بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

طراحی و ساخت مدار کنترل تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر جهت استفاده در سامانه‌های اپتیک تطبیقی

سعید یزدانی کاهکشی، حسین ثقفی‌فر، حمیدرضا مردانیان دهکردی و سید ایوب موسوی

پژوهشکده اپتیک و لیزر- دانشگاه صنعتی مالک اشتر شاهین‌شهر

saeedyazdani۰۰۲@gmail.com, saghafifar۱@yahoo.com, dehkordih@yahoo.com, ayoobm۶۳@gmail.com

در این مقاله برای اصلاح جبهه موج پرتو لیزر عبوری از کانال ارتباطی فضای آزاد، مدار سامانه کنترل‌کننده‌ای که با حداکثر بسامد ۱۵۰ هرتز توسط یک آینه تیپ-تیلت به اصلاح ابیراهی‌های تیپ تیلت جبهه موج لیزر در انتشار در جو آشفته می‌پردازد طراحی و ساخته شده است. در این سامانه، خطای جبهه موج توسط حسگر کوادرانت اندازه‌گیری می شود و به‌عنوان ورودی، به مدار مبدل آنالوگ به دیجیتال کنترل‌کننده وارد شده و الگوریتم PID توسط ریزپردازنده فرمان‌ها لازم را پس از تبدیل به آنالوگ به راه‌انداز آینه ارسال می‌کند. کارایی سامانه کنترلی در شرایط آزمایشگاهی و فضای آزاد بررسی و با موفقیت انجام شد.

کلیدواژه- آینه تیپ تیلت، اپتیک تطبیقی، کنترل‌کننده PID، همیوغ فازی

Design and construction of proportional-integral-derivative (PID) control circuit for using in adaptive optics system

Saeed Yazdani Kahkeshi, Hossein Saghafifar, Hamidreza Mardanian Dehkordi, Seyed Ayoob Moosavi

Optics and Laser Research center Malek Ashtar University of Technology, Shahinshahr Iran

saeedyazdani۰۰۲@gmail.com, saghafifar۱@yahoo.com, dehkordih@yahoo.com, ayoobm۶۳@gmail.com

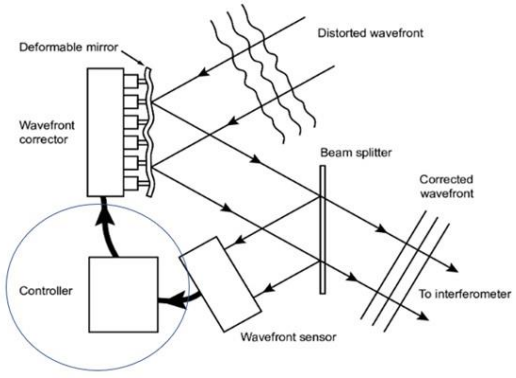
In this paper, In order to correct the laser wavefront propagated through the free space communication channel, the circuit of a control system with a maximum frequency of ۱۵۰ Hz is designed and fabricated to correct the tip-tilt aberrations of the laser wavefront in turbulence with a tip-tilt mirror. Measured wavefront error by a quadrant sensor enters the analog-to-digital converter circuit and the PID algorithm after converting it to analog sends the calculated commands to the mirror driver. The performance of the control system in laboratory and free space environment is successfully evaluated.

Keywords: adaptive optics, complex conjugate, PID controller, tip tilt mirror

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

امروزه مخابرات نوری به دلیل توانایی بالقوه‌ای که در ارسال و دریافت حجم عظیم اطلاعات دارد بسیار مورد توجه قرار گرفته است؛ در یک نگاه ساده و ایده آل نور عبوری از درون یک مسیر نوری باز در نبود آشفتگی‌های جوی کاملاً تخت و یکنواخت است اما درعمل آشفتگی‌های مختلف موجود در مسیر نوری به‌طور کاتوره‌ای این جبهه موج را تحت تأثیر قرار می‌دهد و ناراستی‌های مختلفی را بر روی جبهه موج ایجاد می‌کنند(شکل۱).[۱] هم‌چنین افت و خیزهای تصادفی ضریب شکست جو باعث جابه جایی لکه لیزری در راستای محورهای مختصات بصورت تصادفی می شود. بدیهی است که جابه‌جایی صورت پذیرفته باعث دریافت نشدن همه یا بخشی از سیگنال ارسالی می‌گردد. برای اصلاح این ناراستی‌ها و جابه‌جایی‌های ناخواسته، سامانه‌های اپتیک تطبیقی وارد عمل شده و با به کاربردن همیوغ فازی، فاز را اصلاح و به شکل تخت خود نزدیک می‌کند اما لازمه‌ی این اصلاح فاز وجود آینه‌های تغییر شکل‌پذیر و مدار الکترونیکی کنترل کننده‌ای است که بتواند به‌طور آنی به این تغییرات پاسخ دهد. مدار کنترل‌کننده PID، یکی از مدارهای کنترل استاندارد است که برای این منظور استفاده می‌شود. در این مقاله با به‌کاربردن الگوریتم مناسب و مدارهای مختلف بهینه یک سامانه کنترل‌کننده برای کنترل آینه‌های تغییر شکل پذیر طراحی و ساخته شد.[۲]



