



دانشگاه سیستان و بلوچستان
تحصیلات تکمیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق - مخابرات (گرایش سیستم)

عنوان:

تخمین بیشترین درستی پارامترهای مدل فیدینگ کانال مخابرات نوری فضای آزاد

استاد راهنما:

دکتر مهتری مهرجو

استاد مشاور:

مهندس غلامرضا رخشانی مهر

تحقیق و نگارش:

مهدی کاظمی نیا

(این پایان نامه از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان بهره مند شده است)

شهریور ۱۳۹۱

بسمه تعالی

این پایان نامه با عنوان تخمین بیشترین درستی پارامترهای مدل فی‌دینگ کانال مخابرات نوری فضای آزاد قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات (گرایش سیستم) توسط دانشجو مهدی کاظمی‌نیا با راهنمایی استاد پایان نامه دکتر مه‌رجو تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می باشد.

مهدی کاظمی‌نیا

این پایان نامه شش واحد درسی شناخته می شود و در تاریخ توسط هیئت داوران بررسی و درجه به آن تعلق گرفت.

تاریخ

امضاء

نام و نام خانوادگی

استاد راهنما:

استاد مشاور:

داور ۱:

داور ۲:

نماینده تحصیلات تکمیلی:



دانشگاه سیستان و بلوچستان

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب مهدی کاظمی نیا تعهد می کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه پیش از این برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه سیستان و بلوچستان می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: مهدی کاظمی نیا

امضاء

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم و برادران دلسوزم که همیشه حامی و پشتیبان من بوده‌اند.

سپاسگزاری

از استاد راهنمای محترم، سرکار خانم دکتر مهتری مهرجو که از هیچ کمکی دریغ ننموده‌اند و بی‌شک این تحقیق حاصل راهنمایی‌ها و زحمات فراوان ایشان بوده است، بسیار سپاسگزارم. همچنین از استاد مشاور محترم، جناب آقای مهندس غلامرضا رخشانی مهر و از اساتید داور گرانقدر سرکار خانم دکتر هنگامه کشاورز و جناب آقای دکتر رضایی و همچنین تمام دوستان و کسانی که به هر نحوی در تکمیل این پایان نامه مرا یاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

چکیده

در دو دهه اخیر، مخابرات نوری فضای آزاد¹ (FSO) بدلیل ظرفیت انتقال بالا، امنیت ذاتی و هزینه‌های نصب و راه-اندازی پایین بسیار مورد توجه قرار گرفته است. فیدینگ ناشی از پدیده تلاطم جوی² یکی از بزرگترین مشکلات کانال‌های مخابرات FSO است که عملکرد این سیستم‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. توزیع‌های آماری گوناگونی برای مدل کردن فیدینگ کانال‌های مخابرات FSO ارائه شده است. از آنجایی که پارامترهای مدل‌های پیشنهادی بطور مستقیم به پارامترهای محیطی وابسته است، دانستن پارامترهای این مدل‌ها در بهبود طراحی روش‌های بهینه ارسال اطلاعات و شناخت بهتر کانال، به منظور آنالیز هزینه‌های لینک³ بسیار موثر است. توزیع گاما گاما یکی از بهترین مدل‌های فیدینگ ارائه شده برای کانال مخابرات FSO است. تنها روش موجود در تخمین پارامترهای این مدل براساس روش ممان‌ها⁴ است که از دقت لازم در تخمین پارامترها برخوردار نیست، خصوصاً هنگامیکه تعداد نمونه‌های مشاهده شده از کانال کم باشد. همچنین بدلیل وجود تابع بسل تعمیم یافته از نوع دوم در مدل گاما گاما و نبود مشتقات این تابع نسبت به هر دو پارامتر آرگومان و مرتبه بطور همزمان، ارائه روش تخمین بیشترین درستی⁵ (ML) این مدل، تاکنون میسر نشده است.

