوهش، برای طراحی اولیه کنترل کننده، سیستم به صورت مدل خطی مرتبه اول با تأخیر (FOPTD) تقریب زده شده است. دلیل این انتخاب، سادگی پیاده سازی، قابلیت تحلیل پایدارکننده و توانایی تنظیم پارامترها با روش های استاندارد (مانند زیگلر-نیکولز و کوهن-کن) بوده است [۱۰]. هرچند عملکرد پیزوالکتریک ذاتاً رفتار غیرخطی هیستریزیسی دارد؛ ولی در دامنه های ولتاژی استفاده شده در این پژوهش، پاسخ آن تقریباً خطی است. لازم به ذکر است در پیاده سازی حاضر از اکچویاتور پیزویی که پیشتر در این آزمایشگاه ساخته شده، استفاده شده است. در این اکچویاتور از ۱۴ المان پیزوالکتریک از شرکت سرامتک (ceramtech) مدل Sonox P4 که به صورت سری قرار گرفته اند، استفاده شده است. این آرایش باعث می شود که برای جبران تغییر فازهای کوچک (که در کار ثبت تمام نگار مورد نیاز است)، ولتاژ مؤثر تحمیلی به هر پیزو نسبت به حالتی که تنها یک المان به کار رود به طور محسوس کمتر باشد؛ به عبارت دیگر برای یک جابه جایی مورد نیاز مشخص، با توجه به اینکه میزان جابه جایی پیزوها با هم جمع می شود به جابه جایی کوچک تری برای هر المان نیاز است. در نتیجه ولتاژ هر المان (در تقریب خطی) حدود یک چهاردهم ولتاژ مورد نیاز یک المان منفرد خواهد بود. از آنجا که هیستریزیس پیزوالکتریک وابسته به دامنه ولتاژ و کرنش است، عملکرد هر المان در دامنه ولتاژ پایین تر موجب کاهش مؤثر هیستریزیس در حلقه بسته می گردد. در نتیجه، اثرات هیستریزیس و پدیده هایی مانند limit cycle در محدوده عملکرد سیستم مشاهده نشدند.

یکی از کنترل کننده های پر کاربرد کنترل کننده PID است که از سه جزء تناسبی، مشتقی و انتگرالی ساخته شده است. مزیت کنترل کننده PID در آن است که می تواند با مسائل عملی مهمی مانند اشباع عملکرد و بادکردگی انتگرال گیر (Integrator Windup) مقابله کند. این کنترل کننده رایج ترین ابزار کنترلی در صنعت فرآیند برای کنترل دما، جریان، فشار،

تأخیرهایی نظیر تأخیر در پردازش داده ها، تأخیر در اخذ تصویر توسط دوربین CCD، تأخیر انتقال تصویر به رایانه و نیز تأخیر ناشی از پاسخ زمانی پیزو و مدار راه انداز آن، می توانند موجب اختلال در پایداری و دقت سیستم شوند، به کارگیری یک یا چند جبران ساز برای اصلاح این تأخیرها ضروری است.

تاکنون بیش از ۴۰۰ روش مختلف برای تنظیم جبران سازها معرفی شده اند. عوامل کلیدی که روش های مختلف تنظیم را از یکدیگر متمایز می سازند عبارت اند از: نوع الگوریتم پردازش؛ پارامترهای قابل تنظیم؛ اطلاعات مورد نیاز برای پردازش و نوع کنترل کننده مورد استفاده.