شکل ۱: طرحواره یک سامانه نوری تطبیقی[۱]

مبانی نظری

همان‌طور که بیان شد یکی از دقیق‌ترین، پایدارترین و رایج‌ترین کنترل‌کننده‌ها در صنعت کنترل‌کننده Proportional Integral Derivative یا به‌اختصار PID است که به‌صورت حلقه بسته از طریق سه مد کنترلی تناسبی، انتگرال گیر و مشتق گیر با رصد پیوسته پارامتر خطا که از مقایسه بازخورد خروجی نسبت به یک مقدار مرجع به دست می‌آید، سیگنال کنترل اصلاحی را تولید می‌کند(شکل۲). هر یک از این سه مد، واکنش متفاوتی نسبت به خطای سامانه دارد به‌عنوان‌مثال برای بهبود زمان صعود مد تناسبی، جهت کاهش بالازدگی، مد انتگرال گیر و جهت واکنش سریع به تغییرات خطا مد مشتق گیر وارد عمل می‌شود. طبق معادله۱ مجموع این سه مد خروجی مدار کنترل‌کننده را تشکیل می‌دهند.[۳]

$$C_{out} = K_p e(t) + K_i \int e(t).dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (۱)$$

که در آن K_p ضریب تناسب، e(t) تابع خطای زمانی، K_i ضریب انتگرال‌گیر و K_d ضریب مشتق‌گیر و C_{out} سیگنال خروجی کنترل‌کننده است.

در کنترل‌کننده PID قسمت تناسبی، خروجی کنترل‌کننده را متناسب با مقدار خطای ورودی، مد انتگرال‌گیر خروجی کنترل‌کننده را متناسب با انتگرال خطای ورودی و مد مشتق گیر، خروجی کنترل‌کننده را متناسب با آهنگ تغییرات خطای ورودی محاسبه می‌کند که به ترتیب در روابط۴-۲ نشان داده شده است.[۳]

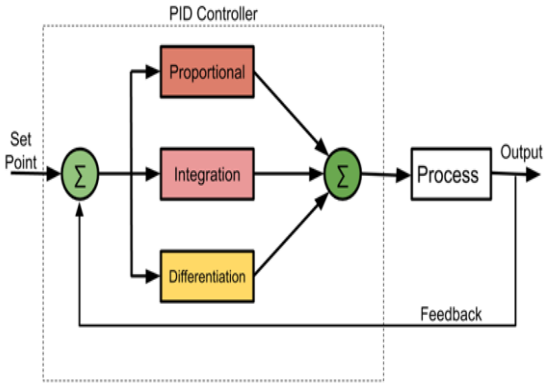
$$C_{out.p} = K_p e(t) \qquad (۲)$$

$$C_{out.i} = K_i \int e(t).dt \qquad (۳)$$

$$C_{out.d} = K_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (۴)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

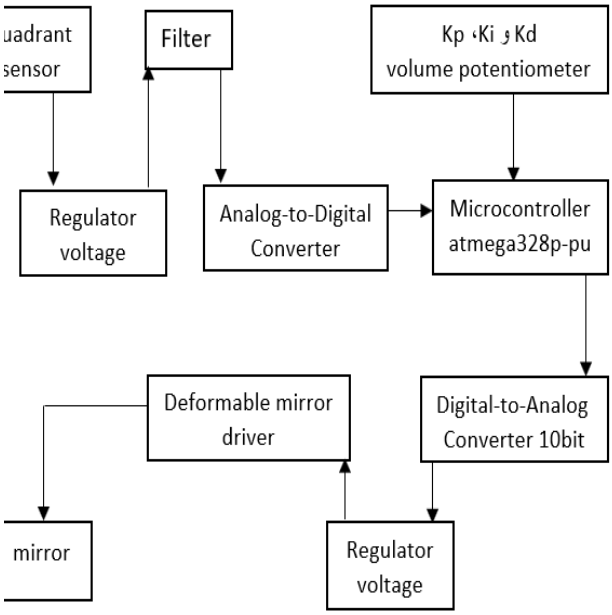
با توجه به شرایط محیطی و تجزیه‌وتحلیل خروجی این کنترل‌کننده و با تغییر ضرایب K_p، K_i وK_d توسط ولوم‌های دستی طراحی شده می‌توان به سیگنال مطلوب موردنیاز آینه تیپ تیلت برای اصلاح پارامتر خطا دست یافت.



