

علمی-پژوهشی

ارائه منظومه بهینه مدولاسیون مقاوم در شرایط آشفته‌گی اتمسفر

حامد احمدیان یزدی^۱، علی ناصری^{۲*}۱- پژوهشگر حوزه ارتباطات، ۲- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین^(ع)

(دریافت: ۹۸/۷/۱۰، پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۲)

چکیده

یکی از بسترهای ارتباطی که معمولاً در لایه‌های پشتیبان شبکه فرماندهی و کنترل از آن استفاده می‌شود، بستر ارتباط نوری فضای آزاد است. در این مقاله، مدولاسیون قطبش به منظور مقاوم‌سازی بستر ارتباطی نوری فضای آزاد در برابر اغتشاشات اتمسفری ارائه می‌شود. در این روش، به جای استفاده از روش‌های مرسوم مدولاسیون همچون دامنه، فاز و یا فرکانس، حالت‌های قطبش بر روی پرتو نوری مدوله می‌شوند. از آنجا که روش‌های مدولاسیون مرسوم به نوسانات آشفته‌گی بسیار حساس هستند، مدولاسیون قطبش نسبت به نویز فاز بیم لیزر مقاومت بالایی دارد و حالات قطبش را بر روی مسیر طولانی در فضای آزاد حفظ می‌کند. به‌طور کلی مدولاسیون قطبش باینری، حدود ۲ dB یا حتی بیشتر، از مدولاسیون‌های متداول بهتر عمل می‌کند. به‌طور خاص‌تر در این مقاله منظومه‌های مختلف مدولاسیون قطبش در کره پوانکاره ترسیم و عملکرد احتمال خطای آن‌ها در حالت‌های متفاوت قرارگیری، ارزیابی می‌شود. در نهایت حالات بهینه منظومه با توجه به شبیه‌سازی‌ها استخراج می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: آشفته‌گی اتمسفر، توزیع گاما-گاما، مدولاسیون کلیدزنی قطبش، مخابرات نوری فضای آزاد

۱- مقدمه

پیوندهای ارتباطی به شمار می‌روند. اغلب سامانه‌های فرکانس رادیویی (RF) سیگنال را در تمامی جهات پخش می‌کنند و این سیگنال در محدوده وسیعی توسط گیرنده قابل دریافت است. در صورتی که بر خلاف این سامانه‌ها، فرستنده و گیرنده‌های FSO، نور (پرتو لیزر) را به‌صورت دیدمستقیم (LOS) بر روی مسیر مستقیم انتشار می‌دهند. هم‌چنین پیوندهای FSO ظرفیت بالاتری نسبت به پیوندهای RF دارند. کاربردهای مختلفی برای سامانه‌های FSO وجود دارد که عبارت‌اند از: ارتباطات نهایی مخابراتی، ارتباطات بین ماهواره‌ای، ارتباطات زمین به ماهواره و... [۱].

در پیوندهای زمینی FSO، اطلاعات و داده‌ها از طریق تابش‌های نوری بر روی کانال‌های اتمسفری بین دو نقطه منتقل می‌شوند. اطلاعات انتقال‌یافته می‌توانند در شدت، فاز، فرکانس یا حالت قطبش جاسازی شوند. برای پیوندهای ارتباطی با برد بیشتر از ۱ کیلومتر، محیط فضای آزاد نسبت به تضعیف، پراکندگی و تلاطمات به شدت آسیب‌پذیر است. یکی از عواملی که عملکرد یک سامانه FSO را کاهش می‌دهد پدیده محوشوندگی یا سوسوزنی نور است که در نتیجه تغییر ضریب شکست لایه‌های هوایی رخ می‌دهد. تغییر ضریب شکست نیز در اثر تغییرات فشار و دمای هوا ایجاد می‌شود [۱].

از طرفی در یک سامانه بی‌سیم نوری، انتخاب روش مدولاسیون مناسب اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد که در تعیین مواردی همچون پهنای باند، راندمان توان و پیچیدگی طراحی

تعدد و تنوع مؤلفه‌های صحنه عملیات و از طرفی روابط پیچیده بین مؤلفه‌های، ضرورت بهره‌گیری از شبکه فرماندهی و کنترل را دوچندان نموده است. امروزه بروز فناوری‌های جدید از جمله اینترنت اشیاء و از طرفی تغییرات در فناوری‌های شبکه نظیر SDN، حجم زیاد ترافیک را در شبکه فرماندهی و کنترل رقم زده است. یکی از بسترهای ارتباطی که معمولاً در لایه‌های پشتیبان شبکه فرماندهی و کنترل از آن استفاده می‌شود، بستر مخابرات نوری فضای آزاد است که مزایای زیادی از جمله سرعت برقراری و پیاده‌سازی بالا را در اختیار شبکه قرار می‌دهد.

برای استفاده از طیف نوری نیازی به اخذ مجوز از سازمان‌های ذی‌ربط نیست و این طیف اغلب بدون استفاده است. مخابرات نوری فضای آزاد (FSO) با استفاده از این طیف، پهنای باندی با سرعت بالا را که در حدود تراهرتز است، ارائه می‌دهد [۱]. از مزایای این شبکه‌ها می‌توان به کوچک‌تر بودن فرستنده‌ها و گیرنده‌ها، کاهش هزینه نصب و راه‌اندازی، ایمنی بسیار بالا در برابر تداخلات الکترومغناطیسی اشاره کرد؛ هم‌چنین در مسافت‌های کوتاه، استفاده از فناوری مخابرات نوری فضای آزاد نسبت به ارتباطات بر بستر فیبر نوری به صرفه‌تر است. علاوه بر این پیوندهای FSO به دلیل مشخصات ضدتداخلی، جزء امن‌ترین

*رایانامه نویسنده پاسخگو anaseri@ihu.ac.ir

بهبود یابد. آشکارسازی همدوس نیازمند سنکرون‌سازی دقیق و همچنین تخمین کانال است که یکی از دشواری‌های این روش نسبت به IM/DD است [۵]. در نهایت با توجه به پیچیدگی گیرنده همدوس نسبت به IM/DD و با توجه به مزیت‌های آن و مقاومت در برابر نویز فاز و شرایط اتمسفری مختلف، در این مقاله از روش همدوس برای آشکارسازی سیگنال‌های ارسالی استفاده می‌گردد.

به‌جای استفاده از روش‌های قدیمی مدولاسیون دامنه، فاز و فرکانس، امکان پیاده‌سازی مدولاسیون به‌صورت خارجی بر روی پرتوی نوری نیز وجود دارد. با اعمال این روش، ابعاد دیگری از ویژگی‌های نور همانند حالت‌های قطبش نسبت به روش‌های مرسوم مدوله می‌شوند؛ که به آن PolSK اطلاق می‌شود [۶]. روش PolSK به‌عنوان یک روش مدولاسیون جایگزین برای هر دو روش مدولاسیون مبتنی بر دامنه و فاز پیشنهاد شده است. اطلاعات دیجیتال در حالت قطبش منبع لیزر کدگذاری می‌شوند [۷]. برای بیان حالات قطبش از پارامترهای Stokes استفاده می‌شود. در نتیجه منظومه نمونه بر روی یک فضای سه‌بعدی پراکنده می‌شود. روش PolSK، نسبت به نویز فاز لیزر ایمنی بالایی دارد و حالات قطبش را بر روی یک پیوند انتشاری با طول زیاد حفظ می‌کند [۸].