در این تحقیق، تخمین ML پارامترهای مدل گاما گاما ارائه می‌شود. برای این منظور، ابتدا از تخمین ML توزیع گاما برای محاسبه تخمین ML یک بعدی مدل گاما گاما استفاده می‌شود. سپس با اثبات مشتقات تابع بسل تعمیم یافته نسبت به هر دو پارامتر آرگومان و مرتبه، تخمین ML هر دو پارامتر مدل گاما گاما یا همان تخمین ML دو بعدی میسر می‌شود. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که روش تخمین ML پیشنهاد شده نسبت به روش ممان‌ها و روش جستجوی عددی دو بعدی Nelder-Mead از دقت بالاتری برخوردار است. وابسته نبودن به نقاط شروع اولیه و اطمینان از رسیدن به نقاط بیشینه جهانی و همینطور استفاده از تعداد نمونه‌های کم برای فرآیند تخمین از جمله مزایای این روش در مقایسه با روش ممان‌ها می‌باشد.

کلمات کلیدی: تخمین بیشترین درستی - تلاطم جوی - توزیع گاما گاما - روش تخمین ممان‌ها - مخابرات نوری فضای آزاد.

¹ Free Space Optical Communication

² Atmospheric Turbulence

³ Link Budget

⁴ Method of Moments

⁵ Maximum Likelihood Estimation

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل ۱- مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۲-۱- ضرورت انجام تحقیق	۲
۳-۱- بیان مسئله و روند تحقیق	۳
۴-۱- ساختار پایان نامه	۴
فصل ۲- فناوری FSO، مدل‌های کانال و روش تخمین ممان‌ها.....	۵
۱-۲- مقدمه	۵
۲-۲- فناوری مخابرات FSO	۵
۱-۲-۲- ویژگی‌های مخابرات FSO.....	۶
۲-۲-۲- کاربردهای مخابرات FSO.....	۷
۳-۲-۲- پیکربندی سیستم FSO.....	۸
۳-۲-۲- کانال FSO.....	۹
۴-۲- تضعیف کانال FSO.....	۹
۱-۴-۲- تلاطم جوی.....	۱۰
۵-۲- مدل‌های کانال FSO.....	۱۳
۱-۵-۲- مدل لگ نرمال.....	۱۴
۲-۵-۲- مدل گاما گاما.....	۱۵
۳-۵-۲- مدل نمایی منفی.....	۱۸
۶-۲- تخمین کانال فیدینگ	۱۹
۱-۶-۲- روش ممان‌ها.....	۲۰
فصل ۳- تخمین بیشترین درستی مدل گاما گاما.....	۲۴
۱-۳- مقدمه	۲۴
۲-۳- تخمین بیشترین درستی یک بعدی مدل گاما گاما.....	۲۴
۱-۲-۳- تخمین بیشترین درستی توزیع گاما.....	۲۴
۲-۲-۳- الگوریتم بیشینه سازی امید.....	۲۶
۳-۲-۳- شبیه سازی.....	۳۱
۳-۳- تخمین بیشترین درستی دو بعدی مدل گاما گاما.....	۳۶
۱-۳-۳- اثبات مشتقات تابع بسل تعمیم یافته از نوع دوم.....	۳۷

۳۹	رابطه جبری بین پارامترهای مدل گاما گاما.....	۲-۳-۳
۴۲	بهینه سازی.....	۳-۳-۳
۴۲	اصول الگوریتم ژنتیک.....	۱-۳-۳-۳
۴۳	مسئله بهینه سازی.....	۲-۳-۳-۳
۴۵	شبیه سازی.....	۴-۳-۳
۴۹	نتیجه گیری و پیشنهادات	فصل ۴-۴
۴۹	جمع بندی و نتیجه گیری.....	۱-۴
۵۰	پیشنهادات.....	۲-۴

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۳۲	جدول ۳-۱. میزان MSE روش‌های 1DML، Nelder-Mead و MOM/CVX در تخمین پارامتر α
۳۴	جدول ۳-۲. قابلیت اطمینان روش 1DML در همگرا شدن به بیشینه جهانی با نقاط شروع مختلف برای پارامتر α
۳۶	جدول ۳-۳. میزان MSE روش‌های 1DML، Nelder-Mead و MOM/CVX در تخمین پارامتر β
۴۱	جدول ۳-۴. نسبت مقادیر S_2 و S_1
۴۳	جدول ۳-۵. پارامترهای شبیه‌سازی GA