شناسایی سیستم

قبل از آنکه بتوانیم کنترل کننده مطلوب را برای یک سیستم مورد نظر طراحی کنیم، لازم است آن سیستم را شناسایی نماییم. به این معنی که تابع تبدیل آن را به دست آوریم. فرایندهای واقعی دارای تابع تبدیل از درجه بالا با تأخیر هستند. بدیهی است با پیچیده بودن سیستم کار به دست آوردن پارامترهای بهینه کنترل کننده نیز دشوار خواهد شد. در بسیاری از موارد این امکان وجود دارد که سیستم با یک تابع تبدیل درجه اول با تأخیر تخمین زده شده و بر اساس پارامترهای به دست آمده، ضرایب کنترل کننده تعیین گردند. یکی از روش های تخمین روش زیگلر - نیکولز (Ziegler-Nichols) است. این روش در شکل ۶ نمایش داده شده است [۱۰]. منظور از شناسایی سیستم به دست آوردن پارامترهایی است که بتوان توسط آنها پاسخ فرکانسی سیستم را با یک سیستم مرتبه اول با تأخیر مدل سازی نمود. همان گونه که در شکل مشخص است تأخیر سیستم (θ) فاصله زمانی اعمال ورودی پله تا نقطه ای است که مماس بر بیشترین شیب با محور افقی دارد. ثابت زمانی سیستم (τ) از نقطه برخورد خط با بیشترین شیب تا جایی است که پاسخ به ۶۳٪ پاسخ ماندگار می رسد. پاسخ فرکانسی سیستم در این حالت به صورت زیر تعریف می شود [۱۱].

$$G(s) = \frac{k_p (e^{-\theta s})}{\tau s + 1}$$

که در آن k_p در واقع بهره فرایند است و به صورت زیر تعریف می شود.

$$k_p = \frac{\Delta p_v}{\Delta M_v}$$

که در آن Δp_v تغییرات فرایند (خروجی) و ΔM_v تغییرات متغیر کنترلی است.

$$k_c = \frac{1}{k_p} \frac{\tau}{\theta} 0.9 + 0.083 \frac{\theta}{\tau}$$

$$T_i = \theta \frac{0.9 + 0.083 \frac{\theta}{\tau}}{0.27 + 0.6 \frac{\theta}{\tau}}$$

با قرار دادن ضرایب پاسخ پله در رابطه‌های بالا ضرایب اولیه تنظیم به‌دست می‌آید. $K_c = 0.6$ و $T_i = 0.563$. پس از آن با سعی و خطا و تغییر پارامترها، مقادیر بهینه در عمل به‌دست خواهند آمد. واضح است که پاسخ به‌دست آمده از این روش وقتی بهینه خواهد بود که سیستم واقعاً یک سیستم درجه اول با تأخیر باشد. بر حسب میزانی که سیستم عملی از این واقعیت دور است، می‌بایست مقادیر پارامترها را به منظور به‌دست آوردن مقادیر بهینه تغییر داد.

مدار راه‌انداز پی‌زو

پس از پردازش داده‌ها و تعیین میزان انحراف نوارهای تداخلی، ولتاژ مورد نیاز برای تحریک آینهٔ پی‌زوالکتریک محاسبه می‌شود. برای اعمال این ولتاژ، لازم است اطلاعات پردازش‌شده از رایانه به برد راه‌انداز پی‌زو منتقل گردد. برد راه‌انداز، ولتاژ ورودی در بازهٔ ۰ تا ۵ ولت را به ولتاژی در محدودهٔ ۶۷- تا ۱۱۰+ ولت تبدیل می‌کند. از آنجا که خروجی رایانه صرفاً یک عدد دیجیتال نمایانگر ولتاژ مطلوب است، یک برد واسط وظیفهٔ تبدیل این مقدار عددی به ولتاژ آنالوگ متناسب را بر عهده دارد. این برد، عدد دیجیتال دریافتی را دریافت کرده و ولتاژی بین ۰ تا ۵ ولت تولید می‌کند که به ورودی برد راه‌انداز پی‌زو اعمال می‌شود. در این سامانه از یک ریزپردازندهٔ AVR ATMEGA32 به‌همراه مبدل USB به سریال FT232 برای ارتباط با رایانه استفاده شده است.

