

شبیه‌سازی الگوریتم بهینه FSM در سیستم‌های ردگیری خودکار جهت پایدارسازی لینک‌های امن مخابرات نوری فضای آزاد

مجید فیضی^{۱*}، ابوالفضل چمن مطلق^۲

۱- کارشناس ارشد الکترونیک، شرکت صنایع مخابرات صا ایران، ۲- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین^ع

(دریافت: ۹۲/۱۰/۸، پذیرش: ۹۲/۱۲/۵)

چکیده

کانال ارتباطی لینک‌های مخابرات نوری فضای آزاد که در سال‌های اخیر توجه زیادی به‌ویژه در کاربردهای پدافندی و نظامی به خود جلب نموده‌اند، اتمسفر است. داده‌ها روی پرتوهای نور در فضای آزاد منتشر می‌شوند. به دلیل تأثیرات محیط انتشار روی پرتوهای نور و اثر نوسانات و ارتعاش‌های مکانیکی روی فرستنده-گیرنده‌ها، پایداری کانال کاهش و BER افزایش می‌یابد. در این مقاله اثر عامل ارتعاشات مکانیکی روی BER بررسی شده و چندین روش هدایت پرتو که نقش اساسی در سیستم ردگیری خودکار جهت پایدارسازی لینک‌های FSO دارند معرفی و با هم مقایسه شده‌اند. هدایتگر پرتو FSM به‌عنوان کارآمدترین روش ممکن، در یک سیستم ردگیری خودکار به‌کار گرفته شده و نشان داده شده است که با استفاده از این هدایتگر پرتو، در سیستم پایدارسازی در زمانی حدود ۲ میلی‌ثانیه نوسانات پرتو کاهش یافته و BER کانال بهبود می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مخابرات نوری فضای آزاد، ردگیری خودکار، هدایتگر پرتو، نرخ خطای بیت، آیین‌های هدایتگر سریع

۱. مقدمه

گازی خود را به وسیله فرستادن پیغامی تلفنی در آزمایشگاه بل امتحان نمود. شروع استفاده از مخابرات نوری فضای آزاد به این اختراع و مقاله دکتر ارهارد، دانشمند آلمانی، در اواخر سال ۱۹۶۰ تحت عنوان امکان انتقال اطلاعات با استفاده از پرتوهای لیزر در فضای آزاد برمی‌گردد.

ایجاد یک لینک ارتباطی امن و مقاوم در برابر تهدیدهای جنگ الکترونیک و شنود، همواره از چالش‌های مهم فناوری مخابرات نظامی بوده است. مخابرات نوری در فضای آزاد به دلیل فرکانس بالای امواج نوری، ظرفیت بالای انتقال داده‌ها، انتشار در خط مستقیم و سهولت و سرعت راه‌اندازی در شرایط بحرانی به یک شیوه ارتباطی امن و محبوب در مخابرات نظامی تبدیل شده است. از دیگر مزایای این فناوری می‌توان عدم نیاز به کسب مجوز فرکانسی، عدم تداخل، نویزپذیری کم، کاهش توان مصرفی و کاهش اندازه عناصر و تجهیزات مخابراتی را برشمرد [۱-۳].

از کهن‌ترین تجربه‌های تاریخی ثبت‌شده در مبحث مخابرات نوری فضای آزاد^۱ می‌توان به هدایت کشتی‌ها به کمک فانوس‌های دریایی توسط چینی‌ها، در قرن هشتم پیش از میلاد مسیح و انتقال اطلاعات به نقاط دور دست با استفاده از برج‌های آتش، توسط ایرانیان در زمان امپراتوری داریوش اول (قرن چهارم پیش از میلاد مسیح) اشاره نمود. در دنیای مدرن حدود یک صد و سی سال پیش (ژوئن سال ۱۸۸۰)، الکساندر گراهام بل، صدای خود را به صورت یک سیگنال تلفنی، از فاصله ۶۰۰ پایی با استفاده از منبع نور خورشید، تعدادی آیینه متحرک به عنوان مدولاتور و یک آشکارساز سلنیومی منتقل نمود. این آزمایش را می‌توان پایه اولیه مخابرات نوری فضای آزاد امروزی دانست.

در پایان سال ۱۹۶۱ علی جوان از انستیتو فناوری ماساچوست، اولین مولد لیزر گازی دائمی را ساخت. درست یک روز بعد او لیزر

1. Free Space optical communication link (FSO)

آمارای خطاهای ارتعاشی ایجادشده از توزیع ریلی استفاده می‌نماییم [۴ و ۵].

۱.۲. معادله لینک با لحاظ کردن تأثیر خطای نشانه‌گیری

زاویه خطای نشانه‌گیری^۱ شعاعی را می‌توان با تابع چگالی احتمال زیر مدل کرد [۴ و ۵]:

$$f(\theta) = \frac{\theta}{\sigma^2} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}} \quad (۱)$$

θ خطای نشانه‌گیری شعاعی و σ انحراف استاندارد خطای نشانه‌گیری شعاعی است.

توان دریافتی لحظه‌ای را به صورت زیر می‌توان تعریف نمود [۵]:

$$P_r(\theta) = P_t \cdot L(\theta) \quad (۲)$$

که P_t معادله لینک FSO دید مستقیم و $L(\theta)$ تلفات نشانه‌گیری است. معادله P_r به صورت زیر می‌باشد [۵]:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \eta_t \cdot G_r \cdot \eta_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi z}\right)^2 \quad (۳)$$

که P_t توان پرتو ارسالی، G_t بهره آنتن فرستنده، η_t بازده اپتیکی فرستنده، G_r بهره آنتن گیرنده، η_r بازده اپتیکی گیرنده، λ طول موج پرتو ارسالی و z فاصله بین فرستنده و گیرنده است [۴].