در این مقاله، ضمن بررسی تحقیقات صورت گرفته بر روی انواع مدولاسیون‌های مختلف، مقایسه نسبی بین روش‌های مدولاسیون متداول OOK، BPSK و مدولاسیون قطبش باینری انجام می‌گیرد و به‌طور خاص‌تر منظومه‌های مختلف در مدولاسیون قطبش M تایی در کره پوانکاره ترسیم و عملکرد احتمال خطای آن‌ها در حالت‌های مختلف قرارگیری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نتیجه می‌توان حالت قرارگیری بهینه را با توجه به شبیه‌سازی‌هایی که انجام می‌گیرد، استخراج و بهره‌برداری کرد.

در ادامه و در بخش دوم، به توصیف مدولاسیون قطبش و بیان انواعی از مدولاسیون‌های چند سطحی با استفاده از پارامترهای Stokes پرداخته می‌شود. در بخش سوم، ساختار و عملکرد یک سامانه M تایی از فرستنده تا گیرنده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش چهارم نیز نتایج حاصل از مدولاسیون قطبش نوری در شرایط اتمسفری مختلف آورده می‌شود.

۲- مدولاسیون قطبش

روش‌های مدولاسیون بسیاری مبتنی بر IM/DD برای سامانه‌های FSO گزارش شده است. با این حال، عملکرد روش‌های مدولاسیون شدت، به نوسانات آشفتگی بسیار حساس هستند؛ بنابراین برای

فرستنده و گیرنده، تأثیر مستقیم دارد. روش‌های مدولاسیون دیجیتال در انتقال نوری به دلایل مختلفی از جمله عملکرد، سازگاری با دنیای دیجیتال، توانایی کدگذاری، رمزگذاری، فشرده‌سازی و پردازش سیگنال سخت و نرم، مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در جدول (۱) روش‌های مختلف مدولاسیون و انواع آن بیان شده است. در روش مدولاسیون OOK که از نوع آشکارسازی مستقیم با مدولاسیون شدت (IM/DD) است، دامنه حامل به نسبت دامنه سیگنال مدولاسیون تغییر می‌کند. روش OOK یکی از روش‌های متداول مدولاسیون برای سامانه‌های FSO است که به دلیل بازدهی مناسب پهنای باند و سادگی در پیاده‌سازی مورد توجه قرار گرفته است [۲]. با این حال، عملکرد OOK در کانال آشفته با روش آستانه‌گذاری ثابت، بهینه نیست. سطح آستانه نیاز به تغییر متناسب با نوسانات تابشی و نویز دارد که در نتیجه باید روش آستانه‌گذاری وفقی در گیرنده اتخاذ شود. این موضوع پیچیدگی سامانه را افزایش می‌دهد [۳].

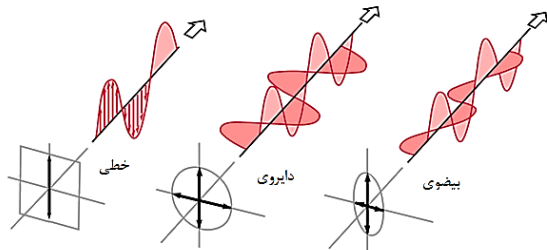
جدول (۱): انواع روش‌های مدولاسیون.

--	PSK	آشکارسازی همدوس
--	ASK	
--	PolSK	
NRZ-OOK, RZ-OOK	OOK	آشکارسازی مستقیم / مدولاسیون شدت (IM/DD)
PSK-SIM, FM-SIM, AM-SIM, OFDM	SIM	
PPM, PAM, PWM, ...	PSM	

در روش PSK، اطلاعات، با شیفت فاز حامل سینوسی انتقال می‌یابند. روش مدولاسیون PSK به هیچ‌گونه آستانه‌گذاری وفقی نیاز ندارد و در شرایط آشفته نیز موجب بهبود عملکرد می‌شود. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که مدولاسیون PSK مشکلات سنکرون‌سازی در یک محیط پراکنده را دارد. در محیط پراکنده مسیرهای مختلفی برای انرژی انتقالی وجود دارد. روش مدولاسیون فاز به‌شدت به نویز فاز حساس است؛ بنابراین نیازمند سنکرون‌سازی فاز پیچیده در گیرنده است [۳].

با مقایسه گیرنده‌های همدوس و آشکارسازی مستقیم می‌توان نتیجه گرفت که در آشکارسازی به روش همدوس، حساسیت اسپلاتور محلی (LO) با حساسیت گیرنده محدود به نویز ضربه‌ای یکسان است. زیرا بهره سیگنال ارائه شده توسط LO، نویز ضربه‌ای را القاء می‌کند که منبع غالب است [۴]. همچنین یک گیرنده همدوس تنها مؤلفه‌هایی از قطبش سیگنال نوری دریافتی را انتخاب می‌کند که منطبق بر قطبش اسپلاتور محلی باشد و سایر قطبش‌ها را حذف می‌کند. در مقایسه با سامانه IM/DD، حساسیت گیرنده می‌تواند با استفاده از تشخیص فاز

نوسانات ضریب شکست محیط انتشار دچار تغییراتی نیز می‌شوند. مقدار تغییرات در زاویه قطبش به تغییر در ضریب شکست محیط بستگی دارد که ضریب شکست خود نیز به ارتفاع وابسته است.



شکل (۱): انواع روش‌های قطبی‌شدگی.

جدول (۲): انواع قطبش با توجه به رابطه (۳) [۹].

قطبش بیضوی	قطبش دایروی	قطبش خطی
$A_x \neq A_y$ $\phi \neq \{0, \pi, \pm\pi/2\}$	$A_x = A_y$ $\phi = +\frac{\pi}{2}$ دایروی راست‌گرد	یا $A_x = 0$ $A_y = 0$
	$A_x = A_y$ $\phi = -\frac{\pi}{2}$ دایروی چپ‌گرد	$A_x = \pm A_y$ یا $\phi = \{0, \pi\}$ خطی با زاویه آفست $\pm 45^\circ$ درجه

برای توصیف حالات قطبش از بردار Stokes که به نوعی بیانگر شدت هستند، استفاده می‌شود. پارامترهای Stokes به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۰]:

$$S_0 = (A_x^2 + A_y^2) / 2 \quad (۴)$$

$$S_1 = (A_x^2 - A_y^2) / 2 \quad (۵)$$

$$S_2 = A_x A_y \cos \phi \quad (۶)$$

$$S_3 = A_x A_y \sin \phi \quad (۷)$$

که S_0 نشان‌دهنده شدت نوری و S_1 نشان‌دهنده اختلاف شدت بین مؤلفه‌های قطبیده شده افقی و عمودی است. برای $S_1 > 0$ ، میدان الکتریکی به‌طور افقی (در جهت \vec{x}) و برای $S_1 < 0$ ، میدان الکتریکی به‌طور عمودی (در جهت \vec{y}) قطبیده می‌شود. S_2 مثبت، قطبش خطی $+45^\circ$ و S_2 منفی قطبش خطی -45° را نشان می‌دهد. S_3 مثبت، قطبش دایروی راست‌گرد (RHC) و S_3 منفی قطبش دایروی چپ‌گرد (LHC) را نشان می‌دهد.

بهبود عملکرد پیوند در گیرنده، روش آشکارسازی تطبیقی همانند گیرنده OOK که از یک آستانه تطبیقی در کانال آشفته FSO استفاده می‌کند، مورد نیاز است.