تقویت‌کنندهٔ نشان‌داده‌شده در شکل ۷ قادر است باری با مقاومت ۲۰۰ اهم را با سرعت مناسب تا ولتاژ $100 \pm$ ولت (معادل ۷۰- تا ۱۳۰ ولت) تغذیه نماید. با توجه به جریان در حد میلی‌آمپر مورد نیاز توسط پی‌زوالکتریک، این مدار به‌خوبی توانایی راه‌اندازی آن را دارد. در این مدار، بهرهٔ ولتاژ اصلی از مرحلهٔ مکمل بیس-مشارک Q1 و Q2 حاصل می‌شود. ترانزیستورهای Q3 و Q4 نیز بهرهٔ اضافی را برای مرحلهٔ خروجی امیتر-فالتور مکمل (Q7 و Q8) فراهم می‌کنند. وظیفهٔ بایاس‌دهی نیز بر عهدهٔ ترانزیستورهای Q5 و Q6 است و به‌منظور کاهش اعوجاج عبور از صفر، از دیودهایی در مسیر کلکتور Q5 استفاده شده است [۱۶].

برای ایجاد ولتاژ خروجی $100 \pm$ ولت، تقویت‌کنندهٔ A1 باید قادر باشد که سیگنال ورودی $10 \pm$ ولت را با حداقل بهرهٔ ۱۰

نیرو، موقعیت، سرعت، غلظت و pH محسوب می‌شود. در واقع، بر اساس یک نظرسنجی اخیر که در مجلهٔ *IEEE Control Systems منتشر شده است [۱۲] روشن است که کنترل‌کننده‌های PID از نظر تأثیر صنعتی، در مقایسه با فناوری‌های کنترلی دیگر مانند کنترل پیش‌بین مدل‌منا (MPC)، کنترل غیرخطی، تطبیقی، مقاوم، ترکیبی، غیرمتمرکز، گسسته و هوشمند، در میان گزینه‌های برتر قرار دارند [۱۳]. شکل زمانی کنترل‌کننده PID به‌صورت زیر است.

$$u(t) = K_c e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t^*) dt^* + \tau_D \frac{de(t)}{dt}$$

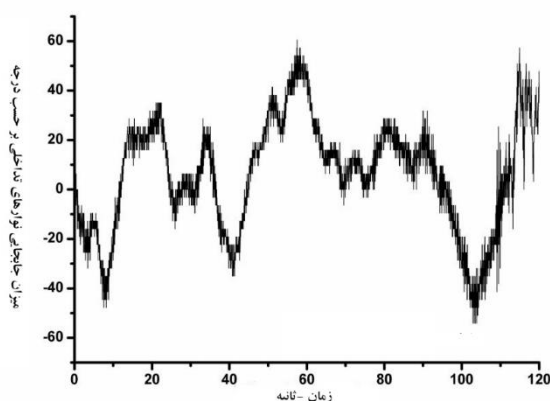
که در آن $e(t)$ سیگنال ورودی کنترل‌کننده که درواقع سیگنال خطاست، $u(t)$ خروجی کنترل‌کننده، τ_I و τ_D به ترتیب ضرایب انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر هستند. محاسبه پارامترهای کنترل‌کننده بستگی به پاسخ فرکانسی سیستم که در شکل ۶ نشان داده شد، دارد. تنظیم اولیهٔ ضرایب PID را با استفاده از روش کوهن کن تعیین نمودیم [۱۴] تکنیک تنظیم کوهن-کن (Cohen-Coon) برای کنترل‌کنندهٔ PID، توسعه روش زیگلر-نیکولز (Ziegler-Nichols) است. روش زیگلر-نیکولز معمولاً پاسخی کند در حالت ماندگار از خود نشان می‌دهد؛ اما روش کوهن کن می‌تواند این محدودیت را برطرف کند. این روش از پارامترهای PID به‌دست‌آمده از آزمایش تابع انتقال حلقه باز استفاده می‌کند و در شرایطی که تأخیر فرایند نسبت به ثابت زمانی حلقه باز زیاد باشد، نتایجی بهتر از روش زیگلر - نیکولز ارائه می‌دهد [۱۵].