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۸	شکل ۱-۲. مدل فیزیکی سیستم مخابراتی FSO
۱۲	شکل ۲-۲. جریان‌های متلاطم بین مقیاس‌های داخلی و خارجی
۱۵	شکل ۳-۲. تابع چگالی احتمال مدل لگ نرمال برای برخی از مقادیر واریانس ریتو
۱۷	شکل ۴-۲. تابع چگالی احتمال مدل گاما گاما برای مقادیر مختلف واریانس ریتو نسبت به شدت نور
۱۸	شکل ۵-۲. مقادیر مختلف پارامترهای مدل گاما گاما نسبت به واریانس ریتو
۱۹	شکل ۶-۲. تابع چگالی احتمال مدل نمایی منفی برای مقادیر مختلف P_0
۲۳	شکل ۷-۲. روند تخمین پارامترهای مدل گاما گاما توسط روش Modified MOM/CVX
۳۲	شکل ۱-۳. تابع بیشترین درستی مدل گاما گاما نسبت به پارامتر α
۳۵	شکل ۲-۳. نسبت زمان محاسباتی روش N-M به IDML برای پارامتر α در شرایط تلاطم جوی مختلف
۴۶	شکل ۳-۳. میزان MSE پارامترهای α و β با نمونه‌های $N=128$ ، $N=512$ و $N=2048$ در شرایط تلاطم ضعیف
۴۷	شکل ۴-۳. میزان MSE پارامترهای α و β با نمونه‌های $N=128$ ، $N=512$ و $N=2048$ در شرایط تلاطم متوسط
۴۸	شکل ۵-۳. میزان MSE پارامترهای α و β با نمونه‌های $N=128$ ، $N=512$ و $N=2048$ در شرایط تلاطم قوی

فهرست علائم

نشانه	علامت
پارامتر مقیاس مدل گاما گاما	α
پارامتر مقیاس مدل گاما گاما	β
واریانس ریتو	σ_l^2
تابع دی گاما	$\psi(\cdot)$
تابع تری گاما	$\psi'(\cdot)$
تابع گاما	$\Gamma(\cdot)$
دمای جو	T_e
شدت نوسانات نور	I
ممان مرتبه K ام	μ_k

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- مقدمه

شبکه‌های مخابراتی نسل چهارم به دنبال برآورده نمودن نیازمندی‌های مشترکین مانند پهنای باند بالا و پوشش وسیع شبکه می‌باشند. بنابراین یک ساختار مخابراتی قابل انعطاف، کم هزینه و با سرعت انتقال بالا، برای پاسخ‌گویی به این نیاز اجتناب ناپذیر است. یک راه حل مناسب برای بهره‌مندی از این ویژگی‌ها استفاده از مخابرات FSO می‌باشد.

سیستم‌های رادیویی و فیبرهای نوری، ساختارهای پیش‌تاز مخابراتی برای سرویس‌های پهن باند هستند. فیبرهای نوری بدلیل سرعت بالای انتقال اطلاعات و تضعیف کم، معمولاً در ساختارهای زیربنایی شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. به هر حال هزینه‌های راه اندازی و نصب این ساختارها بسیار سنگین هستند. اگرچه سیستم‌های رادیویی هزینه‌های راه اندازی و نصب پایین‌تری دارند، اما قابلیت فیبرهای نوری را در مواردی مانند نرخ بالای انتقال اطلاعات و امنیت انتقال اطلاعات ندارند. سیستم‌های موجود رادیویی در حال حاضر توانایی انتقال اطلاعات را با سرعتی کمتر از ۱Gbps دارند [۱]. ناسازگاری در نوع سیگنالینگ، در پهنای باند و نرخ انتقال اطلاعات بین سیستم‌های رادیویی و فیبرهای نوری، باعث ایجاد مشکل سرعت در حلقه انتهایی مخابرات^۱ شده است. در واقع بدلیل پهنای باند کم سیستم‌های رادیویی در انتقال اطلاعات به مشترکین، پهنای باند وسیع فیبرهای نوری هم نادیده گرفته می‌شود. از این رو، در بعضی از کاربردها، مخابرات FSO جایگزین مخابرات رادیویی شده است. از جمله این کاربردها، می‌توان به حمل ترافیک بین ایستگاه‌های مخابراتی و مراکز سوئیچ در نسل سوم و چهارم، اشاره نمود [۲].

