دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

رساله دکتری مهندسی برق- الکترونیک

مدل سازی و آنالیز کانال در مخابرات نوری فضای آزاد

ابوالفضل چمن مطلق

استاد راهنما:

دکتر وحید احمدی

استاد مشاور:

دکتر ذبیح اله قاسملوئی

تابستان ۱۳۸۹

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته الکترونیک است که در سال ۱۳۸۹ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر وحید احمدی، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر ذبیح‌اله قاسملوئی و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر ------ از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب ابوالفضل چمن مطلق دانشجوی رشته مهندسی برق- الکترونیک‌مقطع دکتری تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: ابوالفضل چمن مطلق

تاریخ و امضا:

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی: ابوالفضل چمن مطلق

امضاء

تقدیم به:

به مادر فداکار و همسر مهربان
و دو فرزند عزیزم
فاطمه و محمد

تشکر و قدردانی

ای نام تو بهترین سر آغاز بی نام تو نامه کی کنم باز

شکر خدای که را به ما نعمت سلامتی و تفکر آموخت. و در باغ علم را بر من گشود. امید دارم به لطف و کرم بی انتهایش لایق همه نعمت‌های خوبش باشم.

در ابتدا می‌بایست از جناب آقای دکتر وحید احمدی که به عنوان استاد راهنمای این رساله و همچنین تدریس برخی دروس دوره دکتری زحمات زیادی برای اینجانب کشیده و با صبر بسیار راهنمای من در کل دوره بوده، تشکر و قدردانی ویژه داشته باشم. برای ایشان آرزوی سلامتی و موفقیت در همه امور را از خداوند متعال خواستارم.

از آقای دکتر ذبیح‌اله قاسملوئی نیز که به عنوان استاد مشاور رساله از راهنمائی و نظرات ایشان، مخصوصا در تنظیم و تصحیح مقالات استفاده برده‌ام، نیز تشکر بسیار می‌کنم.

همچنین از آقای دکتر محمدکاظم مروج‌فرشی نیز به خاطر زحماتی که برای اینجانب در طول دوره تحصیل دکتری کشیده‌اند و همواره از راهنمائی‌های ایشان چه در امور درسی و چه غیر درسی استفاده فراوان برده‌ام تشکر و قدردانی می‌کنم.

از همکاری صمیمانه دوستان آزمایشگاه الکترونیک نوری، آقایان علی میر، محمدحسن یاوری و مهدی کیانزاد نیز کمال تشکر را دارم.

در پایان از مادر فداکار و دلسوز که از دعای خیرش همیشه بهره‌مند بوده‌ام و از زحمات همسرم که در کل دوران تحصیل دکتری با صبر و فداکاری بسیار، خانه و زندگی را به محیطی امن و با آرامش تبدیل کرده و همواره مایه دلگرمی من بود، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم.

چکیده

هدف از انجام این تحقیق، تحلیل محیط اتمسفر به عنوان کانال مخابراتی در سیستم مخابرات نوری فضای آزاد[1] است. پارامترهای محیطی تاثیر مخرب بسیاری روی این نوع مخابرات می‌گذارد. بعضی از این پارامترها شبیه ریزش باران و برف و مخصوصا مه با جذب و پراکندگی بیم لیزری سبب کاهش توان نوری در گیرنده می‌شوند. مهمترین اثر تخریبی روی مخابرات FSO، پدیده توربولانس است که باعث بوجود آمدن تغییر در ضریب شکست محیط شده و پرتو لیزر در اثر عبور از اتمسفر و تحت تاثیر این پدیده، پخش[2] و سرگردان[3] شده و همچنین نوساناتی در شدت نور لیزر[4] بوجود می‌آید. که این تغییرات در نور، باعث کاهش سیگنال به نویز و افزایش احتمال خطای بیت در گیرنده می‌شود.

در این رساله همه این پدیده‌های محیطی مدل سازی شده و تاثیر آنها روی نرخ خطای بیت در سیستم FSO تحلیل شده است. همچنین به تاثیر تغییرات قطر روزنه گیرنده و فاکتور متوسط گیری روزنه[5] بصورت همزمان پرداخته شده است.

