مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند غیرعامل»
سال سوم، شماره۴، زمستان ۱۳۹۱؛ ص ۲۷۵-۲۶۹

تثبیت شدت نور خروجی لیزر در سیستم‌های مخابرات نوری جهت کاهش خطاهای منبع نوری

میلاد یحیی‌پور[1*]، محمدحسین قزل‌ایاغ[2]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد و ۲- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)
(دریافت: ۱۳۹۰/۰۵/۳۰، پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۰۶)

چکیده

امروزه در اغلب سیستم‌های مخابرات نوری از لیزرهای نیمه‌هادی به عنوان منبع نور استفاده می‌شود که در انواع فضای آزاد آن، به علت بالا بودن تلفات کانال انتقال، استفاده بهینه از این نوع لیزرهای با توان بالا، امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. افزایش نرخ خطا تنها مربوط به تلفات کانال انتقال نبوده و تنزل مشخصات عملکردی منبع نوری در گذشت زمان و در شرائط محیطی مختلف، عامل مهم دیگر افزایش خطا در این‌گونه ارتباطات می‌باشد. راه‌اندازی لیزرهای نیمه‌هادی و داشتن نظارت دائم بر آن‌ها (از جمله کنترل توان و دمای لیزر) از مهم‌ترین قسمت‌های طراحی سیستم‌های مذکور است. در این مقاله سیستمی با قابلیت تثبیت مشخصات کاری و توان لیزر نیمه‌هادی (با دقت ۰/۱ درصد) به ازای تغییرات دمایی محیط (صفر تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد) طراحی و ساخته شده است.

کلیدواژه‌ها: لیزر نیمه‌هادی، کنترل دیجیتال توان، راه انداز لیزر

Stabilizing Laser Output Light Intensity in Optical Communication Systems in Order to Reduce Source Errors

M. Yahyapour[*], M. H. Ghezelayagh
Imam Hossein University
(Received: 21/08/2011; Accepted: 24/02/2013)

Abstract

Nowadays, most optical communication systems use semiconductor lasers as optical sources, but in FSO systems, due to high transmission channel loss, optimum usage of this kind of laser is essential. Increase of bit error rate is not only due to transmission channel losses, but, in some cases it could be due to instability of laser power or drifting of laser characteristics due to aging. Driving semiconductor lasers, monitoring and controlling power and temperature are important aspects of FSO systems. In this paper, a system able to stabilize output light power intensity of semiconductor laser (0.1 percent maximum error) for variable environmental temperature(0 to 50℃) is designed and built.

Keywords: Semiconductor Laser, Digital Control of Power, Laser Driver.

[*] Corresponding Author E-mail: mr_milad_20@yahoo.com

۱. مقدمه

مزایای مخابرات نوری چه از طریق فیبر نوری و چه در فضای آزاد[1] نسبت به روش‌های دیگر مخابراتی شناخته شده است. آن‌ها علاوه بر پهنای باند بالا و عدم تداخل با امواج الکترومغناطیسی، دارای امنیت مطلوب بوده و برای استفاده نیازی به اخذ مجوز فرکانس ندارند. سیستم‌های مخابرات نوری فضای آزاد، به شرطی که تمهیدات لازم پدافندی در آن‌ها لحاظ شده باشد، در برابر تهدیدهای جنگ الکترونیک می‌توانند گزینه قابل اعتمادی جهت ارتباطات امن قلمداد شوند [۱و۲].

منابع اصلی تولید نوری که حامل داده‌ها می‌باشد، لیزرهای نیمه‌هادی (LD) و دیودهای نورانی (LED) بوده که قلب سیستم‌های مخابرات نوری را تشکیل می‌دهند و در راه‌اندازی آن‌ها بایستی محدودیت‌ها و پیچیدگی‌های عملکردی هرکدام را مورد توجه قرار داده تا تبدیل علائم الکتریکی به نوری را به‌صورت خطی اجرا نماید [۳]. دو عامل عمده مؤثر بر کیفیت انتقال و در نهایت نسبت سیگنال به نویز (S/N) دریافتی در گیرنده، عبارتند از:

- محیط انتقال که می‌تواند فیبر نوری یا فضای آزاد باشد
- عوامل محیطی مؤثر بر عملکرد منبع نور

در این مقاله با ایده‌آل فرض نمودن شرایط بسته انتقال، به طوری که شرایط جوی یا طول محیط انتقال، اختلالی در برقراری ارتباط ایجاد ننمایند، به بررسی محدودیت‌های منبع ساطع‌کننده نور، مقدار و نحوه تأثیر محیط بر آن‌ها پرداخته و به رفع کامل یا کاهش اثر آن‌ها می‌پردازیم.