در مرجع [۶] یکی از روش‌های PolSK که از مدولاسیون خارجی استفاده می‌کند، معرفی شده است. در این روش از حالت قطبش پرتو قطبیده شده، به‌منظور بهره‌برداری از دو کانال متعامد در سامانه FSO استفاده می‌شود. هنگامی که پرتوهای نوری از طریق کانال آشفته انتشار می‌یابند، حالت‌های قطبش پایدارترین ویژگی در مقایسه با دامنه و فاز سیگنال هستند. نتایج عملی نشان می‌دهد که حالت‌های قطبش می‌توانند بر روی یک پیوند انتشاری طولانی حفظ شوند. در مرجع [۹] نشان داده شده است که روش PolSK عملکرد بهتری را نسبت به روش‌های مرسوم پیرامون پیوند ارتباطی ارائه می‌دهد؛ اما هزینه این بهبود عملکرد، افزایش پیچیدگی سامانه در مقایسه با روش OOK است. علاوه بر این، روش PolSK به‌طور قابل توجهی به نویز فاز منبع لیزر در گیرنده غیر حساس است، به‌طوری‌که برای جلوگیری از تبدیل نویز فاز به دامنه باید پهنای باند فیلتر فرکانس میانی (IF) به اندازه کافی بزرگ باشد.

قطبش یک سیگنال الکترومغناطیسی، حرکت بردار میدان الکتریکی در یک نقطه از فضا را بیان می‌کند که از آن نقطه موج انتشار می‌یابد. با انتشار نور در راستای محور Z ، دامنه‌های میدان در راستای محور افقی و محور عمودی، با استفاده از معادلات پارامتری زیر توصیف می‌شوند [۱۰]:

$$\vec{E}_x = A_x e^{j(\omega t - k\hat{z})} \cdot \vec{x} \quad (۱)$$

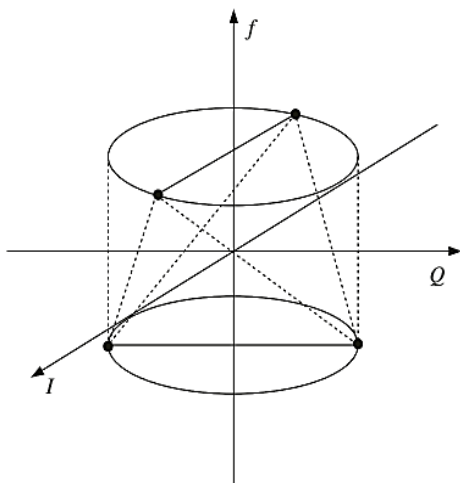
$$\vec{E}_y = A_y e^{j(\omega t - k\hat{z} + \phi)} \cdot \vec{y} \quad (۲)$$

که در روابط فوق E میدان الکتریکی، A دامنه میدان الکتریکی رونده در راستای Z است. برای توصیف قطبش میدان الکتریکی با استفاده از یک معادله، طبق روابط (۱) و (۲) داریم:

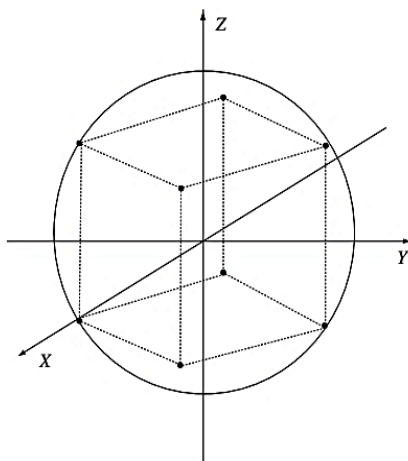
$$\frac{\vec{E}_x^2}{A_x^2} + \frac{\vec{E}_y^2}{A_y^2} - \frac{2\vec{E}_x \cdot \vec{E}_y}{A_x A_y} \cos \phi = \sin^2 \phi \quad (۳)$$

پوش بردار میدان الکتریکی طبق جدول ۲ می‌تواند به سه صورت قطبش خطی، دایروی و بیضوی بیان شود. در شکل ۱ نیز انواع مختلفی از قطبش رسم شده است.

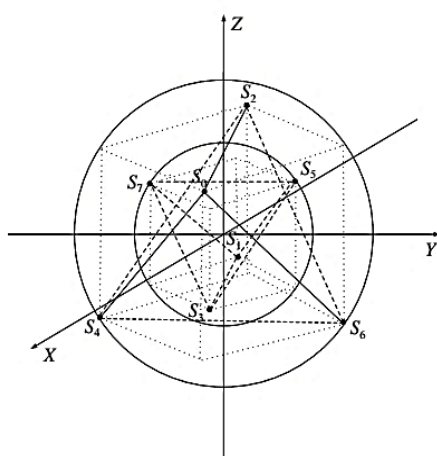
میدان الکتریکی رونده در رژیم آشفته به دو مؤلفه با محورهای قطبش افقی و عمودی در صفحه تابش تقسیم می‌شود. در خروجی ناحیه آشفته‌گی، مؤلفه‌های میدان الکتریکی با توجه به



الف) منظومه چهارتایی هرمی

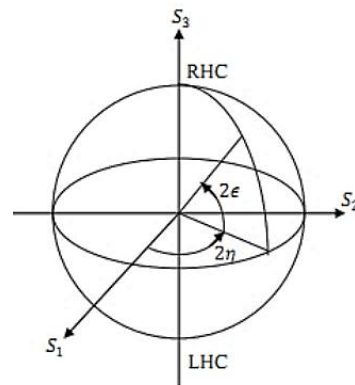


ب) منظومه هشت تایی مکعبی



ج) هشت تایی هرمی

شکل (۳): نمایش منظومه نگاشت‌های مختلف ۴ تایی و ۸ تایی بر روی کره پوانکاره [۱۴].



شکل (۲): کره پوانکاره [۱۱].

در میدان الکتریکی با توان ثابت، پارامترهای Stokes به‌عنوان مختصات دکارتی یک نقطه $P(S_1, S_2, S_3)$ بر روی یک کره با شعاع S_0 که کره پوانکاره نامیده می‌شود، در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. نقطه P روی کره، به‌طور کامل توسط دو مختصات زاویه‌ای $\{\eta, \epsilon\}$ با شعاع ثابت شناسایی می‌شود. برای درک بهتر در شکل (۲) کره پوانکاره ترسیم شده است. نحوه نگاشت به کره پوانکاره و آشکارسازی سیگنال‌ها بدین صورت است که ابتدا در فرایند کدگذاری، سطح کره به n ناحیه مجزا تقسیم می‌شود. سپس به هر ناحیه یک بردار نماینده طبق رابطه (۸) تخصیص داده شده و با انتخاب تابع کدگذاری مناسب، ورودی به مجموعه بردارهای مرجع نگاشت داده می‌شود [۱۰].

$$E: \{1, 2, \dots, n\} \rightarrow \vec{S}_1, \vec{S}_2, \dots, \vec{S}_n \quad (8)$$

فرایند کدگذاری نیز به صورت زیر انجام می‌گیرد:

$$i = \max_j \{ \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \} \quad (9)$$

$$D: \vec{S} \rightarrow i$$

که در ساده‌ترین حالت برای مدولاسیون PolSK باینری داریم: $E: \{0,1\} \rightarrow \{(0,0,1), (0,0,-1)\}$. این مدل را می‌توان به منظومه دلخواه N تایی نیز تعمیم داد. در شکل (۳)، منظومه نگاشت‌های مختلف ۴ تایی و ۸ تایی بر روی کره پوانکاره به‌عنوان مثال ترسیم شده است [۱۴].