یکی از روش‌های کاهش نرخ خطا و در نتیجه افزایش کارایی سیستم FSO، استفاده از آشکار ساز آرایه‌ای به جای یک آشکار ساز است که در این رساله نیز به آن پرداخته شده است. در این جا مشاهده می‌کنیم که برای این روش یک محدودیت وجود دارد، بدین صورت که اگر برای مقایسه، قطر روزنه ثابت در نظر گرفته شود، یک طول بحرانی کمینه وجود خواهد داشت که برای مقادیر کمتر از آن، با افزایش تعداد آشکارساز نرخ خطا بالا می‌رود. همچنین برای یک لینک مخابراتی با طول ثابت، یک قطر بحرانی بیشینه وجود دارد که اگر قطر روزنه از این مقدار زیادتر شود باز هم نرخ خطا در گیرنده با افزایش تعداد آشکارساز بالا رفته و کارآمدی سیستم کاهش می‌یابد.

[1] - Free Space Optical (FSO) Communication
[2] - Beam Spreading
[3] - Beam Wandering
[4] - scintillation
[5] - Aperture Averaging Factor

دو نوع مدولاسیون OOK[۱] و M-ary PPM[۲] برای سیستم FSO در نظر گرفته شده و مشاهده می‌شود که در حالت PPM نرخ خطا کمتر OOK است و همچنین در این حالت، با افزایش M نرخ خطا کاهش می‌یابد. بصورتی که در حالت M=16 در مقایسه با مدولاسیون OOK برای داشتن نرخ خطای بیت[۳] خاص، می‌توان طول لینک را تقریبا دو برابر کرد.

همچنین اگر در یک لینک مخابرات نوری از چندین فرستنده و گیرنده استفاده شود نرخ خطا کاهش می‌یابد. در این حالت با نزدیک شدن فرستنده‌ها به یکدیگر و افزایش همبستگی بین آنها، نرخ خطای بیت افزایش یافته و تاثیر افزایش تعداد فرستنده‌ها کاهش می‌یابد. دقیقا این مطلب برای گیرنده‌ها هم صادق است. و نیز محدودیت قطر بحرانی و طول لینک را نیز باید مد نظر داشت.

کلید واژه: مخابرات نوری فضای آزاد، سیگنال به نویز، نرخ خطای بیت، توربولانس، آشکارساز آرایه‌ای.

[6]- on-off Keying
[7]- Pulse Position Modulation
[3]- Bit Error Rate

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول‌ها	ج
فهرست شکل‌ها	د
فصل اول	۱
۱- تعریف ، اصول عملکرد مخابرات نوری فضای آزاد و مروری بر تحقیقات انجام شده	۱
۱-۱- پیشگفتار	۱
۱-۲- تاریخچه سیستم مخابرات نوری فضای آزاد	۲
۱-۳- کاربردها و مزایای سیستم‌های مخابرات نوری فضای آزاد	۳
۱-۴- فرستنده و گیرنده در سیستمهای مخابرات نوری فضای آزاد	۵
۱-۵- تکنیکهای مدولاسیون در مخابرات نوری فضای آزاد	۶
۱-۶- چالش ها	۹
۱-۷- مروری بر کارهای عملی و مطالعاتی انجام شده بر روی سیستمهای FSO	۱۲
۱-۸- هدف از انجام تحقیق و ساختار رساله	۲۳
فصل دوم	۲۵
۲- مدلسازی کانال در مخابرات نوری فضای آزاد	۲۵
۲-۱- پیشگفتار	۲۵
۲-۲- مدلسازی تضعیف	۲۷
۲-۳- مدلسازی توربولانس محیط	۳۱
۱- ۲- ۳- ۱- مدلسازی انحراف و پخش شدگی پرتو	۳۴
۲- ۲- ۳- ۲- مدلسازی اثر سوسوزدن روی مخابرات FSO	۴۰
۲-۴- حل مدلسازی کامل اثرات محیطی روی مخابرات FSO	۴۲
فصل سوم	۴۶
۳- شبیه سازی اثرات محیطی روی FSO	۴۶
۳-۱- پیشگفتار	۴۶
۳-۲- نتایج حاصل از مدلسازی تضعیف	۴۶
۳-۳- شبیه‌سازی انحراف بیم لیزری	۴۸
۳-۴- شبیه‌سازی کانال با حضور توربولانس	۵۰
۳-۵- شبیه‌سازی کامل کانال با حضور توربولانس، جذب و پراکندگی محیطی و با در نظر گرفتن فاکتور متوسط گیری روزنه گیرنده	۵۲
۳-۶- شبیه‌سازی سیستم FSO با آرایه آشکار ساز	۵۶
۳-۷- مقایسه نرخ خطا برای دو سیستم با مدولاسیون‌های OOK و PPM	۶۳