۲. تأثیرات محیطی بر عملکرد منبع نور

منبع نور اعم از لیزر یا دیودهای نوری علاوه بر اینکه تحت تأثیر دمای محیط قرار می‌گیرند و هم دما می‌شوند، به محض تزریق جریان در آن‌ها ایجاد حرارت نموده و دچار خودگرمایی می‌شوند و شروع به انتقال حرارت به بیرون می‌نمایند تا با شرایط دمایی محیط به تعادل برسند. اثر دمای محیط و خودگرمایی، سه مشخصه مهم منابع نوری نیمه‌هادی را تغییر می‌دهد [۴-۱۰]:

الف) جابه‌جایی جریان آستانه هدایت در دیودهای نوری و لیزرهای نیمه‌هادی

ب) کاهش شدت نور خروجی با افزایش دما

ج) جابه‌جایی طول موج ساطع شده از منبع نور

در حالی که جابه‌جایی جریان آستانه در لیزرها با مقداری حدود ۰/۱۷+ میلی‌آمپر بر درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای بدنه و جابه‌جایی طول موج مرکزی ساطع شده به مقداری بین ۰/۲۵+ تا ۰/۵+ نانومتر بر درجه سانتی‌گراد برای ساختارهای مختلف می‌رسد، توان نور خروجی در جریان ثابت بر اثر افزایش دما با نسبت ۰/۰۴۵- میلی وات بر درجه سانتی‌گراد (در حدود ۱ درصد) کاهش می‌یابد و جابه‌جایی طیف منتشره در اثر خودگرمایی پیوند نیمه‌هادی باعث افزایش ۱+ نانومتر بر میلی‌وات می‌باشد.

با توجه به مشخصه‌های فوق، می‌توان نتیجه گرفت که مهم‌ترین تأثیر را دمای بدنه و در نتیجه دمای پیوند نیمه‌هادی بر روی عملکرد لیزرهای نیمه‌هادی دارد. در سیستم‌های مخابرات نوری فضای آزاد به منظور دست‌یابی به عملکرد با ثبات و پایدار لیزر در محدوده وسیع دمای محیطی و داشتن حداکثر طول عمر مفید، امروزه دو روش مورد استفاده قرار می‌گیرد: تکنیک جریان ثابت و تکنیک توان ثابت که هر دو می‌توانند توان خروجی ثابتی را ارائه نمایند. بدون درنظر گرفتن محافظت‌ها و محدودیت‌های لازم در مدار راه‌انداز لیزر، تغییر وسیع در دمای کاری لیزر می‌تواند منجر به صدمه غیر قابل برگشت به لیزر و وجوه آینه‌ای آن شود. روش جریان ثابت با کنترل دقیق دمای بدنه لیزر، عموماً به علت سرعت در حلقه کنترلی با کمک یک مرجع جریان ثابت برای مقایسه توان خروجی لیزر ترجیح داده می‌شود. اما چنانچه فتودیود داخلی در بسته لیزری به هر علتی خزش داشته یا به علت اتصال بد نویز غیر قابل قبولی از خود ارائه دهد، مسلماً خروجی لیزر نیز غیرثابت خواهد بود. از سوی دیگر در روش توان ثابت (کنترل اتوماتیک توان) بدون کنترل دمایی پرش طول موج و تغییر در طول موج کاری نیز اتفاق خواهد افتاد. چنانچه در اینجا مقدار خنک‌کنندگی رادیاتورهای استفاده شده کافی نباشد و دما افزایش یابد، از آنجا که توان خروجی کاهش می‌یابد، مدار کنترلی شروع به افزایش جریان تزریقی به منظور حفظ سطح توان خروجی می‌نماید که نهایتاً در صورتی‌که هیچ‌گونه محدودکننده جریانی وجود نداشته باشد لیزر به حلقه فاسد فزاینده‌ای دچار و خواهد سوخت.

افزایش نرخ ارسال داده‌ها، شکل موج داده‌ها (سینوسی، موج مربعی و...) و نیز نوع کدینگ داده‌ها باعث افزایش تلفات حرارتی شده و بر افزایش دمای پیوند نیمه‌هادی تأثیرگذار می‌باشد [۱۱]. هرکدام از این وابستگی‌ها به دما، تأثیری نامطلوب در عملکرد یک سیستم مخابرات نوری فضای آزاد خواهد گذاشت. در انتقال داده‌ها و برای یک حد خطای ثابت، نسبت سیگنال به نویز نبایستی از یک سطحی کمتر باشد.