۳- مدولاسیون چند سطحی PolSK

توزیع آماری تابش دریافتی و شناخت رفتار آن در آشفتگی اتمسفر، برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان سامانه‌های نوری، حائز اهمیت است. مدل‌سازی ریاضی کانال‌ها با نوسانات تابشی اغلب به صورت لگ-نرمال و مدل گاما-گاما است که به ترتیب متناظر با رژیم‌های ضعیف و ضعیف به قوی هستند.

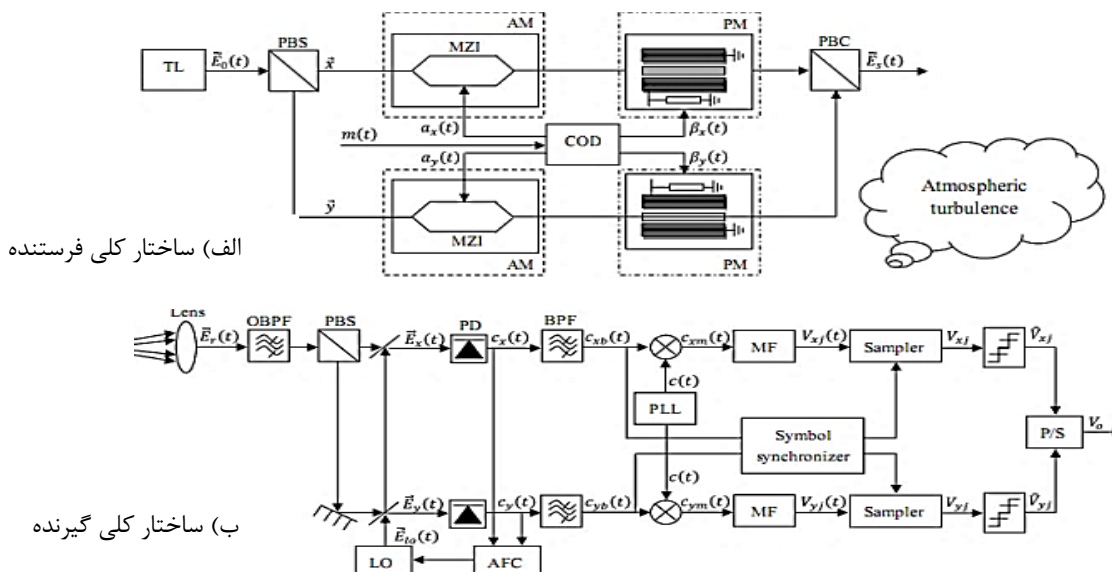
قالب‌های مختلفی برای مدولاسیون چند سطحی در سامانه‌های انتقال نوری طراحی شده است. طرح‌های مدولاسیون چند سطحی با استفاده از دستگاه‌های الکترونیکی و اپتوالکترونیکی، نرخ داده بالاتری نسبت به مدولاسیون‌های باینری ارائه می‌دهند [۱۳]. مدولاسیون‌های دیجیتال چند سطحی مانند PSK و مدولاسیون دامنه چهارگانه، به‌طور معمول در مخابرات نوری برای کدگذاری بیت‌های مختلف موجود در سمبل استفاده می‌شوند. مدولاسیون PolSK می‌تواند با ASK و PSK ترکیب شود و بدون نیاز به کنترل پویای قطبش در گیرنده، با به‌کارگیری روش‌های شناسایی چند سطحی الکترونیکی، دمدوله شوند [۱۲].

به‌طور کلی در مدولاسیون چند سطحی قطبش، بیم لیزر در زاویه $\pi/4$ نسبت به محور اصلی فرستنده، به‌صورت خطی قطبی شده است. بیمی که به‌صورت خطی قطبی شده است به سمت شکاف دهنده قطبش بیم (PBS) می‌رود. در این حالت، حالات قطبش افقی (قطبش \bar{x}) و عمودی (قطبش \bar{y}) دارای دامنه یکسان و اختلاف‌فاز صفر می‌شوند. هر دو مؤلفه قطبی شده متعامد، قبل از وارد شدن به ترکیب‌کننده قطبش بیم به‌طور هم‌زمان، به روش دامنه و فاز مدوله‌شده‌اند [۱۳]. میدان نوری منتشرشده از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲]:

$$\vec{E}_s(t) = \sqrt{\frac{P_L}{2}} e^{i(\omega t + \varphi(t))} \begin{Bmatrix} a_x(t) e^{i\beta_x(t)} \cdot \bar{x} \\ + i a_y(t) e^{-i\beta_y(t)} \cdot \bar{y} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

۳-۱- ساختار فرستنده و گیرنده مبتنی بر مدولاسیون قطبش

در ادامه ساختار فرستنده و گیرنده مبتنی بر مدولاسیون قطبش در شکل (۴) آورده شده است.



شکل (۴): ساختار کلی فرستنده (الف) و گیرنده (ب) مخابرات نوری بر اساس مدولاسیون قطبش [۱۲].

از آنجایی که مدل گاما-گاما همه رژیم‌های آشفته‌گی اتمسفر را پوشش می‌دهد، برای ارزیابی عملکرد پیوند FSO مورد بحث قرار می‌گیرد. تابع توزیع چگالی احتمال برای کانال‌هایی با توزیع گاما-گاما به‌صورت زیر است [۱۲]:

$$p(P_r) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} P_r^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta P_r}) \quad (10)$$

که در آن، $K_n(\cdot)$ نشان‌دهنده تابع بسل اصلاح‌شده نوع دوم با مرتبه n است و $\Gamma(\cdot)$ تابع گاما را نشان می‌دهد. با فرض اینکه در گیرنده، پرتوی نوری یک موج تخت است؛ دو پارامتر α و β از طریق مدل‌هایی برای سوسوزنی مقیاس بزرگ و مقیاس کوچک مطابق روابط زیر به شرایط اتمسفری مربوط می‌شوند [۱۲]:

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.49\sigma_I^2}{(1+1.11\sigma_I^{12/5})^{7/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (11)$$

$$\beta = \left[\exp\left(\frac{0.51\sigma_I^2}{(1+0.69\sigma_I^{12/5})^{5/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (12)$$

که σ_I^2 بیانگر واریانس Rytov است. به‌طور معمول آشفته‌گی قوی با پارامترهای $\alpha = 4.2, \beta = 1.4$ ، آشفته‌گی متوسط با $\alpha = 11.6, \beta = 10.1$ و آشفته‌گی ضعیف با $\alpha = 4, \beta = 1.9$ مشخص می‌شوند.

از آنجا که پیوند FSO تحت بررسی به صورت دید مستقیم است، با توجه به انتشار چندمسیری، تداخل بین سمبلی (ISI) در نظر گرفته نمی‌شود. نویز مجموعه نیز (تابش پس‌زمینه، نویز حرارتی و نویز ضربه‌ای) به‌عنوان فرآیند AWGN مدل‌سازی می‌شود.