فصل چهارم ۶۶
۴- آنالیز نرخ خطای بیت در مخابرات نوری فضای آزاد با بیش از یک فرستنده و گیرنده ۶۶
۴-۱- پیشگفتار ۶۶
۴-۲- سیستم FSO با چند فرستنده و چند گیرنده ۶۷
۴-۲-۱- سیستم FSO با یک فرستنده و یک گیرنده (SISO) ۶۹
۴-۲-۲- سیستم FSO با چندین فرستنده و چندین گیرنده (MIMO) ۷۱
۴- ۲- ۲- ۱- حالت چندین فرستنده و یک گیرنده (MISO) ۷۲
۴- ۲- ۲- ۱- حالت یک فرستنده و چندین گیرنده (SIMO) ۷۳
۴- ۲- ۲- ۱- یک فرستنده و چندین گیرنده ۷۴
فصل پنجم ۷۹
۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۷۹
۵-۱- نتیجه‌گیری ۷۹
۵-۲- پیشنهادات برای ادامه کار ۸۱
مراجع ۸۳

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱: مقایسه BER و واریانس BER برای سیستم ۱ و ۵ هاپ ۲۱
جدول ۳-۱: مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای رسم منحنی‌ها ۶۴
جدول ۴-۱: صفرهای چند جمله‌ای هرمیت و فاکتورهای وزنی ۷۱
جدول ۴-۲: سیستم FSO با یک فرستنده و چندین گیرنده ۷۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: دیاگرام سیستم مخابرات نوری فضای آزاد ۲
شکل ۱-۲: انواع مرسوم سیستمهای مخابرات نوری فضای آزاد مادون قرمز ۵
شکل ۱-۳: ساختارهای شکلهای پالس برای مدولاسیون‌های OOK, RZ- δ ، 4-PPM ۷
شکل ۱-۴: سیگنال ارسالی برای رشته010011 برای ساختارهای OOK, ، 4-PPM RZ- δ ۸
شکل ۱-۵: چالشهای سیستم FSO ۱۰
شکل ۱-۶: طیف عبور و جذب از هوا در محدوده فروسرخ ۱۲
شکل ۱-۷: نمودار توزیع قطرات باران و تضعیف سیگنال نوری ۱۴
شکل ۱-۸: : استفاده از یک آشکارساز(سمت چپ)و استفاده از یک آرایه با Mآشکارساز(سمت راست) ۱۵
شکل ۱-۹: BER برحسب متوسط سیگنال به نویز برای دو حالت توربولانس ضعیف وشدید ۱۵
شکل ۱-۱۰ توان نرمالیزه در گیرنده بر حسب رنج دید ۱۶
شکل ۱-۱۱: منحنی‌های BER بر حسب بهره APD در دماهای مختلف توربولانس ضعیف (سمت چپ)، توربولانس شدید(سمت راست) ۱۷
شکل ۱-۱۲: منحنی‌های BER بر حسب بهره APD برای مقادیر مختلف ۱۸
شکل ۱-۱۳: منحنی‌های توان دریافتی در گیرنده برحسب طول کانال و طول موج ۱۸
شکل ۱-۱۴: منحنی تضعیف براساس تئوری کیم و کروز و نتایج تجربی برحسب قابلیت دید ۲۰
شکل ۱-۱۵: الف) نرخ خطای بیت بر حسب تعداد هاپ‌ها، ب) نرخ خطای بیت بر حسب توان نوری فرستنده، برای فواصل مختلف هاپ‌ها ۲۱