در گیرنده‌ها به منظور کاهش تأثیر نور مزاحم محیط از پنجره فیلتر اپتیکی استفاده می‌شود. هرچه پهنای این پنجره از نظر اپتیکی کمتر باشد، نسبت سیگنال به نویز برای یک سیگنال معین در دمای ثابت افزایش خواهد یافت. پهنای این پنجره در اصول می‌بایست در حد پهنای طیف نور منبع ارسال‌کننده داده‌ها باشد ولی در عمل به علت خزش طیف منبع، این پنجره‌های اپتیکی پهن‌تر طراحی شده تا سیگنال در تمام شرایط دمایی قابل دریافت باشد. بنابراین با کنترل دقیق دمای منابع نوری، علی‌رغم تغییر دمای محیط می‌توان این

[1] Free Space Optics (FSO)

خزش را به حداقل رسانده و پنجره را در حداقل مورد نیاز طراحی نمود.

افزایش دما و به تبع آن خستگی لیزر باعث کاهش توان خروجی شده و با سایر شرایط ثابت، مقدار سیگنال به نویز کاهش یافته و مقدار (BER) افزایش می‌یابد. در دمای کنترل شده ثابت، افزایش جریان و به تبع آن افزایش توان خروجی باعث جابه‌جایی طول موج و مشکلات مرتبط با آن می‌شود. به‌منظور استفاده از بخش خطی تابع تبدیل جریان به شدت نور و اجتناب از تغییرات و جابه‌جایی جریان آستانه، طراحان سیستم‌ها معمولاً نقطه کاری لیزر را (بدون سیگنال) در مقداری بالاتر از آستانه تنظیم و تعیین می‌نمایند که باعث می‌شود لیزر بدون انتقال هیچ داده‌ای نیز فعال بوده و درنهایت از عمر آن کاسته شود و محدوده دینامیکی فعالیت آن نیز کاهش یابد. جهت رفع این معضل، لیزر می‌بایست دقیقاً در نقطه آستانه تنظیم شود، ولی کوچک‌ترین افزایش دما باعث می‌شود که آستانه لیزر افزایش یافته و مطابق آنچه در شکل (۱) نشان داده شده، اعوجاج و کوچک‌تر شدن پهنای پالس نوری خروجی، کمتر از پهنای پالس الکتریکی ورودی گردد. در شکل (۱- الف)، نقطه کاری لیزر بر روی جریان آستانه تنظیم شده است و خروجی لیزر متناسب با سیگنال ورودی می‌باشد. در شکل (۱- ب)، جریان آستانه لیزر جابه‌جا شده که باعث ایجاد اعوجاج و نیز تغییر پهنای پالس در خروجی لیزر شده است.

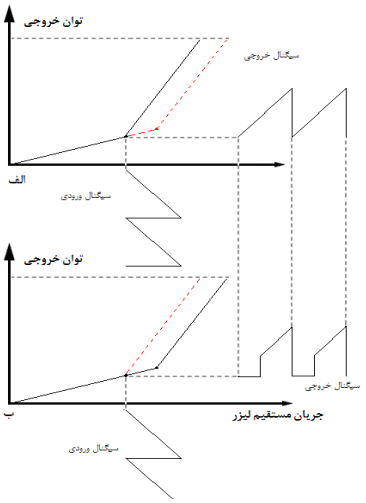
بنابراین سیستم بایستی به‌گونه‌ای طراحی شود تا بتواند ضمن تثبیت دمای لیزر، محاسبه و تنظیم جریان آستانه لیزر و مدولاسیون لیزر را نیز انجام دهد. طراحی این سیستم می‌تواند در دو حوزه انجام پذیرد:

- حوزه آنالوگ
- حوزه دیجیتال

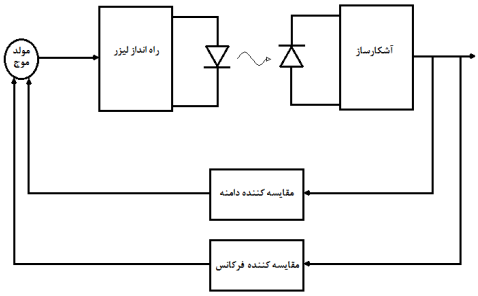
طراحی و پیاده‌سازی سیستم آنالوگ قبلاً انجام گرفته [۱۲] و طرح کلی آن در شکل (۲) آمده است. سیستم مذکور فقط دامنه و فرکانس مدولاسیون را کنترل نموده و هیچ‌گونه اقدامی جهت تنظیم دما انجام نمی‌دهد و در صورتی‌که تعداد حلقه‌های کنترلی افزایش یابند مدارها پیچیده گردیده و این کار بدون استفاده از یک واحد پردازش و کنترل مرکزی (CPU) بسیار مشکل می‌گردد.