تلفات نشانه‌گیری به صورت زیر می‌باشد [۴ و ۵]:

$$L(\theta) = e^{(-G_t \theta^2)} \quad (۴)$$

لذا معادله یک لینک FSO دید مستقیم را با لحاظ کردن تأثیر خطای نشانه‌گیری به صورت زیر می‌توان نوشت [۹ و ۱۰]:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \eta_t \cdot G_r \cdot \eta_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi z}\right)^2 \cdot e^{(-G_t \theta^2)} \quad (۵)$$

۲.۲. نرخ خطای بیت و دامنه نوسانات

در لینک‌های مخابرات نوری فضای آزادی که از مدولاسیون ON/OFF KEYING استفاده می‌کنند، گیرنده دارای یک آشکارساز نوری است که توان پرتو ورودی را با نسبت تبدیل R به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. وظیفه گیرنده، جمع‌آوری پرتو ارسالی است و این‌که در هر زمانی مشخص نماید پرتو روشن است یا خاموش. سیگنال الکتریکی با γ نمایش داده شده و نویز جدای از سیگنال

از آنجایی که در مخابرات نوری فضای آزاد، کانال انتقال اتمسفر می‌باشد، تأثیرپذیری از شرایط جوی و محیطی زیاد و اغلب پارامترهای موثر در تضعیف و تغییر شکل سیگنال تصادفی‌اند، لذا محاسبه درصد تضعیف بسیار پیچیده است. برای یک سیستم FSO مؤثرترین عوامل تضعیف توان در طول کانال و کاهش توان دریافتی در گیرنده عبارت‌اند از: تلفات جذبی^۱، واگرایی پرتو، ارتعاشات مکانیکی، پراکندگی، توربولنس^۲، عدم هم‌راستایی^۳، تداخل نور خورشید^۴ و موانع خط دید.

در سیستم‌های مخابراتی FSO با دید مستقیم برای اینکه دو پایانه با هم ارتباطی مستمر و پایدار داشته باشند باید هر لحظه هم‌راستا باشند. عواملی مانند ارتعاش‌های مکانیکی با فرکانس‌های مختلف و انحراف پرتو ناشی از تأثیرات محیط انتشار باعث از دست رفتن هم‌راستایی و نهایتاً افزایش نرخ خطا می‌گردد. روش‌های مختلفی مانند افزایش زاویه واگرایی در فرستنده، دایورسیتی مکانی و زمانی، روش‌های متعدد کدینگ و روش ردگیری خودکار در گیرنده، برای پایدارسازی و کاهش نرخ خطای بیت^۵ لینک وجود دارند که به فراخور عوامل موثر به کار گرفته می‌شوند.

در ادامه مقاله، اثر عامل ارتعاشات مکانیکی روی BER^۶ بررسی شده و لزوم استفاده از سیستم پایدارساز ردگیری خودکار و ساختار حلقه بسته این سیستم به طور عام بحث شده‌اند. سپس انواع هدایتگرهای پرتو، که سبب تنوع سیستم‌های ردگیری خودکار می‌شوند، معرفی و مقایسه شده‌اند. در انتها با انتخاب مناسب‌ترین روش هدایت پرتو به نام FSM^۷، یک سیستم ردگیری خودکار شبیه‌سازی و نتایج حاصل بیان شده است.

۲. بررسی اثر عامل ارتعاش‌های مکانیکی روی نرخ

خطای بیت

در مخابرات نوری فضای آزاد با دید مستقیم، از پرتوهای نوری باریک با واگرایی بسیار کوچک در حدود چند میکرو رادیان استفاده می‌شود. برای دریافت این پرتوها نیاز است فرستنده و گیرنده با دقت بالایی همیشه هم‌راستا باشند اما به دلایل مطرح‌شده، پرتو روی محور هم‌راستایی لغزش پیدا کرده و در صفحه گیرندگی دچار نوسان می‌شود.

این پدیده روی کیفیت لینک اثرات نامطلوبی گذاشته و موجب تضعیف سیگنال و افزایش BER می‌گردد. برای توصیف

5. Bit Error Rate (BER)
6. Fast Steering Mirror (FSM)
7. Fast Steering Mirror
8. Pointing Error

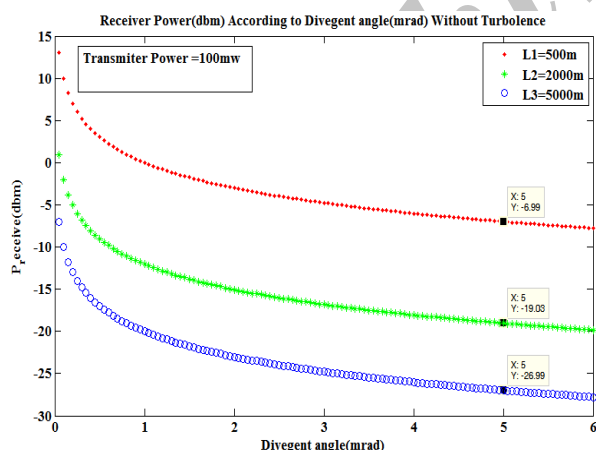
1. Absorption Loss
2. Turbulence
3. Alignment Miss
4. Solar Interference

یک سیستم ردگیری خودکار سعی داریم راه‌حلی برای کاهش تلفات نشانه‌گیری و بهبود نرخ خطای بیت ارائه نماییم.