که در آن، $n_x, n_y \sim N(0, \sigma_n^2)$ است. $\omega_{IF} = \omega - \omega_{lo}$ و $\varphi_{IF} = \varphi_r - \varphi_{lo}$ به ترتیب فرکانس مرکزی و نویز فاز هستند. از طرفی با توجه به اینکه تمامی تجهیزات ایده آل فرض می‌شوند، نویز فاز ناشی از اسپلاتور محلی قابل صرف نظر کردن است.

با ضرب سیگنال‌های الکتریکی $c_x(t)$ و $c_y(t)$ در سیگنال حامل محلی که توسط مدار حلقه فاز قفل شده تولید شده‌اند، خروجی ترکیب‌کننده‌ها با عبور از فیلتر وقتی یکسان (به‌منظور رد کردن مؤلفه‌های فرکانس بالا) به‌صورت $V_{xj}(t)$ و $V_{yj}(t)$ بیان می‌شود [۱۲]:

$$V_{xj}(t) = \Re \sqrt{P_r P_{lo} / 2} a_x \cos(\beta_x(t)) \times \cos[\Delta\varphi(t)] + n'_x(t) \quad (19)$$

$$V_{yj}(t) = \Re \sqrt{P_r P_{lo} / 2} a_y \cos(\beta_y(t)) \times \cos[\Delta\varphi(t)] + n'_y(t) \quad (20)$$

که $\Delta\varphi = \varphi_{IF}(t) - \varphi_{PLL}(t)$ خطای ردیابی فاز است. $V_{xj}(t)$ و $V_{yj}(t)$ از یک نمونه‌بردار با زمان نمونه‌برداری $t = T$ عبور می‌کند که T دوره تناوب سمبل است. خروجی نمونه‌بردار طبق روابط زیر حاصل می‌شود [۱۲]:

$$V_{xj}(t) = \pm \Re \sqrt{P_r P_{lo} / 2} a_x \cos[\Delta\varphi(t)] + n'_x(t) \quad (21)$$

$$V_{yj}(t) = \pm \Re \sqrt{P_r P_{lo} / 2} a_y \sin[\Delta\varphi(t)] + n'_y(t) \quad (22)$$

۳-۲- احتمال خطا

برای سیگنال‌هایی با احتمال یکسان، قانون تصمیم‌گیری که معیارهای همبستگی را بیشینه می‌کند، برای تعیین متوسط احتمال خطا بکار می‌رود. به‌عبارت‌دیگر، تصمیم‌گیری باید با مقایسه V_j با سطوح آستانه مختلف و انتخاب سطح دامنه مناسب انجام گیرد. فرض می‌شود که تمام سطوح دامنه احتمال پیشین یکسانی دارند؛ بنابراین یک خطا زمانی شناسایی می‌شود که سمبل نویزی از نصف فاصله بین سطوح دامنه مجاور تجاوز کند. با فرض خطای ردیابی فاز $\Delta\varphi = 0$ ، خروجی دمدولاسیون از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$V_{xj}(t) = \pm \Re \sqrt{P_r P_{lo} / 2} a_x \cos(\beta_x(t)) \times \cos(\omega_{IF} t + \varphi_{IF}(t)) + n'_x(t) \quad (23)$$

که در آن، $n'_x \sim N(0, \sigma_n^2)$ است. متوسط توان در هر بیت نیز از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱]:

در سمت فرستنده برای مدوله کردن موج با دو قطبش متفاوت از ترکیب مدولاتورهای دامنه و فاز استفاده می‌گردد. خروجی سیگنال پس از اعمال مدولاسیون و پس از عبور از ترکیب‌کننده پرتو (رابطه ۱۳) بر روی کانال فضای آزاد ارسال می‌شود. با ارسال سیگنال بر روی کانال، سیگنال ارسالی تحت تأثیر آشفتگی‌های جوی قرار می‌گیرد. در سمت گیرنده، لنزهای موجود در گیرنده نور تابشی را دریافت می‌کنند.

$$\vec{E}_r(t) = \sqrt{\frac{P_r}{2}} e^{i(\omega t + \varphi_r(t))} \left\{ \begin{array}{l} a_x(t) e^{i\beta_x(t)} \cdot \vec{x} \\ + i a_y(t) e^{-i\beta_y(t)} \cdot \vec{y} \end{array} \right\} \quad (14)$$

که P_r و φ_r به ترتیب توان نوری دریافتی و نویز فاز لیزر در اثر انتشار در محیط آشفته اتمسفر هستند. میدان الکتریکی $\vec{E}_r(t)$ با استفاده از PBS به دو مؤلفه \vec{x} و \vec{y} تقسیم شده و سپس با میدان‌های نوری ارسال می‌شود. با ارسال سیگنال بر روی کانال، سیگنال ارسالی تحت تأثیر آشفتگی‌های جوی قرار می‌گیرد. در سمت گیرنده، لنزهای موجود در گیرنده نور تابشی را دریافت می‌کنند. اسپلاتور محلی در محورهای \vec{x} و \vec{y} ترکیب می‌شوند؛ بنابراین، میدان‌های نوری $\vec{E}_x(t)$ و $\vec{E}_y(t)$ حاصل شده از روابط زیر به‌دست می‌آیند [۱۲]:

$$\vec{E}_x(t) = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{P_r}{2}} a_x(t) e^{i(\omega t + \varphi_r(t) + \beta_x(t))} \\ + \sqrt{\frac{P_{lo}}{2}} e^{i(\omega_{lo} t + \varphi_{lo}(t))} \end{array} \right\} \cdot \hat{x} \quad (15)$$

$$\vec{E}_y(t) = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{P_r}{2}} a_y(t) e^{i(\omega t + \varphi_r(t) + \beta_y(t) - \frac{\pi}{2})} \\ + \sqrt{\frac{P_{lo}}{2}} e^{i(\omega_{lo} t + \varphi_{lo}(t))} \end{array} \right\} \cdot \hat{y} \quad (16)$$

پس از عبور میدان‌های فوق از دو آشکارساز نوری یکسان و فیلتر میان‌گذر الکتریکی، عبارات ثابت فیلتر شده و نویز جمع‌شونده محدود می‌گردد. فرض می‌شود که فیلترهای میان‌گذر الکتریکی ایده آل هستند به طوری که تنها سیگنال‌های فرکانس میانی را بدون هیچ اعوجاجی عبور می‌دهند. جریان‌های الکتریکی بر روی کانال‌های \vec{x} و \vec{y} پس از عبور از فیلتر میان‌گذر الکتریکی به‌صورت زیر حاصل می‌شوند [۱۲]:

$$c_x(t) = \Re \sqrt{P_r P_{lo} / 2} a_x \cos(\beta_x(t)) \times \cos(\omega_{IF} t + \varphi_{IF}(t)) + n_x(t) \quad (17)$$

$$c_y(t) = \Re \sqrt{P_r P_{lo} / 2} a_y \cos(\beta_y(t)) \times \sin(\omega_{IF} t + \varphi_{IF}(t)) + n_y(t) \quad (18)$$

به احتمال خطای بیت برای آشفته‌گی‌های مختلف در اتمسفر در چند منظومه با مدولاسیون قطبش مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مقایسه بهتر هر منظومه، با شبیه‌سازی سامانه به روش مونت-کارلو در نرم افزار متلب، احتمال خطای بیت در حالت کانال AWGN و کانال محوشدگی با توزیع گاما-گاما که یکی از متداول‌ترین توزیع‌های کانال نوری است، آورده شده است.