در این تحقیق در مراحل اولیهٔ طراحی، هر سه جزء PID (تناسبی، انتگرالی و مشتقی) بررسی شدند. با این حال، با توجه به ماهیت نسبتاً کند سیستم نوری-مکانیکی و حضور نویزهای با دامنهٔ بالا در داده‌های CCD، جزء مشتقی موجب تشدید نوسانات و افزایش بالازنی (overshoot) شد. از این‌رو، برای بهبود پایداری و کاهش حساسیت به نویز، کنترل‌کنندهٔ PI جایگزین PID شد [۴]. تحلیل پاسخ حلقهٔ باز با استفاده از مدل خطی مرتبه اول با تأخیر نشان داد که افزودن جزء D تنها حاشیهٔ فاز را به‌طور جزئی افزایش می‌دهد ولی در عوض، نویز خروجی را تقویت می‌کند [۱۰، ۱۳، ۱۵]. بنابراین انتخاب کنترل‌کنندهٔ PI نتیجهٔ یک بهینه‌سازی تجربی میان پایداری، سرعت پاسخ و مقاومت در برابر نویز بوده است.

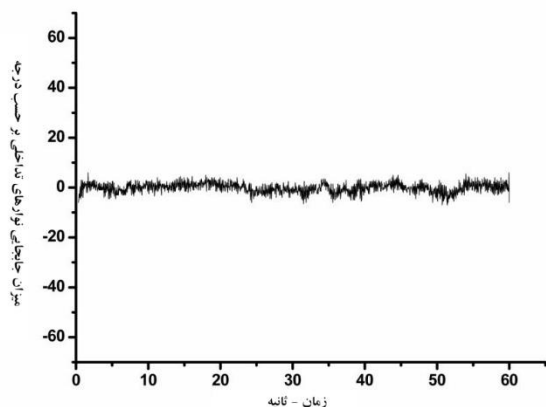
پارامترهای اولیه بر اساس روش کوهن کن به صورت زیر خواهند بود [۹].

نتیجه‌گیری و بحث

همان گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، ابتدا بدون وارد کردن تثبیت‌گر فعال و انجام تثبیت با استفاده از اعمال روش‌های غیر فعال (مانند روش‌های حذف ارتعاشات مکانیکی و مانند آن)، انحراف نوارهای تداخلی و میزان جابه‌جایی فاز نوارهای تداخلی در این شکل بین ۶۰- درجه تا ۶۰+ درجه است که معادل $\lambda/3$ است. در ادامه همان گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با وارد کردن جبران‌ساز با ضرایب بهینه به مجموعه توانستیم مقدار انحراف و جابه‌جایی نوارهای تداخلی را به مقدار مطلوب $\lambda/24$ کاهش دهیم. در نتیجه به میزان تثبیت مورد نظر رسیدیم.



شکل ۸. میزان جابه‌جایی نوارهای تداخلی در حالتی که تثبیت‌گر اعمال نشده است.



شکل ۹. میزان جابه‌جایی نوارهای تداخلی پس از اعمال تثبیت‌گر با کنترل‌کننده PI.