۳. لزوم استفاده از سیستم پایدارساز خودکار

ساده‌ترین راه حل ممکن برای حذف تأثیرات محیطی و عوامل ناپایداری لینک‌های FSO، افزایش زاویه واگرایی در فرستنده است، به نحوی که قطر پرتو در گیرنده آنقدر زیاد شود که پایداری لینک را تضمین نماید. اما باید مصالحه‌ایی بین افزایش زاویه واگرایی و افزایش توان ارسالی صورت پذیرد که با توجه به شکل ۲ در لینک‌های امروزی مقرون به صرفه نیست. داشتن لینکی مطلوب با BER پایین مستلزم کاهش توان ارسالی و کاهش زاویه واگرایی است. یک روش مرسوم، استفاده از سیستم‌های پایدارساز خودکار در گیرنده است که سیگنال دریافتی را به طور مستمر ردگیری نموده و باعث می‌شود آشکارساز همواره بیشترین توان را با کمترین نوسان پرتو دریافت نماید [۶ و ۷].

در شکل ۲ رابطه بین توان دریافتی و زاویه واگرایی در فرستنده نشان داده شده است. با توجه به نمودار، در لینک‌های FSO با طول کانال چند کیلومتری که امروزه به‌طور معمول استفاده می‌شوند، توان دریافتی با افزایش زاویه واگرایی به شدت کاهش می‌یابد که منجر به افزایش BER لینک می‌شود. لذا استفاده از روش افزایش زاویه واگرایی نمی‌تواند راه‌حل مناسبی باشد.



شکل ۲. نمودار توان دریافتی بر حسب زاویه واگرایی در فرستنده

۴. حلقه کنترلی سیستم ردگیری خودکار

سیستم ردگیری خودکار شامل یک حلقه بسته کنترلی است که در آن همواره سعی بر این است که پرتو بدون ارتعاش و جابجایی در یک نقطه متمرکز شود. در واقع اثر ارتعاشات و جابه‌جایی پرتو در این

دریافتی با میانگین صفر و واریانس σ^2 در نظر گرفته می‌شود. زمانی که سیگنال ON و یا OFF است y دارای چگالی احتمال زیر است [۵]:

$$P(y, \theta) = e^{-\frac{[2yR_p(\theta) - [R_p(\theta)]^2]}{2\sigma^2}} \quad (۶)$$

با توجه به تعریف BER می‌توان نوشت [۵]:

$$BER = \int_0^\infty \left[P(on)P\left(\frac{off}{on}, \theta\right) + P(off)P\left(\frac{on}{off}, \theta\right) \right] f(\theta) d\theta \quad (۷)$$

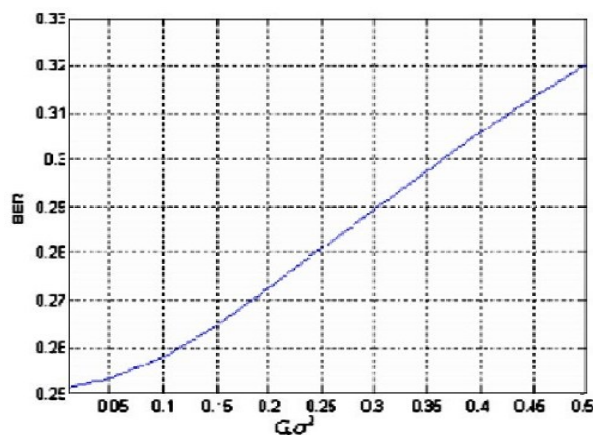
با استفاده از روابط (۶) و (۷) و معادله‌های (۱) و (۵) BER را می‌توان به صورت زیر بدست آورد [۵]:

$$BER = \int_0^\infty \left[\left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{4} \operatorname{erf}(Ce^{-2G_r\sigma^2 u}) \right\} e^{-u} \right] du \quad (۸)$$

می‌باشد. با تغییر متغیر $u = (\theta^2)/(2\sigma^2)$ ، رابطه ساده‌تر زیر بدست می‌آید [۵]:

$$BER = \int_0^\infty \left[\left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{4} \operatorname{erf}(Ce^{-2G_r\sigma^2 u}) \right\} e^{-u} \right] du \quad (۹)$$

در شکل ۱ با استفاده از معادله (۹) نمودار نرخ خطای بیت بر حسب دامنه ارتعاشات مکانیکی در صفحه گیرنده $G_r\sigma^2$ رسم شده است. با توجه به نمودار، کاملاً واضح است که افزایش دامنه ارتعاشات مکانیکی نرخ خطای بیت را نیز افزایش می‌دهد. بالا بودن نرخ خطا در طی ارسال احتمال تلفات سیگنال را به شدت بالا می‌برد که این در لینک‌های مخابرات نوری فضای آزاد با توجه به استفاده از توان‌های ارسالی پایین اصلاً مطلوب نیست. در ادامه با شبیه‌سازی

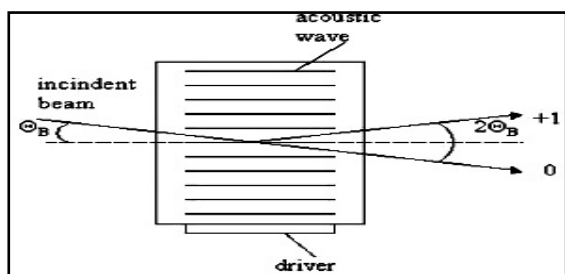


شکل ۱. BER به عنوان تابعی از حاصل ضرب بهره آنتن فرستنده و σ^2 [۵].

طبق این ایده، المان‌های قرار داده شده در مسیر پرتو سبب چرخش آن حول یک یا دو محور می‌شوند، این ایده با تکنیک‌های متعددی قابل اجراست. عمده فناوری‌های به‌کاررفته در این روش عبارت‌اند از: آیینه‌های هدایتگر سریع، انحراف‌دهنده‌های صوتی- نوری^۴ و مدولاتورهای نوری سه بعدی^۵ که در ادامه بررسی و مقایسه می‌شوند.