در حوزه دیجیتال نیز قبلاً تحقیقاتی انجام گرفته و سیستمی نیز طراحی و پیاده‌سازی شده است [۱۴]. این سیستم فقط با یک مدل خاصی از لیزر کار می‌کند و برای استفاده از منبع‌های دیگر باید طراحی سیستم را عوض نمود. اطلاعات کافی از مقالات تخصصی خارجی در این زمینه در دسترس نبوده و تنها پیشینه تحقیق خارجی، اطلاع از وجود نمونه تجاری ساخته شده از این سیستم می‌باشد [۱۵].

در ادامه مقاله سیستم دیجیتال ساخته شده معرفی و مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۱. تغییرات دما باعث جابه‌جایی جریان آستانه و تغییر پهنای پالس نوری خروجی می‌شود [۱۳]



شکل ۲. طرح کلی سیستم آنالوگ [۱۲]

۳. طراحی سیستم کنترل کننده توان لیزر در حوزه دیجیتال

بر اساس مطالب ارائه شده قبلی، سیستم طراحی و ساخته شده به‌صورت بلوکی در شکل (۳) نشان داده شده است. سیگنال ورودی به مدار راه‌انداز برای مدولاسیون لیزر اعمال می‌گردد. مدار تنظیم کننده جریان آستانه یک مبدل ولتاژ به جریان قابل تنظیم است [۱۶]. واحد پردازش و کنترل با تغییر این ولتاژ، جریان لیزر و همچنین جریان آستانه لیزر را کنترل می‌کند.

مدار محدود کننده جریان، شامل یک تقویت‌کننده تفاضلی بوده و زمانی که جریان لیزر از حداکثر مقدار مجاز تجاوز کند، واحد پردازش و کنترل با فرمان به این مدار سریعاً مدار راه‌انداز لیزر را غیرفعال کرده و لیزر را خاموش می‌کند.

واحد تشخیص و کنترل برای کنترل سایر واحدها و اعلام پیام‌های خطا و هشدار طراحی گردیده است که در شکل (۴) به‌صورت بلوکی ترسیم شده است. در این واحد از یک میکروکنترلر مدل (89C51AC2) به همراه مدارهای جانبی، استفاده شده است که به‌طور کلی وظایف زیر را بر عهده دارند:

- کنترل و تثبیت توان مصرفی دیود لیزر

- کنترل و تثبیت دمای دیود لیزر
- محاسبه و تنظیم جریان آستانه لیزر
- راه‌اندازی و مدولاسیون لیزر جهت ارسال پیام
- محدود کننده جریان لیزر برای جلوگیری از صدمه لیزر
- نمایش پیغام‌های لازم و اعلام خطا در مواقع بحرانی
- اتصال به فتودیود و بازخورد نوری از لیزر

واحد پردازش و کنترل برای خواندن دمای لیزر از طریق مبدل آنالوگ به دیجیتال با حسگر دما که به بدنه لیزر وصل شده در ارتباط است و دما را با تفکیک ۱۰ بیت معادل ۰/۲۵ درجه سانتی‌گراد نمونه‌برداری می‌کند.

از طرف دیگر، واحد پردازش و کنترل از طریق مبدل دیجیتال به آنالوگ به یک خنک‌کننده الکتریکی متصل می‌باشد که کار خنک‌سازی و یا گرم کردن لیزر را انجام می‌دهد.

یکی از وظایف سیستم طراحی شده، محاسبه و تنظیم جریان آستانه لیزر می‌باشد. این امر دو مزیت عمده برای سیستم ایجاد می‌کند. لیزرهای مختلف، جریان آستانه متفاوتی دارند، سیستم با استفاده از این الگوریتم و با محاسبه جریان آستانه لیزر، قابلیت کار با هر نوع لیزری را دارا می‌باشد.

مشخصه‌های کاری لیزرها و جریان آستانه آن‌ها به مرور زمان و کارکرد لیزر، جابه‌جا می‌شود و جریان آستانه لیزر مقداری متفاوت نسبت به جریان آستانه اولیه لیزر نو پیدا می‌کند. الگوریتم ارائه شده، این امکان را به سیستم می‌دهد تا هر بار (یا بعد از زمان تعیین شده) که لیزر روشن می‌شود، ابتدا به محاسبه جریان آستانه لیزر پرداخته و سپس از لیزر استفاده کند.