^۱ Last-Mile Bottleneck

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

با وجود مزایای زیاد مخابرات FSO، عملکرد این ساختار به وضعیت جوی محیطی که پرتو نور در آن منتشر می‌شود، وابسته است. پدیده‌های مختلفی انتشار پرتوی نور در محیط آزاد را تحت تاثیر قرار می‌دهند. یکی از مهمترین این پدیده‌ها، تلاطم جوی^۱ است که نتیجه‌ای از تغییرات ضریب شکست در طول مسیر انتشار بدلیل تغییرات دما و فشار می‌باشد. به طور خاص، تلاطم جوی باعث پدیده‌ای به نام سو سو زدن نور^۲ می‌شود که در اثر نوسانات تصادفی شدت پرتو نور دریافتی ایجاد می‌شود. این نوسانات تصادفی دامنه پرتو نور دریافتی را فیدینگ گویند [۳]. داشتن یک مدل دقیق از فیدینگ در طراحی سیستم‌های مخابرات نوری ضروری است. به گونه‌ای که میزان قابلیت اطمینان در مواردی مانند احتمال آشکارسازی و محوشدگی به این مدل وابسته است [۴].

مدل‌های آماری مختلفی برای فیدینگ کانال بر اساس شدت تلاطم جوی ارائه شده است. پارامترهای بعضی از این مدل‌ها بطور مستقیم به پارامترهای محیط، مانند ضریب شکست یا همان واریانس ریتو^۳ (σ_I^2) که شدت تلاطم جوی را مشخص می‌نماید، مربوط هستند. بر اساس مقادیر واریانس ریتو، شدت تلاطم جوی به سه سطح، شرایط تلاطم جوی ضعیف ($\sigma_I^2 \leq 0.13$)، متوسط ($0.13 < \sigma_I^2 \leq 0.5$) و قوی ($\sigma_I^2 > 0.5$) تقسیم می‌شود [۵]. در شرایط تلاطم جوی ضعیف مدل لگ نرمال برای مدل کردن نوسانات شدت نور ارائه شده است. با افزایش واریانس ریتو در شرایط تلاطم جوی قوی، مدل نمایی منفی به عنوان مدل فیدینگ در نظر گرفته می‌شود. مدل گاما گاما که توسط اندرو و همکارانش ارائه شد [۳]، قادر است تمام شرایط تلاطم جوی را به خوبی مدل نماید. علاوه بر این، شکل بسته این مدل، انجام محاسبات مربوط به آشکارسازی سیگنال دریافتی و مطالعه فیدینگ را راحت می‌نماید. از این رو در بسیاری از تحقیقات مرتبط با کانال FSO از این مدل استفاده شده است [۶]-[۸].

از آن جایی که طراحی یک سیستم مخابراتی منوط به شناخت کانال مخابراتی می‌باشد، می‌بایست کانال مخابراتی و به دنبال آن پارامترهای استفاده شده در آن به عنوان اولین گام به درستی برآورد شوند. روش ممان-ها^۴ (MOM) یکی از ساده‌ترین روش‌های تخمین است که در آن از ممان‌های نمونه^۵ برای فرآیند تخمین

¹ Atmospheric Turbulence

² Scintillation

³ Rytov

⁴ Method of Moments

⁵ Sample Moments

استفاده می‌شود. در [۵] با استفاده از روش ممان‌های کسری و یک الگوریتم بهینه‌سازی محدب^۱ روشی برای تخمین پارامترهای مدل گاما گاما ارائه شده است. اگرچه روش ممان‌ها از لحاظ پیاده‌سازی و سرعت اجرا مناسب می‌باشد، اما از دقت لازم برای تخمین پارامترها برخوردار نیست [۹].

تخمین ML یکی از روش‌های عملی رایج تخمین است، هنگامیکه تخمین‌گر غیر بایاس کمینه‌وارینانس^۲ وجود نداشته باشد یا محاسبه آن ممکن نباشد. در اغلب موارد تخمین‌گر ML با تعداد نمونه‌های به اندازه کافی بزرگ، بصورت مجانبی تخمین‌گری بهینه و کارا است [۹]. از طرفی بدلیل نبود مشتقات تابع بسل تعمیم یافته از نوع دوم نسبت به هر دو پارامتر آرگومان و مرتبه، بدست آوردن تخمین ML مستقیم پارامترهای مدل گاما گاما تاکنون امکان پذیر نبوده است [۵]. بنابراین کاستی‌های روش ممان‌ها و همین‌طور مشکلات تخمین مستقیم ML، لزوم ارائه راه حلی جایگزین برای محاسبه تخمین ML پارامترهای مدل گاما گاما، ضرورت انجام این تحقیق را ایجاب می‌نماید.