۱.۱.۵. انحراف دهنده‌های صوتی- نوری

مطابق شکل ۵ عملکرد این مدل هدایتگر پرتو، که سلول براگ نیز نامیده می‌شود، بر اساس شکست نور در یک قطعه کریستالی است که از آن سیگنالی صوتی عبور داده شده و زاویه انحراف پرتو با تغییرات فرکانس یک سیگنال رادیویی کنترل می‌گردد [۹].



شکل ۵. هدایتگر پرتو براگ [۹]

رابطه (۱۰) وابستگی زاویه انحراف پرتو به تغییرات فرکانس رادیویی f را نشان می‌دهد. λ و v به ترتیب طول موج سیگنال صوتی و سرعت صوت می‌باشند.

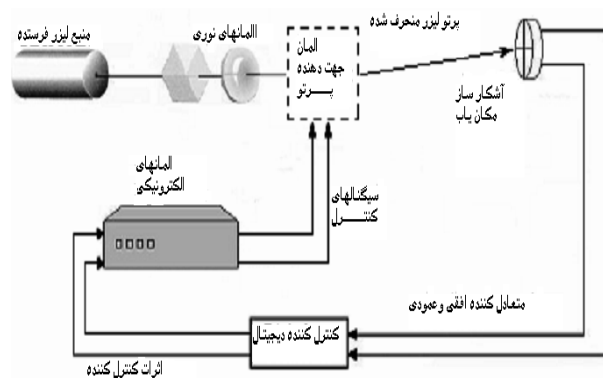
$$\theta_B = \frac{\lambda}{v} \Delta f \quad (10)$$

انحراف دهنده‌های صوتی- نوری تک بعدی بوده و در کاربردهای دو بعدی نیاز است از دو تای آن‌ها با دو سیستم راه انداز استفاده گردد. از جمله مزایای این روش کوچکی سایز، نداشتن قطعات مکانیکی و توان مصرفی کم می‌باشد.

همان‌طور که در جدول ۱ نیز نشان داده شده بازده این مدل هدایتگر پرتو پایین بوده (در حدود ۴۰ الی ۷۰ درصد) و همچنین روزنه نفوذ آن برای پرتو ورودی بسیار کم می‌باشد. لذا با مزایای متعددی که دارد در سیستم ردگیری خودکار کمتر استفاده شده است.

سیستم خنثی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است کنترلر با استفاده از پس‌خورد منفی از مکان‌یاب پرتو^۱، سیگنال کنترلی لازم را برای انحراف پرتو در المان جهت‌دهنده پرتو تولید می‌نماید و این عمل به طور مستمر ادامه دارد تا موقعیت پرتو همواره در مرکز مکان‌یاب تثبیت شود.

شکل ۳ شماتیک ساده سیستم ردگیری خودکار را نشان می‌دهد. این سیستم بخشی از گیرنده است که پرتو ورودی را همواره دنبال و اثر ارتعاشات و جابه‌جایی را در آن حذف می‌نماید.



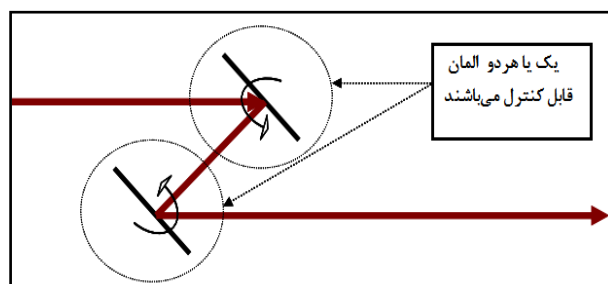
شکل ۳. شماتیک ساده سیستم ردگیری خودکار [۸]

۵. انواع هدایتگرهای پرتو

به دلیل فناوری‌های متعدد هدایتگرهای پرتو^۲ در تصحیح خطا، تنوع روش‌های ردگیری خودکار برای پایدارسازی لینک‌های FSO ایجاد شده است. در یک دسته‌بندی کلی، هدایتگرهای پرتو به دو دسته زاویه‌ای و عرضی تقسیم می‌شوند [۹].

۱.۵. هدایتگرهای زاویه‌ای

ایده هدایتگرهای زاویه‌ای^۳ در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. هدایتگر زاویه‌ای پرتو [۹]

4. Acousto-Optic Deflectors
5. Spatial Light Modulators

1. Position Sensing Detector (PSD)
2. Beam Steerings
3. Angular Beam Steerings

جدول ۱. مقایسه پارامترهای دو مدل‌های انحراف دهنده صوتی - نوری [۹]

| Model | Parameters | | | | | |
|-------------|-----------------|----------------------------|--------------|--------------|--------|------------|
| | Wavelength (um) | Deflection angle Rad or | Efficiency % | Polarization | | Resolution |
| | | | | Input | Output | |
| OAD1550-XY | 1.55 um | 2.3 | 50 | Linear | Linear | 200x200 |
| DTS .XY-400 | 0.35-1.6 um | 2.8 | 45 | Linear | Linear | 240x240 |

۲.۱.۵. مدولاتورهای نوری سه بعدی (SLMs)

در جدول ۲ دو مدل پیزوالکتریکی و کوپل صوتی باهم مقایسه شده‌اند. مدل کوپل صوتی با داشتن زاویه انحراف بزرگ‌تر، دقت مناسب و توان مصرفی کمتر نسبت به مدل پیزوالکتریکی، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲.۵. هدایتگرهای عرضی

فناوری‌های بکار رفته در هدایتگرهای عرضی^۲ عبارت‌اند از: بهره‌گیری از روش‌های پردازش تصویر در گیرنده و استفاده از فناوری درایورهای لوح‌های فشرده (روش جابه‌جایی لنز) [۹].

ایده اصلی این روش در ابتدا توسط شرکت‌های سازنده دوربین‌های دیجیتال مانند کانون و نیکن جهت پایدارسازی و تثبیت تصویر به‌کار گرفته شد.