شکل ۲-۱: نمای کلی از اثرات اتمسفری ۲۶
شکل ۲-۲: مقایسه ضریب تضعیف ویژه مه مدل کیم الف) قابلیت دید کم ب) قابلیت دید بالا ۲۹
شکل ۲-۳: تو صیف فرآیند میرائی اغتشاشات توربولانسی ۳۱
شکل ۲-۴: انحراف پرتو لیزری ناشی از توربولانس ۳۲
شکل ۲-۵: مدل حبابهای کروی برای شبیه سازی انحراف پرتوهای لیزری ۳۵
شکل ۲-۶: تعیین علامت میزان انحراف پرتو در برخورد با یک حباب ۳۶
شکل ۲-۷: محاسبهٔ بردار شکست ۳۷

شکل ۲-۸: مراحل انجام محاسبات برای تعیین انحراف بیم ۳۹
شکل ۲-۹: منحنی فاکتور متوسط گیری روزنه بر حسب قطر روزنه گیرنده ۴۴

شکل ۳-۱ الف) ضریب تضعیف ویژه بر حسب نرخ ریزش باران، ب) ضریب تضعیف ویژه بر حسب نرخ ریزش برف ۴۷

شکل۳-۲: ضریب تضعیف ویژه برحسب قابلیت دید برای مدلهای کیم، کروس و النبولسی برای طول موج‌های ۸۵۰، ۹۵۰ و ۱۵۵۰ نانومتر کوانتومی هر کدام ۵۰ آنگستروم است ۴۸
شکل ۳-۳: الف) میانگین انحراف پرتو لیزر الف) تا فاصله ۱۰۰۰ متر ب) تا فاصله ۵۰۰۰ متر ۴۹
شکل ۳-۴: منحنی‌های SNR و BER برحسب فاصله بین فرستنده و گیرنده برای مقادیر مختلف پارامترهای ساختاری ضریب شکست، (در شکل (ب) منحنی‌های خط چین مربوط به روش تقریبی و منحنی‌های تو پر روش دقیق است) ۵۰
شکل ۳-۵: منحنی‌های BER برحسب فاصله بین فرستنده و گیرنده برای مقادیر مختلف طول موج لیزر ۵۱
شکل ۳-۶: منحنی‌های BER برحسب فاصله برای دو رژیم توربولانس ضعیف و غیر ضعیف ۵۲
شکل ۳-۷: منحنی BER برحسب فاصله با فرض A=α=0 ۵۳
شکل ۳-۸: منحنی SNReff برحسب قطر روزنه گیرنده برای مقادیر مختلف σ_I^2 ۵۴
شکل ۳-۹: منحنی SNReff برحسب SNR برای مقادیر مختلف A (α=0) ۵۵
شکل ۳-۱۰: منحنی SNReff برحسب SNR برای مقادیر مختلف α (A=0) ۵۶
شکل ۳-۱۱: نمای آشکار ساز گیرنده، سمت چپ استفاده از یک آشکار ساز با قطر D، سمت راست استفاده از M آشکار ساز با قطر D1 ، D=MD1 ۵۷
شکل ۳-۱۲ فاکتور متوسط گیری روزنه بر حسب $d=kD^2/4L$ ۵۸

.

شکل ۳-۱۳: نمودار سیگنال به نویز برحسب $d=kD^2/4L$ برای سه مقدار مختلف M ۵۹
شکل ۳-۱۴: نمودار سیگنال به نویز بر حسب d برای سیستم یک و دو گیرنده ای ۵۹
شکل ۳-۱۵: نمودار سیگنال به نویز بر حسب d برای سیستم یک و سه گیرنده ای ۶۰
شکل ۳- ۱۶: مقایسه یک گیرنده با سه گیرنده از جهت پخش شدگی بیم لیزری با D ثابت ۶۱
شکل ۳-۱۷: مقایسه منحنی قطر روزنه بحرانی گیرنده بر حسب طول لینک مخابراتی ۶۲