۱-۳- بیان مسئله و روند تحقیق

در این پایان نامه هدف محاسبه تخمین ML پارامترهای مدل گاما گاما است. با توجه به اینکه مدل گاما گاما یک مدل ترکیبی از دو توزیع گامای مستقل است، ابتدا تخمین ML توزیع گاما ارائه می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم بیشینه امید^۳ (EM)، تخمین ML توزیع گاما به مدل گاما گاما بسط داده می‌شود. به هر حال تخمین ارائه شده در این روش یک بعدی است. به عبارت دیگر، تخمین یک پارامتر فقط با داشتن پارامتر دیگر میسر است. بنابراین با اثبات مشتقات تابع بسل تعمیم یافته نوع دوم نسبت به هر دو پارامتر آرگومان و مرتبه و همچنین استفاده از تقریب‌هایی برای توابع بسل تعمیم یافته و سایر توابع مربوطه، تخمین ML یک بعدی، با بدست آوردن رابطه‌ای بین پارامترهای مدل گاما گاما به فضای دو بعدی تعمیم داده می‌شود. برای کاهش خطای تقریب‌های استفاده شده با تعریف ضرایبی ثابت در رابطه بدست آمده و بهینه نمودن آن‌ها توسط الگوریتم ژنتیک، دقت تخمین‌گر ML دو بعدی بهبود داده می‌شود.

¹ Convex Optimization

² Minimum Variance Unbiased Estimator

³ Expectation Maximization

شبهه سازی‌ها با مقایسه معیار خطای مربعات میانگین^۱ (MSE) برای روش ML پیشنهادی، روش ممان‌ها و روش جستجوی عددی دو بعدی Nelder-Mead انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده دقت بالای تخمین گر ML می‌باشد. روش تخمین ML وابستگی بسیار کمی به نقاط شروع اولیه دارد و همیشه به نقاط پیشینه جهانی همگرا می‌شود. همچنین قادر به تخمین پارامترهای مدل گاما گاما با تعداد نمونه‌های کم است.

۱-۴- ساختار پایان نامه

در راستای انجام این تحقیق، ابتدا در فصل دوم برخی از مهمترین کاربردها و ویژگی‌های فناوری FSO بیان می‌شود. همچنین تضعیف کانال، تلاطم نوری و پدیده تلاطم جوی به اختصار شرح داده می‌شوند و ارتباط این پدیده‌ها با واریانس ریتو و چگونگی تاثیر آن‌ها در مدل‌های آماری ارائه شده برای کانال‌های FSO مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس پرکاربردترین مدل‌های کانال FSO معرفی می‌شوند. در نهایت تخمین پارامترهای مدل گاما گاما توسط روش ممان‌ها شرح داده خواهد شد.

در فصل سوم، به ارائه روش‌های تخمین پیشنهاد شده در این تحقیق می‌پردازیم. ابتدا تخمین ML توزیع گاما و به دنبال آن الگوریتم EM، برای دستیابی به تخمین ML یک بعدی پارامترهای مدل گاما گاما شرح داده می‌شود. سپس تخمین گر ML یک بعدی با هدف تخمین همزمان پارامترهای مدل گاما گاما به فضای دو بعدی تعمیم داده می‌شود. در نهایت، برای بهبود فرآیند تخمین الگوریتم ژنتیک بکار گرفته خواهد شد.

در فصل چهارم به جمع بندی و نتیجه‌گیری از دست آوردهای این تحقیق پرداخته شده است. همچنین به منظور گشودن زمینه‌های تحقیقاتی جدید در راستای این پایان نامه و مشخص نمودن چالش‌های پیش رو به منظور حل آن‌ها، پیشنهادهای ارائه گردیده است.