مزایا و معایب هدایتگرهای عرضی در مجموع به‌صورت زیر می‌باشد.

مزایا:

- در مسیر پرتو، چرخش قابل ملاحظه‌ای ایجاد نمی‌کنند.
- از هدایتگرهای زاویه‌ای ارزان‌ترند.
- روش جابه‌جایی لنزها پهنای باند بالایی دارد.

در این فناوری مشخصات پرتو ورودی تغییر می‌یابد و شامل دو مدل است. یکی بر اساس کریستال مایع و دیگری بر اساس قطعات میکرو الکترومکانیکی (MEMS) می‌باشد. مدل کریستال مایع با وجود مزایایی مانند نداشتن قطعات مکانیکی، توان مصرفی کم و بازدهی بالا، به دلیل پاسخ فرکانسی پایین و کوچکی زاویه انحراف، کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. مدل SLMS MEMS دارای سطوح آینه‌ای شکل‌پذیر^۱ است. با توجه به قابلیت تغییر آن‌ها به کمک محرک‌های میکرو الکترومکانیکی، پاسخ فرکانسی بالا و توان مصرفی ناچیز امکان استفاده به عنوان هدایتگر پرتو را دارند اما به دلیل زاویه انحراف بسیار پایین (در حدود ۱۰ میکرورادیان) جهت کاربردهای ردگیری خودکار مناسب نمی‌باشند [۹].

۳.۱.۵. آینه‌های هدایتگر سریع (FSM)

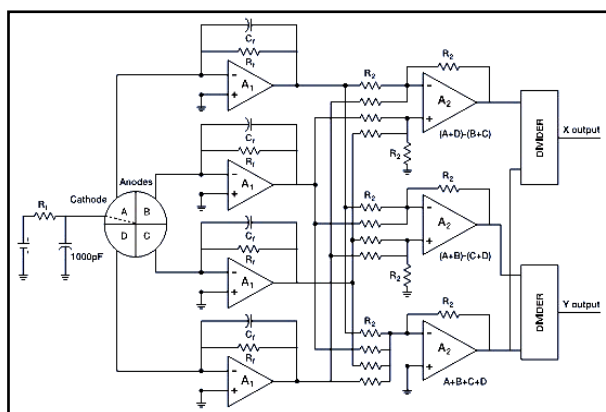
در روش FSM از یک آینه مدور استفاده می‌شود که روی محرک‌هایی نصب شده که قادرند حرکاتی سریع، دقیق و بازدهی ۹۵ درصدی داشته باشند. عملکرد محرک‌ها معمولاً خطی بوده و به صورت زوج نصب می‌گردند. به دلیل تنوع محرک‌ها انواع مختلفی از FSM وجود دارد که دو نوع محرک پیزوالکتریکی و محرک کوپل صوتی با توجه به دقت بالایی که دارند برای سیستم ردگیری خودکار مناسب می‌باشند [۹ و ۱۲]:

جدول ۲. مقایسه مدل‌های کوپل صوتی و پیزوالکتریکی در FSM [۹]

| Device | Tilting angle | Apperture | Bandwidth | Resolution | Actuators |
|--------------------|---------------|-----------|-----------|------------|-------------|
| PI S-330 | 2mrad ± | 10mm | 2.4KHZ < | 0.05 urad | piezo |
| Sapphire TT25 | 17.5mrad ± | 25mm | 0.5 KHZ | 1 urad | Voice coils |
| Newport FSM-300-01 | 26mrad ± | 25mm | 0.8 KHZ | 2 urad < | Voice coils |
| PiezoJena PSH x2 | 4mrad ± | 50mm < | 0.2 KHZ | 0.01 urad | piezo |

نوری پایدارساز، فرمان‌های لازم برای کنترل پرتو ورودی تولید و به FSM فیدبک می‌شود تا اثر ارتعاشات مکانیکی را جبران‌سازی و کاهش دهد [۱۱].

همان‌طور که اشاره شد و در شکل ۱ آورده شده است برای سنجش میزان جابجایی پرتو از مکان ایده‌آلش در گیرنده، به یک حسگر مکان‌یاب پرتو نیاز است. برای این منظور از یک حسگر چهار ربعی استفاده شده است. این حسگر از چهار فتودیود ساخته شده که تشکیل یک صفحه دایره‌ای را می‌دهند، با استفاده از شدت نور دریافتی در هر ربع دایره، میزان جابجایی پرتو از مکان ایده‌آل تشخیص داده می‌شود. مکان ایده‌آل جایی است که چهار ربع، نور یکسانی دریافت می‌کنند.



شکل ۷. نمونه یک مکان‌یاب پرتو PSD [۱۱]

مطابق شکل ۷ مکان‌یاب پرتو از اجزای زیر تشکیل شده است [۱۱]:

- حسگر نوری مدور شامل چهار ربع A, B, C و D.
- مبدل‌های شدت نور به ولتاژ شامل چهار تقویت‌کننده عملیاتی.
- مقایسه‌کننده‌های ولتاژها شامل تقویت‌کننده‌های عملیاتی.
- دو بلوک تقسیم‌کننده که مختصات x و y خروجی نهایی را تولید می‌کنند.

روابط زیر نحوه محاسبه مختصات مکانی پرتو را روی صفحه حسگر چهار ربعی با توجه به شدت نور دریافتی در نواحی A, B, C و D نشان می‌دهند [۱۱]:

$$x = \frac{(B+C) - (A+D)}{A+B+C+D} \quad (11)$$

3. Divider

- سیستم‌های دوربین دارای میدان دید وسیعی هستند.