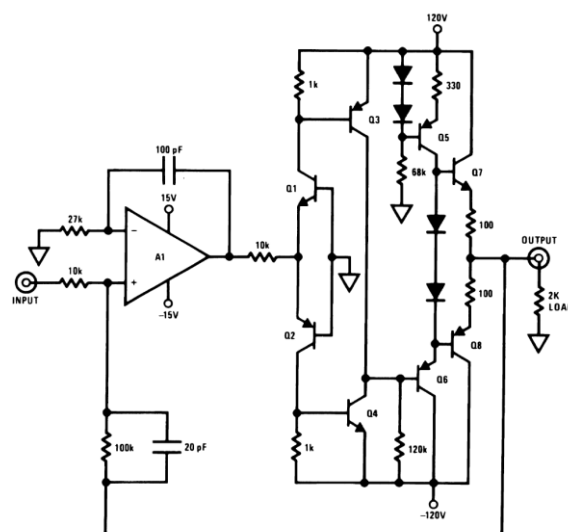
در این مقاله، یک سامانه بازخوردی فعال برای پایدارسازی نوارهای تداخلی در فرآیند ثبت توری‌های تمام‌نگاری ارائه و پیاده‌سازی شد. با استفاده از یک کنترل‌کننده PI، تغییرات ناشی از نویزهای محیطی شناسایی و به‌صورت بلادرنگ اصلاح شدند. تحلیل پاسخ شدت نور ثبت‌شده توسط دوربین CCD نشان داد که این سامانه قادر است نوسانات فازی را که در حالت بدون کنترل باعث جابه‌جایی نوارهایی با دامنه‌ای در

تقویت نماید. برای تحقق این بهره، از مقادیر مقاومت بازخورد 10 k تا 100 k استفاده شده و یک خازن 20 pF پیکوفاراد نیز برای ایجاد افت بهره در فرکانس بالا^۱ در مسیر بازخورد قرار گرفته است.

از آنجا که این تقویت‌کننده دارای یک مرحله معکوس‌کننده (Q3 و Q4) است، بازخورد کلی به ورودی مثبت A1 بازگردانده می‌شود، در حالی که بازخورد محلی AC به ورودی منفی A1 اعمال می‌گردد تا پایداری دینامیکی مدار تضمین شود.

با مراجعه به مرجع [۱۶]، مشاهده می‌شود که میزان زمان صعود و نزول پالس در این درایور در تقویت پالس مربعی با دامنه ۲۰۰ ولت و فرکانس ۳۰ kHz کمتر از ۵ میکروثانیه است. از آنجا که تغییرات ولتاژ کنترلی در این سامانه عمدتاً در محدوده فرکانسی زیر ۱۰۰ هرتز انجام می‌گیرد، محدودیت‌های مذکور تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ دینامیکی کل سیستم ندارند. شبیه‌سازی و اندازه‌گیری پاسخ سیستم نشان داده است که در محدوده کاری حلقه بسته، تأخیر ناشی از مرحله تقویت‌کننده بسیار کوچک‌تر از ثابت زمانی کل سیستم است و عملکرد کنترل‌کننده PI را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. بدین ترتیب، بهره‌برداری از این درایور برای تحریک پی‌زو تا ± 100 ولت، از نظر پهنای باند و پایداری، مناسب ارزیابی می‌شود.

ولتاژ ورودی این درایور توسط رایانه تأمین می‌شود. در این فرآیند، یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی (PI controller) که در محیط نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده، ابتدا سیگنال خطای ورودی را دریافت کرده و سپس ولتاژ خروجی مطلوب را تولید می‌نماید.



شکل ۷. مدار درایور پی‌زو متشکل از یک تقویت کننده عملیاتی و چند طبقه تقویت کننده ترانزیستوری. A1=LF357 و PNP=2N5415 و NPN=2N3440.

حدود $\lambda/2$ می‌شدند، تا حد حدود $\lambda/24$ (حدود ۱۸ نانومتر برای $\lambda=442$ نانومتر) کاهش دهد.

مزیت اصلی این روش، سادگی پیاده‌سازی، هزینه پایین و توانایی آن در جبران نوسانات سریع محیطی در زمان واقعی است، بدون آنکه نیاز به ایجاد تغییرات عمده در مسیر نور یا طراحی تداخل‌سنج باشد. همچنین، انتخاب هوشمند نقطه مرجع در میدان دید CCD و استفاده از مشتق‌گیری عددی برای آشکارسازی شیب نوسان‌ها، حساسیت سامانه را افزایش داده

است.