¹ Mean Square Error

فصل ۲- فناوری FSO، مدل‌های کانال و روش تخمین ممان‌ها

۲-۱- مقدمه

در این فصل، به معرفی ساختار مخابرات FSO، ویژگی‌ها و کاربردهای آن پرداخته می‌شود. همچنین پدیده‌های جوی موثر در توصیف کانال FSO بیان می‌شوند و توزیع‌های آماری مناسب برای مدل کردن اثرات این پدیده‌ها در کانال FSO شرح داده می‌شوند. مدل گاما گاما به عنوان یکی از بهترین مدل‌های پیشنهادی در توصیف کانال FSO ارائه می‌شود. سپس روش ممان‌ها برای تخمین پارامترهای این مدل شرح داده می‌شود.

۲-۲- فناوری مخابرات FSO

قبل از توسعه فیبر نوری، مخابرات بی‌سیم نوری ابتدا بوسیله‌ی لوله‌های هادی نوری توسط بل^۱ مورد آزمایش قرار گرفت. پس از آن، رشد و توسعه تجهیزات و چیپ‌های نوری، توسعه تکنولوژی FSO را تسریع بخشید. سیستم‌های FSO با طول لینک‌های چندین کیلومتری با نرخ انتقال اطلاعاتی در حدود چندین گیگا بیت بر ثانیه با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفت [۱]. در دو دهه اخیر تحقیقات انجام شده در حوزه‌ی مخابرات وایرلس نوری به شدت مورد توجه قرار گرفته است و تعداد زیادی از محصولات تجاری مخابرات FSO هم اکنون در بازارهای جهانی در دسترس است. مخابرات نوری فضای آزاد ابتدا به عنوان یک تکنولوژی مکمل برای سیستم‌های رادیویی در نظر گرفته شد، اما با پیشرفت فناوری به عنوان یک ساختار مخابراتی مستقل معرفی شد. امروزه فناوری مخابرات FSO در کاربردهایی با طول گسترده ارتباطی کوتاه در حدود ۵۰ متر تا گستره‌های مخابراتی چندین کیلومتری استفاده می‌شود [۷]. در بخش بعدی به طور مختصر به شرح ویژگی‌های مخابرات FSO و حوزه عملکرد آن خواهیم پرداخت.

^۱ Bell

برخی از ویژگی‌های مهم فناوری FSO که باعث توجه صنعتگران و محققین به این فناوری شده است، به اختصار در ادامه شرح داده شده است [۱۰]:

• **پهنای باند مدولاسیون بزرگ:** طیف فرکانسی حامل‌های نوری از 10^{12} تا 10^{16} هرتز است که

پهنای باندی وسیعی را پوشش می‌دهد. از آنجایی که مقدار اطلاعات منتقل شده مستقیماً به پهنای باند حامل‌ها مربوط می‌شود، FSO ظرفیت انتقال بالایی را در مقایسه با فناوری RF فراهم می‌نماید. این ظرفیت در حدود 10^5 برابر بزرگتر از ظرفیت انتقال در سیستم‌های RF است. این ویژگی‌ها، تکنولوژی مخابرات FSO را برای کاربردهای پهن باند مانند سرویس‌های پخش^۱ مناسب می‌سازد. همچنین سیستم‌های مخابرات FSO براساس ویژگی مالتی پلکس طول موج می‌توانند به ظرفیت انتقال یک ترا بایت یا بیشتر دست یابند.

• **اندازه کوچک پرتوهای نور:** یک پرتو نور لیزر معمولی واگرایی بین $0/1$ تا $0/1$ میلی رادیان دارد

که توان نور را در ناحیه بسیار باریکی متمرکز می‌نماید. بنابراین سیستم‌های مخابراتی FSO از امنیت بالایی برخوردار هستند.

• **طیف فرکانسی بدون مجوز^۲:** درخواست اختصاص فرکانس یا افزایش باند فرکانسی در سیستم‌های

RF بسیار سخت و پرهزینه است و تغییر در آن نیازمند مجوز از سازمان تنظیم مقررات فرکانسی می‌باشد. در حالیکه تکنولوژی FSO طیف فرکانسی بدون نیاز به مجوز را با هزینه‌های راه‌اندازی و نصب پایین فراهم می‌نماید.