معایب:

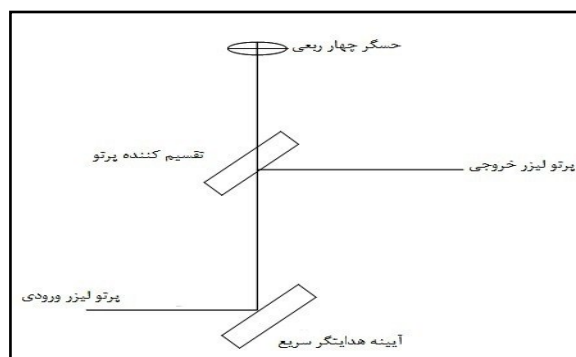
- سیستم‌های دوربین، پاسخ فرکانسی کمی دارد.
- در روش جابه‌جایی لنزها میدان دید کوچک است.
- محرک‌ها در این نوع از هدایتگرها خطای زیادی ایجاد می‌کنند.

در مجموع با وجود مزایای ذکر شده، هدایتگرهای عرضی به دلیل پیچیدگی زیاد، کمتر از روش FSM در سیستم‌های ردگیری خودکار مورد توجه قرار گرفته‌اند. با مقایسه فناوری‌های بیان‌شده در این بخش به صراحت می‌توان گفت برای کاربردهای ردگیری خودکار در لینک‌های FSO، روش FSM با محرک کوئل صوتی مناسب‌ترین روش می‌باشد. در ادامه با استفاده از تابع تبدیل همین نوع FSM و جبران‌ساز PID یک سیستم ردگیری خودکار طراحی و شبیه‌سازی شده است.

۶. سیستم پایدارساز خودکار با هدایتگر پرتو FSM و حسگر مکان‌یاب PSD

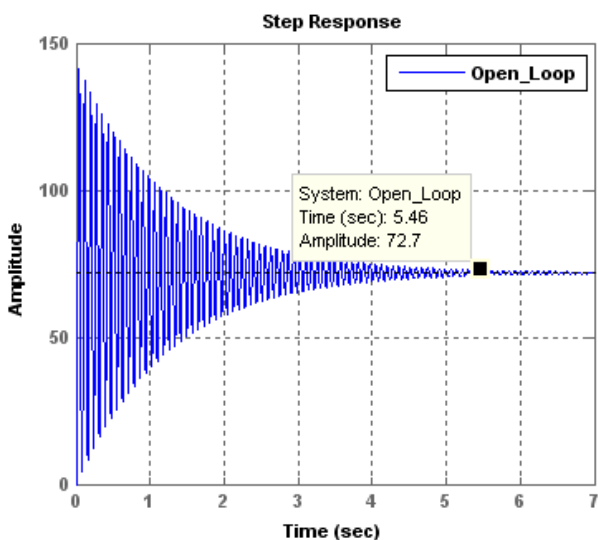
شکل ۶ شماتیک یک پایدارساز ساده FSM را نشان می‌دهد که مسیر عبور پرتو در آن به‌صورت زیر است:

پرتو ورودی به سیستم ردگیری خودکار، ابتدا وارد هدایتگر FSM می‌شود که آن را روی جداکننده نور^۱ می‌تاباند. جداکننده نور بخشی از پرتو را به حسگر مکان‌یاب PSD می‌دهد، تشخیص میزان ارتعاشات پرتو بر عهده این قسمت بوده و سیگنال خطای کنترلی در اینجا تولید می‌شود. بخش دیگر پرتو به خروجی سیستم ردگیری خودکار منتقل می‌گردد. به کمک سیگنال خطای تولیدشده در بخش

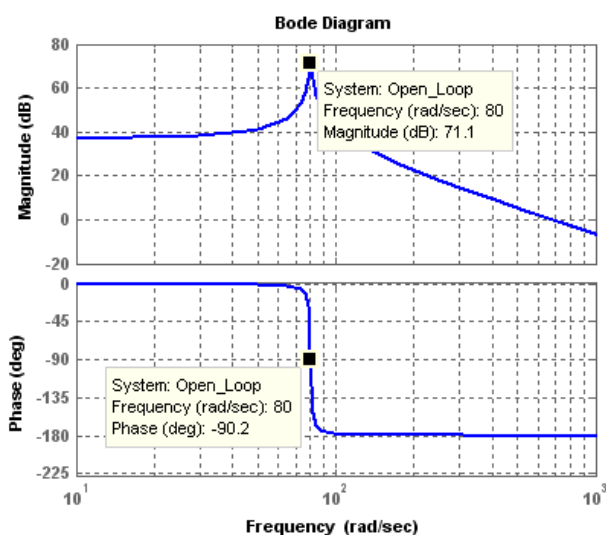


شکل ۶. شماتیک ساده یک پایدارساز FSM [۱۱]

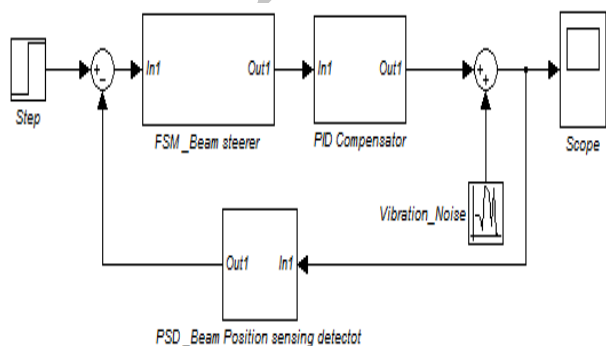
1. Beam-Splitter
2. Quad cell



شکل ۸. پاسخ پله تابع تبدیل FSM



شکل ۹. دیاگرام بُد تابع تبدیل FSM



شکل ۱۰. شماتیک کلی سیستم پایدار ساز خودکار

$$Y = \frac{(A+B)-(C+D)}{A+B+D+C} \quad (12)$$

سیگنال خطای نشانه‌گیری به کمک این مختصات ایجاد و پس از پردازش در بخش کنترل، ورودی محرک‌های FSM تولید می‌شود.