این سامانه قابلیت تعمیم به سایر کاربردهای حساس به فاز، از جمله تداخل‌سنجی‌های دقیق، آشکارسازی تغییرات مکانیکی یا حرارتی و سامانه‌های تمام‌نگاری با زمان نوردهی بلندمدت را نیز داراست. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که استفاده از این روش می‌تواند نقش مؤثری در افزایش کیفیت و یکنواختی توری‌های تمام‌نگاری ایفا کند.

منابع

References

- [1] Loewen, E. G., & Popov, E. (2018). *Diffraction gratings and applications*. CRC Press. Pp 57-69.
- [2] Li, W., Wang, X., Bayanheshig, Liu, Z., Wang, W., Jiang, S., ... & Zhou, W. (2025). Controlling the wavefront aberration of a large-aperture and high-precision holographic diffraction grating. *Light: Science & Applications*, 14(1), 112. <https://doi.org/10.1038/s41377-025-01785-2>
- [3] Palmer, C., & Loewen, E. G. (2005). *Diffraction grating handbook*. Pp 50-62.
- [4] Cadena, G., Momtahan, O., & Adibi, A. (2007). Simple and efficient software-based stabilized holographic recording system. *Optical Engineering*, 45(12), 125801–125801. <https://doi.org/10.1117/1.2403089>
- [5] Garcia, P. M., Buse, K., Kip, D., & Frejlich, J. (1995). Self-stabilized holographic recording in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ crystals. *Optics Communications*, 117(3-4), 235–240. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(95\)00157-4](https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00157-4)
- [6] de Oliveira, I., Frejlich, J., Arizmendi, L., & Carrascosa, M. (2004). Self-stabilized holographic recording in reduced and oxidized lithium niobate crystals. *Optics Communications*, 229(1-6), 371–380. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2003.10.027>
- [7] Shabestari Naser, P., Ghaemi Bafghi, H., Alidokht, A. I., Ruzbehani, M., & Zolbanin, H. M. (2013). Design and fabrication of stabilizing interference fringe system for holographic grating fabrication. *Proceedings of the Annual Physics Conference of Iran*, Birjand University, 26–29 August. (in Persian)
- [8] Toker, G. R. (2017). *Holographic interferometry: A Mach–Zehnder approach*. CRC Press. pp 23-43.
- [9] Bass, M. (Ed.). (2023). *Handbook of Optics* (5th ed., Vol. I). McGraw-Hill Education. <https://doi.org/10.1036/0071498896> (Chapter 44: Optical Laboratory Techniques, Section "Vibration Isolation and Optical Tables").
- [10] King, M. (2016). *Process control: A practical approach*. John Wiley & Sons. pp 3-109.
- [11] Sung, S. W., Lee, J., & Lee, I. B. (2009). *Process identification and PID control*. John Wiley & Sons. pp 79-107.
- [12] Samad, T. (2017). A survey on industry impact and challenges thereof [technical activities]. *IEEE Control Systems Magazine*, 37(1), 17–18. <https://doi.org/10.1109/MCS.2016.2621438>
- [13] Bingi, K., et al. (2020). *Fractional-order systems and PID controllers* (Vol. 264). Springer International Publishing. pp 9-12.
- [14] Isdaryani, F., Feriyonika, F., & Ferdiansyah, R. (2020). Comparison of Ziegler-Nichols and Cohen Coon tuning method for magnetic levitation control system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1450(1). doi:10.1088/1742-6596/1450/1/012033
- [15] Sen, R., Pati, C., Dutta, S., & Sen, R. (2015). Comparison between three tuning methods of PID control for high precision positioning stage. *Mapan*, 30(1), 65–70. <https://doi.org/10.1007/s12647-014-0123-z>
- [16] National Semiconductor Corporation. (2003). *Linear Applications Handbook: AN-272 Op Amp Booster Designs*. National Semiconductor. pp 2-141 – 2-150..