• **هزینه‌های پایین توسعه ادوات:** هزینه توسعه لینک‌های FSO در مقایسه با سیستم‌های RF در

یک نرخ انتقال اطلاعات مشابه ارزان‌تر است. تکنولوژی FSO هزینه‌های گزاف مربوط به نشاندن فیبرهای نوری را برای ایجاد یک لینک با پهنای باند قابل قبول، ندارد. همچنین سیستم‌های FSO به سرعت ایجاد می‌شوند و به راحتی و در مدت زمان کوتاهی از منطقه‌ای به منطقه دیگری انتقال داده می‌شوند.

¹ Broadcast

² Unlicensed Spectrum

• **وابستگی به شرایط جوی:** عملکرد لینک مخابراتی FSO توسط پدیده‌های جوی مانند پراش و جذب کاهش می‌یابد. همچنین در سیستم‌های FSO لزوم یک لینک مستقیم بین فرستنده و گیرنده ضروری است. زیرا پرتوی نور لیزر نمی‌تواند درون ساختمان‌ها و دیگر موانع غیر شفاف انتشار یابد.

۲-۲-۲ کاربردهای مخابرات FSO

در زیر به برخی از کاربردهای رایج فناوری FSO که بصورت موفقیت آمیز به اجرا درآمده‌اند، اشاره می‌نماییم [۱].

• **حل مشکل سرعت در حلقه انتهایی مخابرات^۱:** نارسایی در پهنای باند بین مشترکین و ساختارهای زیربنایی شبکه می‌تواند توسط فناوری FSO رفع شود. امروزه محصولات تجاری در گستره‌های مخابراتی از ۵۰ متر تا چندین کیلومتر و نرخ‌های انتقال اطلاعاتی از ۱ مگا بیت بر ثانیه تا ۱۰ مگا بیت بر ثانیه در بازارهای جهانی عرضه شده‌اند.

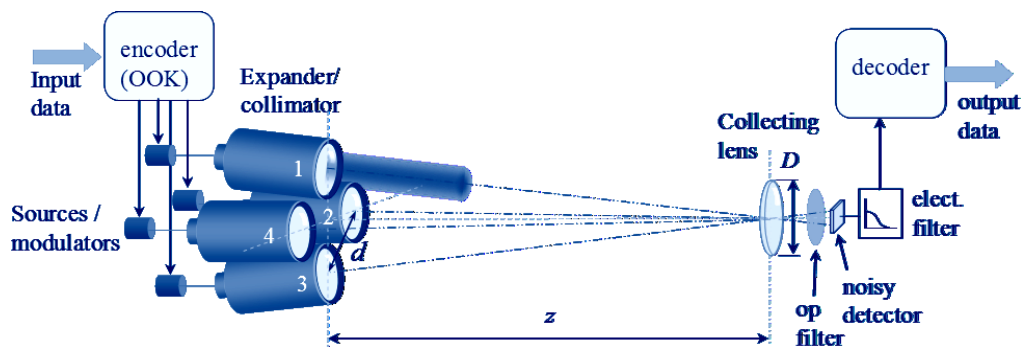
• **پشتیبانی از لینک‌های فیبر نوری:** از فناوری FSO در مناطقی که لینک فیبرنوری دچار خرابی شده است و یا مناطقی که امکان نشانیدن آن میسر نیست، از جمله در مسیر رودخانه‌ها و مسیرهای ریل راه آهن استفاده می‌شود.

• **استفاده در back-haul مخابرات سلولی:** برای حمل ترافیک بین ایستگاه‌های مخابراتی و مراکز سوئیچ در نسل سوم و چهارم بکار گرفته می‌شود. همچنین می‌تواند سیگنال‌های IS-95 CDMA را از سایت‌های مایکروسول و مکروسول به ایستگاه‌های مخابراتی انتقال دهد.

• **تلویزیون HD:** برای پخش کردن سیگنال‌های HD برنامه‌های زنده تلویزیونی در مناطقی که ایستگاه‌های ثابت مخابراتی برای ارسال این سیگنال‌ها وجود ندارند، استفاده می‌شود.