شکل ۳-۱۸: منحنی نرخ خطای بیت بر حسب سیگنال به نویز برای مدولاسیون‌های OOK و M- ary PPM ۶۴
شکل ۳-۱۹: منحنی نرخ خطای بیت بر حسب طول لینک برای مدولاسیون‌های OOK و M- ary PPM ۶۵

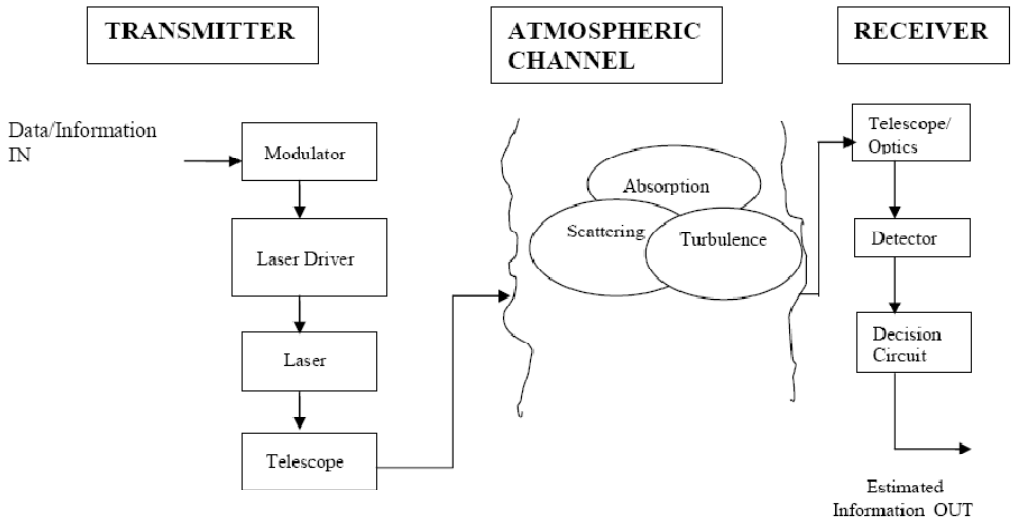
شکل ۴-۱: سیستم FSO با تعداد M فرستنده و N گیرنده. ۶۷
شکل ۴-۲: سیستم FSO با تعدادیک فرستنده و یک گیرنده ۶۹
شکل ۴-۳: سیستم FSO با چندین فرستنده و یک گیرنده ۷۲
شکل ۴-۴: سیستم FSO با یک فرستنده و چندین گیرنده ۷۳
شکل ۴-۵: نمودار BER بر حسب متوسط SNR برای سیستم یک، دو و سه فرستنده ۷۶
شکل ۴-۶: نمودار BER بر حسب متوسط SNR برای حالتهای ۱، ۲ و ۴ فرستنده (σ_x=۰.۰۵) ۷۷
شکل ۴-۷: منحنی‌های BER برحسب متوسط SNR برای حالت ۳فرستنده و ۳ گیرنده (ρ_R=ρ_T) ۷۷

فصل ۱- تعریف ، اصول عملکرد مخابرات نوری فضای آزاد[1] و مروری بر بر تحقیقات انجام شده