نحوه انجام شبیه‌سازی منظومه‌های مختلف و احتمال خطای به صورت سلسله مراتبی زیر است:

- تولید بیت‌های تصادفی
- تولید میدان‌های نوری و نگاشت آنها به کره پوانکاره
- نگاشت بیت‌ها بر روی کره با منظومه‌های مختلف
- عبور اطلاعات از کانال با وجود آشفته‌گی و عدم آشفته‌گی در اتمسفر
- دریافت اطلاعات و تصمیم‌گیری با معیار بیش‌ترین شباهت
- محاسبه احتمال خطا

با توجه به عدم وابستگی شدید مدولاسیون قطبش به نویز فاز، در ادامه نتایجی برای احتمال خطای بیت سامانه در منظومه‌های مختلف آورده شده است. بدین منظور در ابتدا نگاشت‌های مختلف بر روی کره پوانکاره ترسیم می‌شود. نگاشت‌هایی که در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرند عبارت‌اند از منظومه ۴ تایی (شکل ۵-الف)، منظومه ۸ تایی مکعبی (شکل ۵-ب)، منظومه ۸ تایی هرمی (شکل ۵-ج)، منظومه ۱۶ تایی مکعبی (شکل ۵-د) و منظومه ۱۶ تایی هرمی (شکل ۵-ه). هر یک از منظومه‌های ذکر شده بر اساس روابط (۴) تا (۹) بر روی کره پوانکاره نگاشت می‌شوند.

در ادامه نتایج عملکرد سامانه بررسی می‌شود. بر اساس شکل (۶) که به ترتیب نشان‌دهنده احتمال خطای بیت در سه مدولاسیون مختلف BPSK، OOK و BPolSK در شرایط آشفته‌گی ضعیف و قوی اتمسفر است، در حالت سامانه‌های باینری BPolSK برای احتمال خطای بیت مشخص، حدود ۳ دسی‌بل (با بیشتر) بهتر از سامانه‌های OOK و BPSK عمل می‌کنند. با توجه به این دو شکل، مدولاسیون BPolSK همواره بهتر از مدولاسیون OOK (با آستانه ثابت) عمل می‌کند.

در مقایسه‌ای دیگر، در روش BPolSK به مدار بازبایی حامل در گیرنده نیازی نیست و هر دو سیگنال حامل و اطلاعات آغشته به نویز فاز می‌گردند؛

$$P_{av} = \frac{d^2 \Re^2 P_r P_{lo}}{2k \cdot 2^k} \sum_{k=1}^{M/2} (2k - 2^k - 1)^2 \quad (24)$$

$$= \frac{d^2 \Re^2 P_r P_{lo}}{6k} (2^{2k} - 1)$$

یک خطا زمانی آشکار می‌شود که n'_x از نصف فاصله بین سطوح دامنه مجاور تجاوز کند؛ بنابراین، احتمال خطای نمونه به صورت زیر حاصل می‌شود [۱۲]:

$$P_{ec} = \left(\frac{2^k - 1}{2^k} \right) P \left(|n'_x| > \sqrt{\frac{d^2 \Re^2 P_r P_{lo}}{2}} \right) \quad (25)$$

$$= \frac{2^k - 1}{2^{k-2}} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{d^2 \Re^2 P_r P_{lo}}{4\sigma_n^2}} \right)$$

$$= \frac{2^k - 1}{2^{k-2}} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3kP_{av}}{2\sigma_n^2 (2^{2k} - 1)}} \right)$$

$$= \frac{2^k - 1}{2^{k-2}} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3k\gamma}{(2^{2k} - 1)}} \right)$$

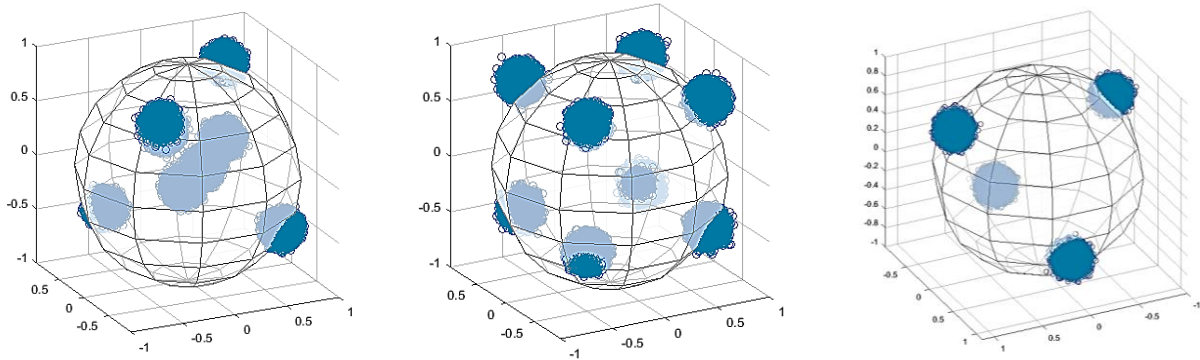
که $\gamma = P_{av} / 2\sigma_n^2$ متوسط SNR الکتریکی در هر بیت در خروجی دمدولاتور است.

در حالتی که خطای ردیابی فاز $\Delta\varphi \neq 0$ است، فرض می‌شود که حلقه قفل‌شده فاز می‌تواند تغییرات فاز ناشی از آشفته‌گی‌های اتمسفر را ردیابی کند و خطای فاز تولیدشده تنها به دلیل حلقه فاز قفل‌شده است. با توجه به فرض خطای ردیابی ثابت حلقه قفل‌شده فاز در دوره T ، احتمال خطای سمبل را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد [۱۲]: $\gamma_l = 1 / \sigma_\Delta^2$ نشان‌دهنده SNR حلقه قفل‌شده فاز است

$$P_e(P_r) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{2^k - 1}{2^{k-3}} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3k\gamma}{2^{2k} - 1} \cos^2(\Delta\varphi)} \right) \times \frac{e^{\gamma_l \cos(\Delta\varphi)}}{2\pi I_0(\gamma_l)} p(P_r) dP_r d\Delta\varphi \quad (26)$$

۴- شبیه‌سازی

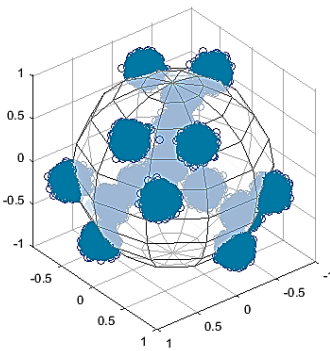
در این بخش، ابتدا نتایج مربوط به احتمال خطای بیت برای آشفته‌گی‌های مختلف در اتمسفر برای مدولاسیون‌های رایج OOK و BPSK آورده شده و با مدولاسیون قطبش باینری (BPolSK) مقایسه‌ای صورت گرفته است. بدین منظور با استفاده از روابط مربوط به دو مدولاسیون OOK و BPSK در مرجع [۳] و رابطه (۲۴) مقاله، احتمال خطای سه نوع مدولاسیون مختلف در نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. در ادامه آن، نتایج مربوط