۷. شبیه‌سازی روش FSM

برای شبیه‌سازی و مطالعه این سیستم کنترلی نیازمند روابط ریاضی مکان‌یاب پرتو (روابط (۱۱) و (۱۲))، تابع انتقال هدایتگر پرتو و انتخاب یک روش جبران‌ساز برای کنترل‌کننده می‌باشیم. تابع انتقال FSM با استفاده از مستندات چند کارخانه سازنده و با بهره‌گیری از مدل مکانیکی جرم و فنر تهیه گردیده است [۱۲]. برای کنترل‌کننده نیز از جبران‌ساز PID استفاده شده است.

۱.۷. پاسخ پله و پاسخ فرکانسی هدایتگر پرتو FSM.

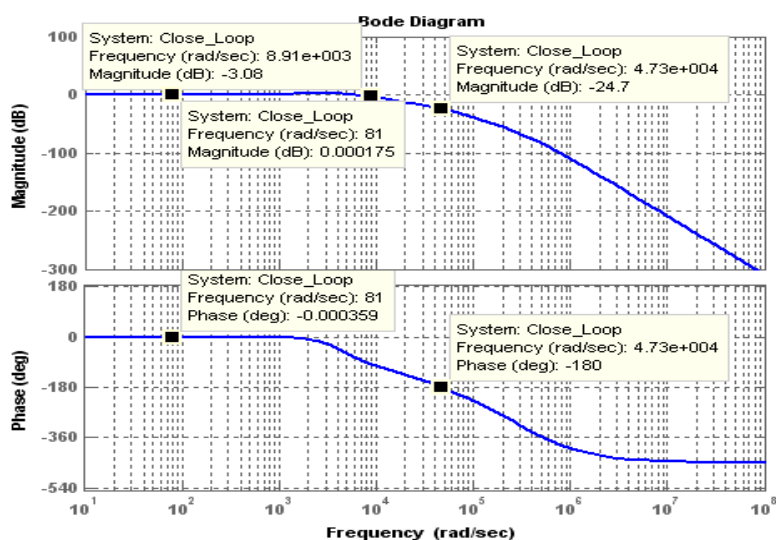
خارج از حلقه کنترلی

- پاسخ پله تابع تبدیل FSM: شکل ۸ پاسخ پله مدل شبیه‌سازی شده FSM را خارج از حلقه کنترلی نشان می‌دهد. می‌بینیم این مجموعه مکانیکی با ورودی پله، زمانی نسبتاً طولانی نوسان دارد لذا می‌تواند پاسخی نرم و سریع به محرک‌های ورودی داشته باشد.
- دیاگرام بُد تابع تبدیل FSM: در شکل (۹) دیاگرام بُد تابع تبدیل FSM نمایش داده شده است. سیستم FSM خارج از حلقه کنترلی با ورودی پله در فرکانس ۸۰ رادیان بر ثانیه نوسان می‌کند و فاز سیستم بین صفر و ۱۸۰ درجه جابه‌جا می‌شود که مؤید عکس‌العمل سریع FSM به ورودی‌ها می‌باشد.

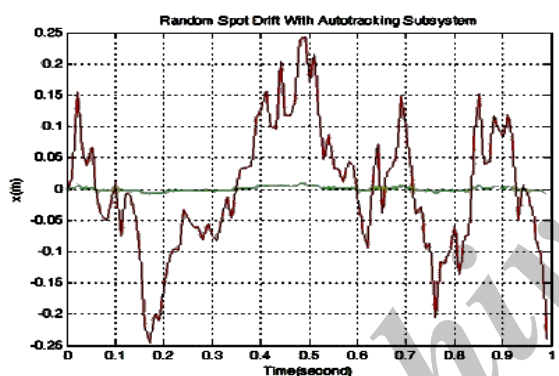
۸. شبیه‌سازی سیستم پایدار ساز خودکار با

جبران‌ساز PID، هدایتگر پرتو FSM و حسگر مکان‌یاب PSD

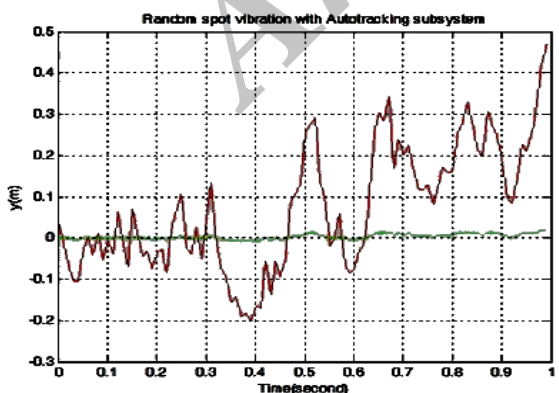
شکل (۱۰) بلوک دیاگرام شبیه‌سازی پایدار ساز خودکار را نشان می‌دهد. که شامل بلوک جبران‌ساز، بلوک FSM در مسیر پیشرو و یک بلوک PSD در مسیر فیدبک است. از تابع پله واحد به‌عنوان ورودی استفاده شده و سیگنال خطای نشانه‌گیری در انتهای مسیر پیشرو با کمک اعداد تصادفی شبیه‌سازی شده است.