۴. کنترل و تثبیت دما

مهم‌ترین مشخصه سیستم کنترل توان لیزر، توانایی این سیستم در کنترل دمای لیزر با دقت مطلوب می‌باشد. واحد پردازش و کنترل از طریق مبدل دیجیتال به آنالوگ، پلتیر را تحت کنترل خود دارد. برای کنترل و تثبیت دمای لیزر، باید یک دما را به‌عنوان دمای مرجع انتخاب کنیم تا دمای بدنه لیزر همیشه در این دما تثبیت شود. در این سیستم، دمای مرجع، ۲۵ درجه سانتی‌گراد انتخاب شده است. عمل خنک‌سازی و گرم کردن لیزر را پلتیر بر عهده دارد که با تغییر جهت جریان، از حالت سرمایش به حالت گرمایش و برعکس تغییر می‌کند. با اعمال ولتاژ به پلتیر و عبور جریان از آن، پلتیر شروع به کار خواهد کرد.

حلقه کنترل دما، در صورت مشاهده بیش از ۱درجه سانتی‌گراد اختلاف دمای بین بدنه لیزر با دمای مرجع، در صورت مثبت بودن این اختلاف، خنک کننده را با حداکثر توان به‌کار می‌اندازد و در صورت منفی بودن این اختلاف، گرم کننده را با حداکثر توان به‌کار می‌اندازد تا اختلاف دمای بدنه لیزر با دمای محیط به ۱ درجه سانتی‌گراد برسد که پس از آن پلتیر غیر فعال شده تا زمانی که دما در ۲۵ درجه سانتی‌گراد تثبیت گردد. الگوریتم کنترل و تثبیت دما به‌صورت شکل (۵) می‌باشد که در عمل پیاده‌سازی شده است.

۵. کنترل و تثبیت توان به صورت دیجیتال

تثبیت توان، وظیفه واحد پردازش و کنترل می‌باشد. تثبیت دما که باعث تثبیت شدت نور می‌شود ضرورتاً باعث تثبیت رابطه بین جریان و شدت نور نخواهد بود. بنابراین نیاز است که مقدار شدت نور را به‌صورت مستقل پایش نموده و در دمای ثابت مقدار جریان را به‌طریقی تنظیم نمود که توان خروجی در مقایسه با یک مرجع ثابت تثبیت شود.

الگوریتم کنترل توان به‌صورت شکل (۶) پیاده‌سازی شده است. در دمای ۲۵ درجه در صورتی‌که ولتاژ فتودیود کمتر از ولتاژ مرجع باشد با افزایش جریان و در صورتی‌که بیشتر از ولتاژ مرجع باشد با کاهش جریان، مقدار شدت خروجی لیزر تثبیت می‌شود. در واقع کنترل توان و کنترل دما دو حلقه کنترلی می‌باشند که واحد پردازش و کنترل بر اساس آن‌ها عمل می‌کند و با توجه به شرایط، یکی از این دو را انتخاب می‌کند. در مقایسه شکل (۵) و شکل (۶) به رابطه نزدیک الگوریتم کنترل توان و کنترل دما می‌توان پی برد و اینکه این دو حلقه کنترلی از هم مجزا نمی‌باشند.

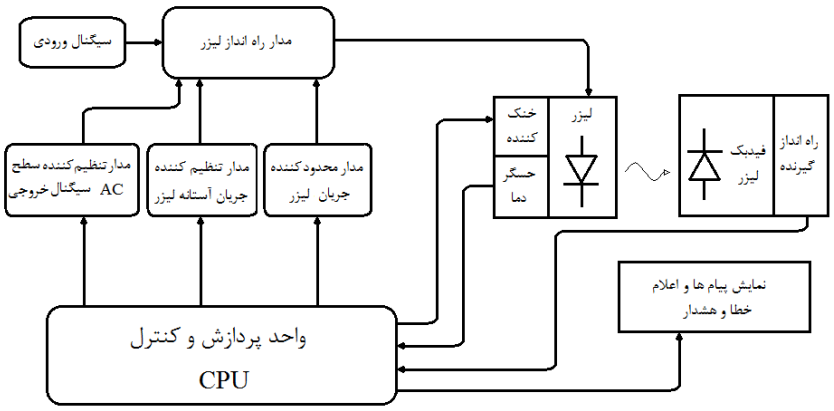
۶. مقایسه عملی مدار طراحی شده با روش‌های قبلی

با استفاده از یک لیزر نیمه هادی مادون قرمز ساخت شرکت SANYO با مدل DL-8032-001، عملکرد سیستم حلقه باز و حلقه بسته به دست آمد. نمودار بود[1] سیستم حلقه باز (عدم اعمال حلقه کنترل توان)، مطابق شکل (۷)، نشان می‌دهد که به ازای فرکانس‌های بالاتر از ۵۰۰ کیلوهرتز شدت خروجی افت نموده و سیستم کارایی خود را از دست می‌دهد و بهم خوردن پهنای پالس مشاهده می‌شود که این امر باعث بروز خطا در سیستم مخابرات نوری می‌باشد. با فعال کردن سیستم کنترل توان، شدت نور با دقت ۰/۱ درصد عملاً تا فرکانس ۷ مگاهرتز تثبیت می‌شود و می‌توان گفت که در شرایط واقعی اگر سیستم دارای خطا باشد، منشأ خطا سیستم فرستنده نبوده و علت خطا را باید در جایی غیر از سیستم فرستنده جستجو کرد و اگر سیستم فرستنده مشکلی داشته باشد با اعلام هشدار، کاربر را از منشأ خطا در فرستنده مطلع خواهد کرد. شکل (۸)، نمودار بود سیستم حلقه بسته را نشان می‌دهد.