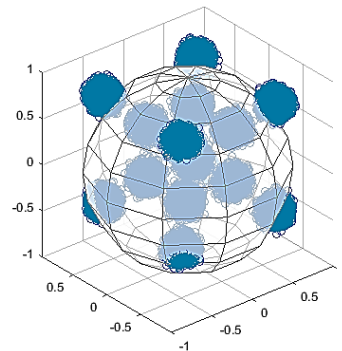
(ج) منظومه ۸ تایی هرمی

(ب) منظومه ۸ تایی مکعبی

(الف) منظومه ۴ تایی هرمی

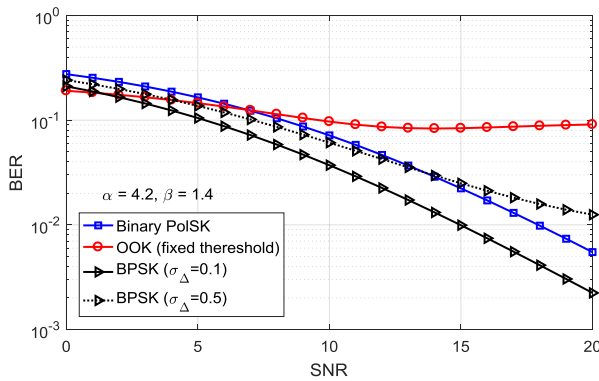


(ه) منظومه ۱۶ تایی هرمی

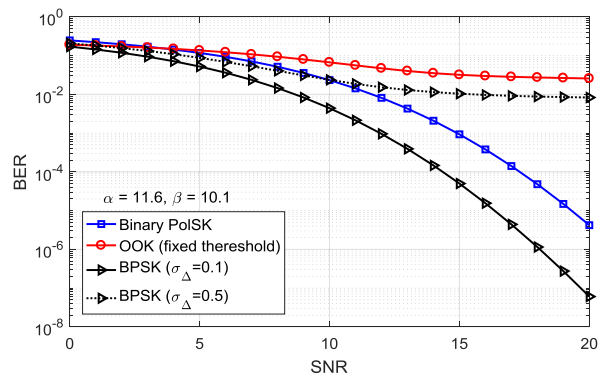


(د) منظومه ۱۶ تایی مکعبی

شکل (۵): نمایش منظومه‌های مختلف در مدولاسیون کلیدزنی قطبش بر روی کره پوانکاره.



(ب) شرایط آشفستگی قوی اتمسفر

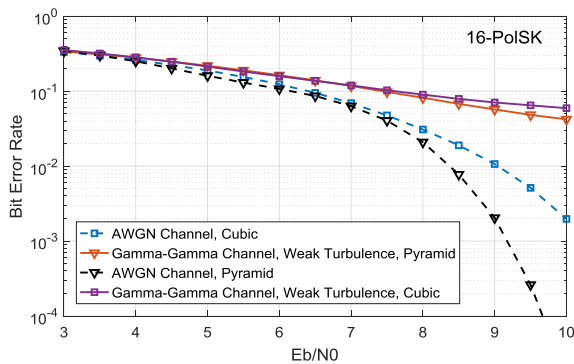


(الف) شرایط آشفستگی ضعیف اتمسفر

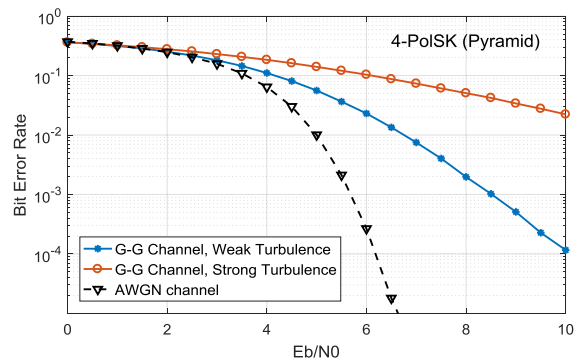
شکل (۶) مقایسه نرخ خطای بیت در سه مدولاسیون مختلف OOK, BPSK و BPolSK در شرایط آشفستگی (الف) ضعیف اتمسفر و (ب) شدید اتمسفر

در شکل (۷)، احتمال خطای بیت بر حسب نسبت انرژی بیت ارسالی به نویز آن برای منظومه چهارتایی که بر روی کره پوانکاره مطابق شکل (۵-الف) نگاشت می‌شوند، ترسیم شده است. با مقایسه دو حالت کانال بدون محوشدگی و محوشدگی در شرایط تلاطمات ضعیف جوی، برای احتمال خطای بیت مشخص 10^{-4} ، بیت‌های ارسالی حدود ۴ دسی‌بل به انرژی بیشتری برای ارسال نیاز دارند.

اما در روش BPSK به دلیل وجود خطاهای ردیابی فاز بازدهی توانی کاهش می‌یابد به طوری که به هنگام کوچک بودن واریانس خطای فاز ($\sigma_{\Delta} = 0/1$) کاهش بازدهی توانی نادیده گرفته می‌شود و برای مقادیر بالاتر واریانس نویز فاز، سطح BER جابه‌جایی قابل توجهی در جهت تضعیف عملکرد سامانه دارد. با دقت در نیز می‌توان به این نتیجه پی برد که در صورت ایده‌آل نبودن PLL و وجود خطای فاز، عملکرد سامانه می‌تواند به مراتب کمتر از BPolSK به خصوص در SNRهای بالا شود.



شکل (۹): احتمال خطای بیت بر حسب نسبت انرژی بیت به نویز دریافتی در حالت منظومه ۱۶ تایی.



شکل (۷): احتمال خطای بیت بر حسب نسبت انرژی بیت به نویز دریافتی در حالت منظومه ۴ تایی.

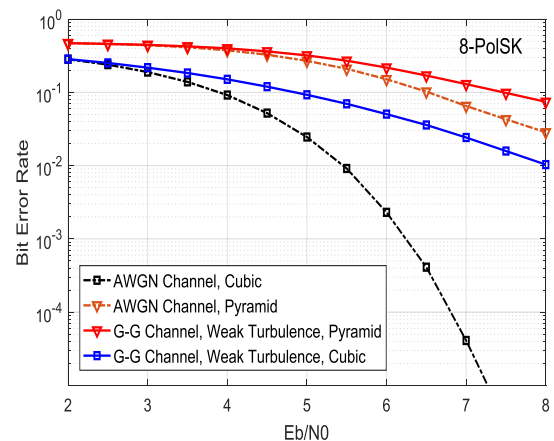
به‌طور کلی، با دقت در شکل‌های (۹-۷) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سطوح قطبش یا به عبارتی تعداد سمبل‌های نگاشت شده به‌طور مجزا در کره پوانکاره، احتمال خطای بیت سامانه افزایش پیدا می‌کند. علت افزایش احتمال خطای بیت سامانه با افزایش تعداد سطوح قطبش در کره پوانکاره، کوچک‌تر شدن نواحی تصمیم‌گیری برای هر سطح قطبی شده است به طوری که با کوچک‌تر شدن نواحی تصمیم‌گیری احتمال به خطا رفتن بیت‌های ارسالی در اثر نویز و محوشدگی کانال بیشتر می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

تحقیقات بسیاری بر روی انواع مدولاسیون‌های مختلف در مخابرات نوری فضای آزاد انجام گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیقات حاکی از آن است که نویز فاز در مدولاسیون جابه‌جایی فاز، تأثیر مستقیمی در کاهش عملکرد سامانه دارد. به طور مشخص، میزان مصرف انرژی مدولاسیون جابه‌جایی فاز برای احتمال خطای معین وابسته به نویز فاز و واریانس نویز فاز است. از این رو مدولاسیون قطبش، مدولاسیون مقاومی در برابر نویز فاز در شرایط اتمسفری مختلف محسوب می‌شود. هم‌چنین مشاهده شده است که مدولاسیون قطبش نسبت به مدولاسیون OOK با آستانه ثابت، با افزایش میزان انرژی، به احتمال خطاهای بسیار پایینی دست می‌یابد. در حالی که در مدولاسیون OOK در حالت شرایط کانال با آشفته‌گی ضعیف، احتمال خطا کمتر از 10^{-2} نمی‌شود.