شکل ۱۱. دیاگرام بُد سیستم پایدارساز خودکار



شکل ۱۳. دامنه ارتعاشات پرتو ورودی با و بدون استفاده از سیستم ردگیری خودکار روی محور x

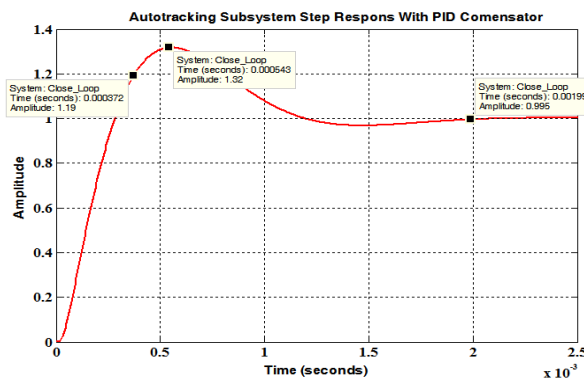


شکل ۱۴. دامنه ارتعاشات پرتو ورودی با و بدون استفاده از سیستم ردگیری خودکار روی محور y

شکل ۱۱ دیاگرام بُد سیستم پایدارساز را ترسیم نموده و نشان می‌دهد این سیستم کنترلی دارای حاشیه فاز ۱۷۹ درجه، حاشیه بهره حدود ۲۵dB و پهنای باند حدود ۱/۴ کیلوهرتز است و در نتیجه پایداری مطلوبی دارد.

در شکل ۱۲ پاسخ پله سیستم پایدارساز خودکار رسم شده است. با توجه به شکل مشخص است این سیستم پایدارساز خودکار، قادر است در زمانی حدود ۲ میلی‌ثانیه به حالت پایداری کامل رسیده و خطای نشانه‌گیری را جبران‌سازی نماید. با توجه به شکل، زمان صعود حدود ۳۷۰ میکرو ثانیه است که نشان می‌دهد سرعت ردگیری خودکار در پاسخ به ورودی‌ها مناسب است.

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ارتعاشات پرتو یک سیستم FSO با و بدون استفاده از سیستم ردگیری خودکار روی محورهای x و y به‌طور مجزا نشان داده شده است. بدون استفاده از سیستم ردگیری خودکار دامنه جابه‌جایی حدود ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۱۲. پاسخ پله سیستم پایدارساز خودکار با هدایتگر FSM

- [3] A. Chaman-Motlagh, V. Ahmadi, Z. Ghassemlooy, "A Modified Model of the Atmospheric Effects on The Performance of FSO Links Employing Single And Multiple Receivers", *Journal of Modern Optics*, Vol.57, No. 1, pp. 37-42, 2010.
- [4] H. Arnon and N.S. Kopeika, "Lase Satellite Communication Network Vibration Effect and Possible Solutions", 6-7, *Proceedings of The IEEE*, October, 1997
- [5] N. Kadir, A. I. Aziz, S. J. Chowdhury, Sa. Shamma and M. Tarique, "Performance Improvement of the Tracking System of a Satellite Lase Communication", 1-3, *International Journal of Computer Applications (0975-8887)*, Volume 26-No.6, 2011.
- [6] M. Borrello "A Multi Stage Pointing Acquisition and Tracking (PAT) Control System Approach For Air to Air Laser Communications", *American Control Conference*, Portland, USA, 2005.
- [7] T.H. Ho "Pointing, Acquisition, and Tracking Systems for Free-Space Optical Communication Link" *PhD. thesis*, University of Maryland, 2007.
- [8] V. Nikulin, R. Khandekar, J. Sofka, and G. Tartakovsk "Acousto-optic pointing and tracking systems for free-space laser Communications" *Optical Engineering Journal*, Vol. 40, No. 10, October 2001, pp.2208-2214
- [9] C. Valeriev Grigorov "Evaluation of coarse and fine Pointing Methodes for Free Space Optical Communication" *Master Thesis*, Lulea University of technology, 2008.
- [10] *Opics in Modern*, Beam Staiblizer, Revision D, Datasheet, 2006.
- [11] OSI Optoelectronics, PSD Characteristics, Datasheet, 1-3, 2011.
- [12] *Opics in Modern "Fast Steering Mirror User's Manual"* OIM100 series FSM Models OIM101, OIM102, OIM102.3, 1-11, 2006

وقتی از سیستم ردگیری خودکار استفاده شده، دامنه ارتعاشات پرتو بسیار کاهش یافته و از حدود ۲۰ سانتی‌متر به ۰/۲ میلی‌متر رسیده است.

۹. نتیجه گیری

با توجه به اهمیت و مزایای فراوان مخابرات FSO به عنوان یک شیوه ارتباطی امن و مقاوم در برابر تهدیدات جنگ الکترونیک و شنود و همچنین عملکرد ویژه آن در شرایط بحرانی و پدافندی، رفع چالش‌های اصلی این فناوری نوین از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله، هدایتگرهای پرتو قابل استفاده در سیستم ردگیری خودکار بررسی و مقایسه شده‌اند و نتیجه گرفته شده که روش FSM با محرک کوپل صوتی مناسب‌ترین روش می‌باشد و در نهایت با استفاده از روابط ریاضی و توابع تبدیل مکان‌یاب پرتو PSD، هدایتگر پرتو FSM و جبران‌ساز PID یک سیستم پایدارساز ردگیری خودکار جهت کاهش خطای نشانه‌گیری شبیه‌سازی و تحلیل شده است. به کمک نمودارهای پاسخ پله و مقایسه نوسانات پرتو، با و بدون سیستم ردگیری خودکار نشان داده شده است. این سیستم در زمانی در حدود ۲ میلی‌ثانیه به پایداری رسیده و قادر است ارتعاشات را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

۱۰. مراجع

- [1] M. Piruzmand, N. Torabi, A. Chaman-Motlagh "Evaluation of bit error in free space optical telecommunications using presence MIMO Turbolans, Eighteenth Conference on Optics and Photonics", Iran, Tabriz 2012 (in Persia)
- [2] M. Moffi, A. Chaman-Motlagh, "Support Network communication by optical free space communication systems and analyze their error rate", Fifth National Conference on Command and Control, Tehran, Iran 2012 (In Persian)