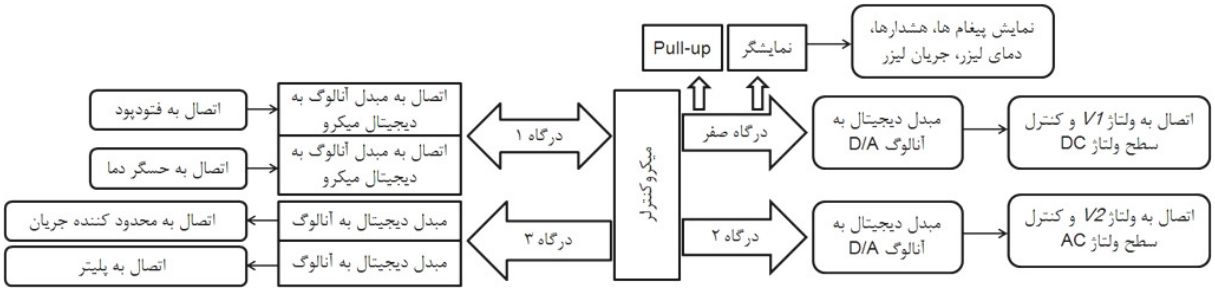
تغییرات جریان لیزر نسبت به افزایش فرکانس ورودی نیز در شکل (۹) آمده است. همان‌طور که از شکل بر می‌آید، عملاً تا فرکانس ۷ مگاهرتز جریان بر روی عدد ۵۰ میلی‌آمپر تثبیت شده است. با افزایش فرکانس از ۷ مگاهرتز، جریان لیزر افزایش می‌یابد که بیان‌کننده افت شدت نور لیزر می‌باشد.

[1] Bode Plot

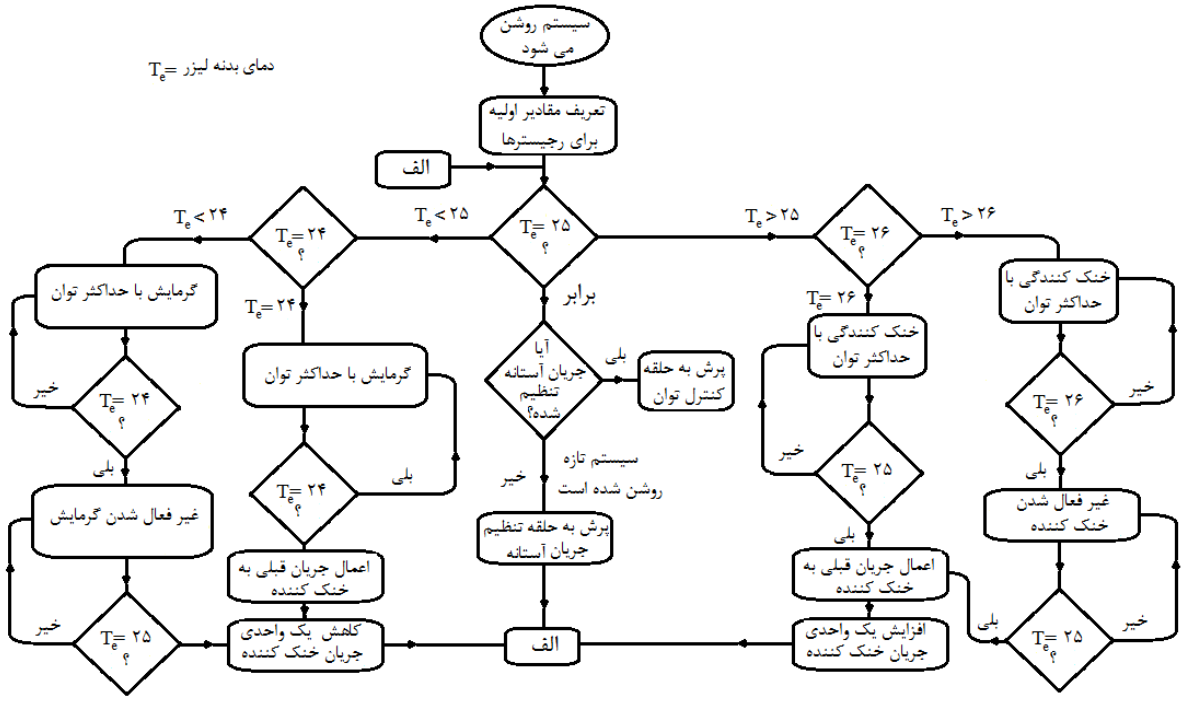
در شکل (۱۰)، تغییرات شدت نور خروجی لیزر به ازای تغییر دمای محیط از ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. طبق نمودار، تغییر شدت نور خروجی لیزر به ازای تغییر دمای محیط از ۱۰تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، ۲/۵ میلی ولت یا به‌عبارت دیگر ۰/۱ درصد می‌باشد.