از طرفی، مدولاسیون قطبش در سطوح مختلفی هم‌چون باینری، چهارتایی، هشت تایی و... قابل نمایش است. نگاشت‌های مختلف و متفاوت در این مقاله برای مدولاسیون قطبش بر روی کره پوانکاره بیان شده است. برای مثال در کانال گاما-گاما مشاهده شد که با افزایش تعداد سطوح قطبش از حالت چهارتایی

در شکل (۸)، احتمال خطای بیت بر حسب نسبت انرژی بیت ارسالی به نویز آن برای منظومه هشت تایی که بر روی کره پوانکاره مطابق شکل (۵-ب) و شکل (۵-ج) نگاشت می‌شوند، ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که منظومه هشت تایی مکعبی نسبت به منظومه هشت تایی قرار گرفته به صورت هرمی، عملکرد بهتری به لحاظ احتمال خطای بیت از خود نشان می‌دهد. به طور مشخص برای $BER = 10^{-1}$ در کانال گاما-گاما، چیدمان مکعبی ۲ دسی‌بل انرژی کمتری نسبت به چیدمان هرمی نیاز دارد. همچنین در شکل (۹)، احتمال خطای بیت بر حسب نسبت انرژی بیت ارسالی به نویز آن برای منظومه شانزده تایی که بر روی کره پوانکاره مطابق شکل (۵-د) و شکل (۵-ه) نگاشت می‌شوند، ترسیم شده است. در این شکل به دلیل تقارن نسبی نواحی تصمیم‌گیری در حالت هرمی و افزایش فاصله بین سمبل‌ها، منظومه شانزده تایی هرمی نسبت به منظومه شانزده تایی مکعبی وضعیت نسبتاً بهتری در احتمال خطای بیت دارد. به‌طور دقیق‌تر با در نظر گرفتن $BER = 10^{-3}$ در کانال AWGN، ۱ دسی‌بل انرژی کمتری برای منظومه هرمی نسبت به مکعبی نیاز است.



شکل (۸): احتمال خطای بیت بر حسب نسبت انرژی بیت به نویز دریافتی در حالت منظومه ۸ تایی.

- Channel,” IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 5, no. 9, pp. 1031-1038, 2011.
- [7] P. Kundu, M. J. Islam, and I. J. Talukder, “Performance Analysis of Binary Polarization Shift Keying OCDMA FSO System under Different Atmospheric Conditions,” 2nd International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE), 2017.
- [8] K. S. Hou and J. Wu, “A Differential Coding Method for The Symmetrically Differential Polarization Shift-Keying System,” IEEE Transactions on Communications, vol. 50, pp. 2042-2051, 2002.
- [9] J. Grosinger, “Investigation of Polarization Modulation in Optical Free Space Communications Through The Atmosphere,” Master Thesis, Univ. Vienna, 2008.
- [10] E. Collett, “Polarized Light in Fiber Optics,” SPIE, 2003.
- [11] S. Ishimura and K. Nishimura, “Blind polarization demultiplexing algorithm for multi-level modulation formats in stokes vector direct detection systems,” Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), 2017.
- [12] X. Tang, Z. Ghassemlooy, W. O. Popoola, and C. G. Lee, “Coherent Heterodyne Multilevel Polarization Shift Keying With Spatial Diversity in a Free-Space Optical Turbulence Channel,” Journal of Lightwave Technology, vol. 30, no. 16, pp. 2689-2695, 2012.
- [13] Y. Ito and K. Ohuchi, “Performance of multilevel differential polarization shift keying with estimation of inclined polarization axes over atmospheric turbulence channel,” 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC), 2017.
- [14] P. Shi, H. Huan, and R. Tao, “Waveform design for higher-level 3D constellation mappings and its construction based on regular tetrahedron cells,” Science China Information Sciences, vol. 58, no. 8, pp. 1-12, 2015.

به شانزده تایی، احتمال خطای بیت سامانه از 10^{-4} به 10^{-3} افزایش پیدا می‌کند ولی با این حال می‌توان تعداد پیام‌های بیش‌تری را با افزایش چهار برابری سمبل‌های مجزا، ارسال نمود. همچنین با مقایسه نسبی روش‌های مدولاسیون متداول OOK، BPSK نسبت به مدولاسیون قطبش باینری میزان عملکرد هر یک مشخص شد.

با نمایش منظومه‌های مختلف برای مدولاسیون قطبش در کره پوانکاره، عملکرد احتمال خطای آن‌ها در حالت‌های مختلف قرارگیری، با هدف تعیین و استخراج حالت بهینه، مورد ارزیابی قرار گرفت.

۶- مراجع

- [1] M. Zubair, “Advanced free space optics (FSO): a systems approach,” Contemporary Physics, vol. 59, pp. 83-83, 2018.
- [2] Liu, Chao, et al, “Analysis of Direct Detection And Coherent Detection in Wireless Optical Communication With Polarization Shift Keying,” Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim, Optical Society of America, 2009.
- [3] H. Samimi and P. Azmi, “Subcarrier intensity modulated free-space optical communications in K-distributed turbulence channels,” Journal of Optical Communications and Networking, vol. 2, no. 8, pp. 625-632, 2010.
- [4] P. Krishnan and D. S. Kumar, “Performance analysis of free-space optical systems employing binary polarization shift keying signaling over gamma-gamma channel with pointing errors,” Optical Engineering, vol. 53, no.7, p. 076105, 2014.
- [5] X. Tang, Z. Ghassemlooy, W. O. Popoola, and C. G. Lee, “Coherent Polarization Shift Keying Modulated Free Space Optical Links Over A Gamma-Gamma Turbulence Channel,” American Journal of Engineering and Applied Sciences vol. 4, no. 4, pp. 520-530, 2011.
- [6] X. Tang, Z. Ghassemlooy, W. O. Popoola, and C. G. Lee, “Coherent Optical Binary Polarisation Shift Keying Heterodyne System in The Free-Space Optical Turbulence

Introducing an Optimal Modulation Constellation, Resistant to Atmospheric Turbulence

H. Ahmadian Yazdi, A. Naseri*

*Imam Hosein University

(Received: 30/12/2018, Accepted: 18/06/2019)

ABSTRACT

One of the communication platforms commonly used in C4I backing layers is the free space optical communication platform. In this paper, the modulation of polarization is proposed to strengthen the free space optical communication platform against atmospheric perturbations. In this method, instead of using conventional modulation methods such as amplitude, phase or frequency modulations, the polarization states are modulated on the optical beam. Conventional modulation methods are highly sensitive to turbulence fluctuations. Polarization modulation is highly resistant to the phase noise of laser beams and it maintains the polarization states on a long path in free space. Generally, binary polarization modulation, works better than conventional modulations by about 2 dB or more. More specifically, in this paper, different polarization modulation constellations in Poincaré are plotted and their probability of error is evaluated in different positions. Finally, the optimal states of the constellation are extracted by simulations.

Keywords: Atmospheric Turbulence, Gamma-Gamma Distribution, Polarization Shift Keying, Free-Space Optical Communication

* Corresponding Author Email: anaseri@ihu.ac.ir