¹ Last-mile Communication

یک مدل فیزیکی ساده از سیستم مخابراتی FSO در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. داده‌ها ابتدا وارد کد کننده شده و به قالب مدولاسیون‌هایی مانند مدولاسیون قطع و وصل متناوب^۱، مدولاسیون موقعیت پالس^۲ و مدولاسیون کد پالس^۳ تبدیل می‌شوند. سپس خروجی این مرحله به عنوان ورودی درایور مدولاتور استفاده می‌شود. مدولاتورها به یکی از دو صورت مدولاتورهای داخلی یا مدولاتورهای بیرونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدولاتورهای داخلی مزایایی مانند یکپارچگی، سادگی و هزینه‌های پایین را دارا می‌باشند. درحالی‌که مدولاتورهای خارجی امکان تولید پالس‌های نوری با بیت ریت بالاتر و کیفیت بیشتر را فراهم می‌کنند [۱].



شکل ۱-۲. مدل فیزیکی سیستم مخابراتی FSO.

داده‌ها می‌توانند در شدت، فرکانس و فاز سیگنال نوری مدوله شوند. سپس توسط لنزهای نوری فرستنده منتشر شوند. سیستم‌های نوری براساس فناوری دید مستقیم، انتقال اطلاعات را در یک کانال غیر هادی انجام می‌دهند. کانال مربوطه می‌تواند هر ترکیبی از فضا^۴، جو^۵ و یا حتی دریا باشد. بعد از انتشار پرتوی نور در محیط جو، سیگنال نوری بوسیله لنزهای متمرکز کننده نور در گیرنده دریافت می‌شود و پس از عبور از فیلتر نوری میانگذر توسط آشکارسازهای فوتونی^۶، به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود. در نهایت این سیگنال برای استخراج

¹ On-off Keying

² Pulse-position Modulation

³ Pulse-code Modulation

⁴ Space

⁵ Atmosphere

⁶ Photo detector

اطلاعات و فرآیند دمدولاسیون به بلوک دیکدر ارسال می‌شود [۱۱]. در این پایان نامه کانال جوی مورد بررسی قرار خواهد گرفت که در بخش ۲-۳ به شرح ویژگی‌های این کانال خواهیم پرداخت.

۲-۳- کانال FSO

تشعشعات نوری منتشر شده در کانال جوی در معرض تضعیف قرار می‌گیرند. این تضعیف بدلیل جذب فوتون‌ها بوسیله مولکول‌های مواد موجود در جو مانند ازن، دی‌اکسید کربن، بخار آب، برف و غیره می‌باشد. پدیده جذب باعث می‌شود که بخشی از انرژی سیگنال نوری به گرما تبدیل شود. همچنین تشعشعات نوری در معرض پدیده پراش قرار می‌گیرند که باعث تغییر در جهت انتشار، قالب شکل موج و ویژگی‌های الکترومغناطیسی نور لیزر می‌شود. علاوه بر این پرتو نور دریافتی در مسیر انتشارش ممکن است دچار پاشیدگی شود و در نتیجه گیرنده نتواند ماکزیمم توان را از سیگنال ارسالی دریافت نماید [۱۱]. در زیر بخش‌هایی که در ادامه خواهد آمد به توصیف اجمالی برخی از تاثیرات جو بر روی سیگنال نوری خواهیم پرداخت.

۲-۴- تضعیف کانال FSO

همانگونه که در بخش قبلی بیان شد، جو باعث تضعیف تشعشعات نوری توسط پدیده‌های پراش و جذب می‌شود. پدیده جذب در اثر برهم کنش بین فوتون‌های نور و مولکول‌های جو باعث از بین رفتن فوتون‌ها و تبدیل آن‌ها به انرژی گرمایی می‌شود. تراکم مولکول‌های جو بستگی به فشار و دمای جو دارد که با شرایط آب و هوایی، ارتفاع و موقعیت جغرافیایی تغییر می‌نماید. پدیده جذب تابعی از طول موج پرتو نوری است. چهار پنجره جذب در طول طیف متناظر با نور مرئی تا نور فرو سرخ ۹۰۰ تا ۹۸۰ نانومتر، ۱/۱ تا ۱/۶ میکرومتر، ۱/۳ تا ۱/۵ میکرومتر و ۱/۸ تا ۲ میکرومتر وجود دارد. طول موج‌های انتخابی برای سیستم‌های مخابرات نوری منطبق با پنجره‌های جذب می‌باشد که پنجره‌هایی مانند ۷۸۰ تا ۸۰۰ نانومتر، ۱/۲ تا ۱/۳ میکرومتر و ۱/۵ تا ۱/۷ میکرومتر، برخی از این گستره‌های طول موج انتخابی هستند.