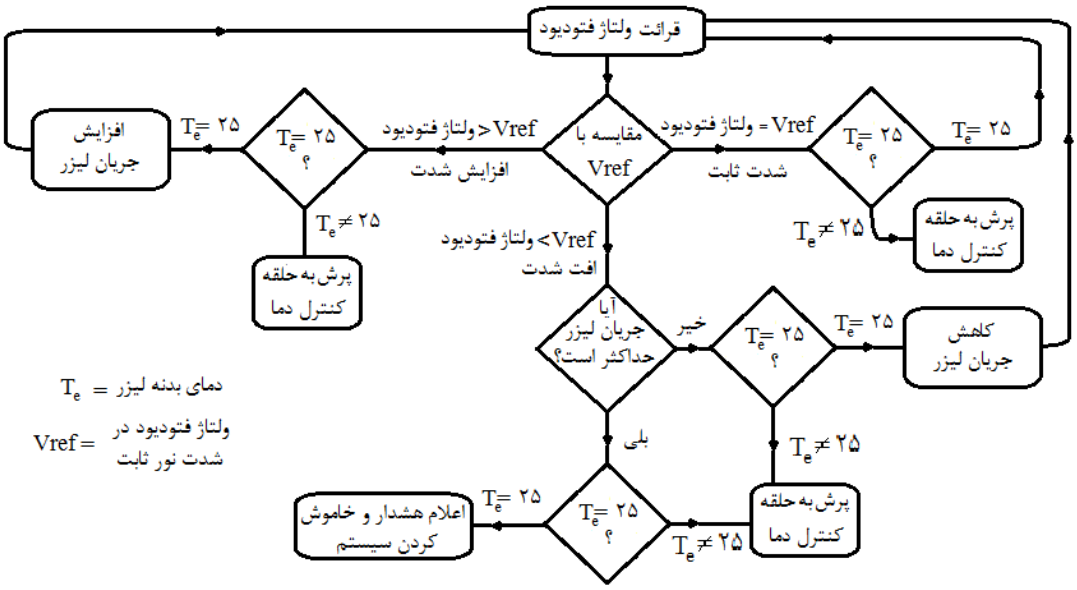
شکل ۳. طرح کلی سیستم کنترل کننده توان لیزر



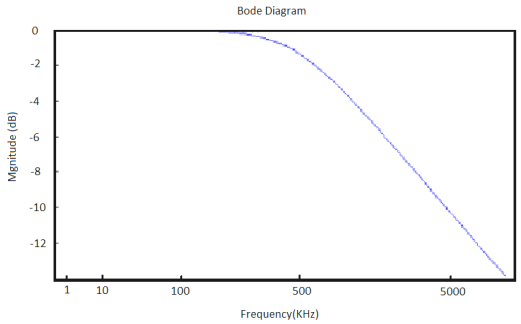
شکل ۴. واحد پردازش و کنترل به همراه اتصالات جانبی