شکل ۲: طرح‌واره یک کنترل‌کننده PID

شرح مدار

اولین چالشی که در طراحی این کنترل‌کننده جهت استفاده در سامانه اپتیک تطبیقی با آن مواجه بودیم متناسب‌سازی خروجی حسگر کوادرانت با محدوده ولتاژ ورودی ریزپردازنده‌های متداول و تبدیل خروجی آنالوگ حسگر کوادرانت به دیجیتال و همچنین متناسب‌سازی ولتاژ خروجی ریزپردازنده با محدوده ولتاژ ورودی راه‌انداز آینه تیپ تیلت و تبدیل خروجی دیجیتال ریزپردازنده به آنالوگ برای اعمال به راه‌انداز آینه تیپ تیلت و پایداری لکه در یک محدوده معین بود (شکل۳). دومین چالش عدم انعطاف‌پذیری و آزادی عمل سیستم‌های آنالوگ در طراحی مد نظر ما بود که ما را بر آن داشت با ترکیب مدارات آنالوگ و دیجیتال و بهره‌گیری از پروتکل ارتباطی I۲C کنترل‌کننده طراحی شده را به رایانه متصل و مشکل فوق را برطرف سازیم.



شکل ۳: ارتباط بین واحد کنترل و سایر اجزای سامانه نوری

در طراحی این مدار کنترل‌کننده با توجه به اینکه حداکثر تغییرات بسامد جو ۳۰ هرتز می‌باشد لذا طبق رابطه ۵ از یک پالایه پایین گذر RC مرتبه دوم استفاده کردیم تا از ورود سیگنال‌های با فرکانس بیشتر از ۱۵۰هرتز که نویز هستند جلوگیری کند.

$$f_{cut} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \qquad (۵)$$

که در آن f_{cut} فرکانس قطع، $R_۱$ و $R_۲$ مقاومت‌های الکترونیکی و $C_۱$ و $C_۲$ خازن‌های الکترونیکی مدار فیلتر هستند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از برد طراحی‌شده توانستیم در بازه مسافتی ۱۰۰متر تا ۳ کیلومتر در شرایط آب و هوایی مختلف جبهه موج ارسالی از سمت فرستنده که دچار کج‌نمایی‌های مختلف شده بود را با به دست آوردن ضرایب زرنیک و مقایسه این ضرایب با حالت جبهه موج تخت،

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

اصلاح و سیگنال کنترلی لازم را به آینه تیپ تیلت اعمال کنیم.

کارهای تجربی

به‌منظور بررسی عملکرد سامانه پس از انجام تست‌های آزمایشگاهی توانستیم در فاصله ۱۴۶ متری جبهه موج فرستاده شده از لیزر به قطر ۲۰ سانتی‌متر را که تلاطم‌های موجود در نزدیکی سطح زمین باعث حرکت لکه در محل گیرنده به قطر ۱متر شده بود را با ضرایب کنترلی K_p ، K_i و K_d (شکل ۴) به ترتیب برابر با ۲۵، ۹ و ۲۱ اصلاح و در یک محدوده به قطر ۲۵ سانتی‌متر ثابت کنیم که در این حالت سیگنال اصلاحی در راستای x و y به ترتیب ۷/۱۵ و ۳/۵۳ولت توسط کنترل‌کننده تولید شد.



شکل ۴: نمایی از برد کنترل‌کننده PID

مرجع‌ها

[۱] D. F. Buscher, *Practical optical interferometry*. No. ۱۱. Cambridge University Press, ۲۰۱۵.

[۲] G. W. Allan, “Simulation and testing of wavefront reconstruction algorithms for the deformable mirror (DeMi) cubesat”, PhD diss., Massachusetts Institute of Technology, ۲۰۱۸.

[۳] I. Azhar, W. Zhizheng and F. B. Amara, “A decentralized robust PID controller design for the shape control of a magnetic fluid deformable mirror”, International Journal of Optomechatronics ۲۰۱۰.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]