۱-۱- پیشگفتار

مخابرات نوری فضای آزاد، یا سیستم بی‌سیم نوری، استفاده از لینک‌های نوری بین دو نقطه در اتمسفر زمین یا خارج آن، با استفاده از پرتوهای فرو سرخ[2] است. بحث سیستم‌های بی‌سیم، شامل تحقیق، آزمایش و کاربرد، یکی از موضوعات جذاب برای مواردی است که احتیاج به لینک‌های با نرخ بسیار بالای داده دارد و مخابرات نوری فضای آزاد، یکی از این موارد است که قابلیت پهنای باند زیاد و نصب بسیار آسان را به طور همزمان دارد و در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه و علاقه قرار گرفته است[۱۶-۱]. در این سیستم اطلاعات توسط فرستنده‌های لیزری فرو سرخ و از طریق فضای آزاد ارسال و توسط آشکارسازهای نوری در گیرنده دریافت می‌شوند. ارسال اطلاعات می‌تواند بین دو ایستگاه ثابت و یا بین یک ایستگاه ثابت و یک ایستگاه سیار باشد و یا اینکه مثل ماهواره‌های فضایی، هر دو ایستگاه در حال حرکت باشند. اگر چه معمولاً از طیف فرو سرخ، برای ارسال اطلاعات استفاده می‌شود، ولی از سایر محدوده‌های طیفی نیز بهره گرفته می‌شود، به همین خاطر نمی‌توان اطلاق نام فرو سرخ را به این سیستم‌ها درست دانست. اجزاء اصلی یک سیستم مخابرات نوری فضای آزاد در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. این سیستم شبیه تمامی سیستم‌های مخابراتی شامل سه جزء اصلی فرستنده، گیرنده و کانال است. که فرق اصلی این نوع مخابرات در نوع کانال آن است. در این سیستم مخابراتی کانال محیط اتمسفر است و انسان هیچگونه کنترلی روی پارامتر های آن ندارد. اثرات مخربی که کانال اتمسفر روی این نوع مخابرات می‌گذارد، پایه مطالعات بسیار زیادی در سال‌های اخیر بوده است و تیم‌های تحقیقاتی در مراکز مختلف روی این موضوع مطالعه و بررسی می‌کنند[۳۲-۱۷].

1 - Free Space Optical Communication
2- Infrared (IR)



شکل ۱-۱: بلوک دیاگرام سیستم مخابرات نوری فضای آزاد[۳۳]

۱-۲- تاریخچه سیستم مخابرات نوری فضای آزاد

در سال ۱۹۶۰ اولین نوع سیستم مخابرات نوری فضای آزاد ساخته و به کار گرفته شد. با اختراع فیبر نوری و استفاده از آن برای مخابرات نوری، عملاً استفاده از فضای آزاد برای ارسال اطلاعات کنار گذاشته شد و تحقیق و استفاده از آن فقط جنبه نظامی داشت و در مراکزی مثل NASA پیگیری و استفاده می‌شد که آن هم بیشتر برای مخابرات فضایی به کار می‌رفت. این روند تا دهه ۹۰ میلادی ادامه داشت تا اینکه چندین شرکت خصوصی برای کارهای شخصی و محرمانه این سیستم‌ها را به کار گرفتند و مجددا تحقیق و ساخت آنها رونق گرفت. در اواسط دهه ۲۰۰۰-۱۹۹۰، علاقه به مخابرات با پهنای باند بالا، مخصوصا برای رشد اینترنت، دریچه جدیدی برای کاربرد مخابرات نوری فضای آزاد بوجود آورد. در سال ۱۹۹۷ از سوی IEEE استاندارد این شبکه‌ها (IEEE 802.11) ارائه شد. در حال حاضر تجهیزات مخابرات فضای آزاد نوری به صورت گسترده و به عنوان پشتیبان فیبر نوری و نیز کاربردهای نظامی و ایجاد شبکه‌های داخلی[۱] و خارجی[۲] توسط شرکت‌های مختلف ارائه می‌شوند[۳۴]. در سال ۱۹۹۸ سیستم

1-INDOOR
2-OUTDOOR

مخابرات نوری با نرخ بیت ۲/۵ Gb/s در مسافت فضای آزاد ۲/۴Km گزارش شد[۳۴]. در سال ۲۰۰۱، مخابرات نوری فضای آزاد به‌عنوان یکی از ده فن آوری برتر مصوب شد. بعد از ۱۱ سپتامبر۲۰۰۱، به‌دلیل قطع کابل و فیبرهای ارتباطی، از این سیستم برای اتصال قسمتهایی از شهر نیویورک استفاده شد. هم اکنون نیز تیم‌های تحقیقاتی بسیاری در کشورهای مختلف سرگرم مطالعه و تحقیق روی بالا بردن کیفیت و کارایی این سیستم مخابراتی هستند.