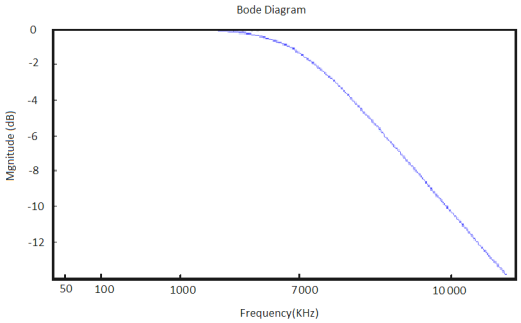
شکل ۵. فلوچارت کنترل و تثبیت دما



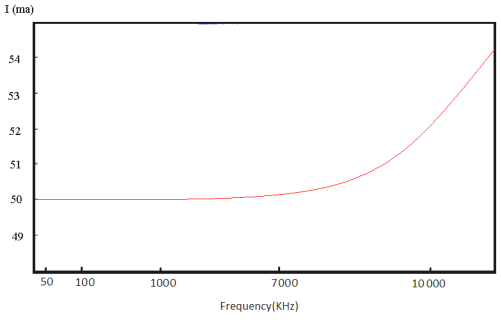
شکل ۶. الگوریتم کنترل و تثبیت توان



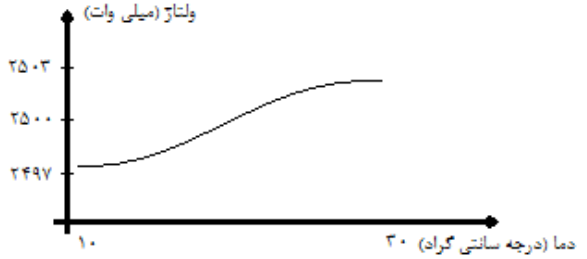
شکل ۷. نمودار بود سیستم حلقه باز



شکل ۸. نمودار بود سیستم حلقه بسته



شکل۹. نمودار جریان لیزر نسبت به افزایش فرکانس ورودی



شکل۱۰. نمودار شدت نور خروجی نسبت به تغییرات دما

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتم‌های کنترلی برای تنظیم و تثبیت هم‌زمان دما و توان لیزرهای مختلف به‌کار گرفته شده در مدارهای مخابرات نوری طراحی و برای یک نوع لیزر پیاده‌سازی و ساخته شد. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد مدارهای ساخته شده با مدیریت میکروپروسسور به‌کارگرفته شده، مطابق مشخصات مورد انتظار عمل نموده و رفتار لیزر در محدوده ۰/۱ درصد مقادیر نقطه کاری برای محدوده دمای ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد تثبیت شد.

۸. مراجع

[1] Gambling, W. A. “The Rise and Rise of Optical Fibers”; IEEE J. on Selected Topics in Quantum Electronics 2000, 6, 1084–1093.

[2] Garlington, T.; Babbitt, J.; Long, G. “Analysis of Free Space Optics as a Transmission Technology”; WP No. AMSEL-IE-TS-05001, 2005.

[3] Caplan, D. O. “Laser Communication Transmitter and Receiver Design”; J. Opt. Fiber Commun. Rep. 2007, 4, 225.

[4] Kvikala, R. K. “Temperature Dependency of Semiconductor Laser”; Ph.D. Thesis, Brno Univ. of Tech., Dep't of Radio Electronics, FEEC, Czech Republic, 2005.

[5] Zulkepli, N.; Bidin, N. "The Effect of Temperature on High Power Diode Lasers"; J. Fizik. UTM. 2008, 3, 84-89.

[6] Ab Rahman, M. S.; Hassan, M. R. "Temperature Dependence of Turn-on Time Delay of Semiconductor Laser Diode: Theoretical Analysis"; Opto-Electronics Review 2010, 18, 458-466.

[7] Ching, F. L.; Yi, S. S. "Improved Temperature Characteristics of Laser Diodes with Nonidentical Multiple Quantum Wells Due to Temperature-Induced Carrier Redistribution"; Appl. Phys. Lett. 2003, 82, 28.

[8] Keating, T.; Jin, X. "Temperature Dependence of Electrical and Optical Modulation Responses of Quantum-Well Lasers"; IEEE J. Quantum Electronics 1999, 35, 1526-1534.

[9] ILX Lightwave Corporation "An Overview of Laser Diode Characteristics"; http://www.ilxlightwave.com/navpgs/app-tech-notes-white-papers.html, 2011

[10] ILX Lightwave Corporation "Mode Hopping in Semiconductor Lasers"; http://www.ilxlightwave.com/navpgs/app-tech-notes-white-papers.html, 2011

[11] ILX Lightwave Corporation "Modulating Laser Diodes"; http://www.ilxlightwave.com/navpgs/app-tech-notes-white-papers.html, 2011.

[12] Mahdipour Ghazi, M. "Design and Construction of a Modulated Optical Source with Stabilized Amplitude and Frequency"; B.Sc. Thesis, Imam Hossein Univ., September 2005 (In Persian).

[13] Edward, A. L. "Fiber Optics"; Prentice-Hall International, 1982.

[14] Jadidi, M. "Design and Construction of a Semiconductor Laser Drive Circuit with the Ability to Digitally Control the Output Power for a Frequency Range of 1 to 20 MHz"; M.Sc. Thesis, Imam Hossein Univ., June 2008 (In Persian).

[15] Stanford Research Systems "Laser Diode Drivers with Temperature Controllers"; http://www.Thinksrs.com/products/LDC501.html, 2011

[16] Horowitz, P.; Hill, W. "The Art of Electronics"; Cambridge Univ. Press, 1989.