۱-۳- کاربردها و مزایای سیستم‌های مخابرات نوری فضای آزاد

موارد کاربرد سیستم‌های مخابرات نوری فضای آزاد، زیاد و متنوع هستند. برای نمونه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- توسعه شبکه شهری[۱]: می‌توان با FSO به توسعه شبکه‌های فیبر نوری موجود در نواحی کلان شهرها پرداخت و یا از آن در ایجاد شبکه‌های جدید سود جست[۳۴].
- ایجاد لینک‌های انتهای خط[۲]: می‌توان با FSO در لینک‌های با سرعت بسیار بالا، امکان اتصال استفاده کنندگان انتهای خط سرویس‌های اینترنت را فراهم آورد. همچنین می‌توان از آن برای شبکه‌های محلی پر سرعت استفاده کرد[۳۴].
- ایجاد شبکه‌های کم هزینه[۳]: سرعت بالای نصب سیستم‌های FSO عامل مهم و طبیعی، برای ایجاد شبکه‌های پر سرعت برای ساختمان‌ها و تاسیساتی است که از دیگر ساختمان‌ها دور افتاده‌اند[۳۴].
- پشتیبانی سیستم‌های فیبر نوری[۴]: می‌توان از FSO برای یک لینک پشتیبان در سیستم‌های فیبر نوری استفاده کرد[۳۵].

1- Metro Network Extensions
2- Last Mile Access
3 - Enterprise Connectivity.
4 - Fiber Backup.

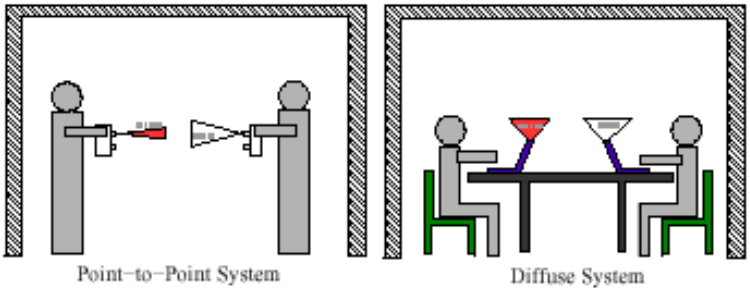
- سرویس‌دهی‌های آنی[1]: در موارد ضروری و آنی، مثل زمان وقوع زلزله و دیگر حوادث طبیعی، برای برقراری ارتباط با نقاط دیگر، FSO می‌تواند نصب و مورد استفاده قرار گیرد[۳۴].
- ایجاد شبکه‌های داخلی: لینک‌های نوری امید تازه‌ای برای آینده باس‌های داخلی هستند. این امکان وجود که دارد که این باس‌ها را با کیفیت بسیار بالا و با کنترل مناسب پرتوهای لیزری طراحی و پیاده کرد[۳۴].
- کاربردهای نظامی[2].
- پشتیبان سیستم‌های RF[3]. سیستم‌های RF فرکانس بالا، توانایی ارسال نرخ بیت بالا را دارند، اما این سیستم‌ها در شرایط جوی خاصی مثل هوای بارانی، به صورت مناسب کار نمی‌کنند. این موضوع بر خلاف کارایی سیستم‌های FSO است که در هوای بارانی نسبتاً خوب کار می‌کنند. بنابراین می‌توان از این سیستم‌ها به عنوان پشتیبان استفاده کرد[۳۵].

انتشار نور از طریق هوا، سرعت بالای نور بدون نیاز به پرداخت هزینه فیبر نوری را به همراه دارد. هزینه FSO یک پنجم هزینه فیبر نوری است، علاوه بر این خیلی سریع نصب و راه‌اندازی می‌شود[۳۶].

با پرتوهای توان پائین فرو سرخ که به چشم آسیبی نمی‌رسانند می‌توان FSO را تحقق بخشید و داده‌ها را انتقال داد. بر خلاف طیف های فرکانس پائین، طیف‌های الکترومغناطیسی بالای ۳۰۰ گیگا هرتز که طیف فرو سرخ را نیز شامل می‌شود، تحت لیسانس قرار نگرفته و طیف آن مجانی است[۳۶].

سیستم‌های مخابرات فضای آزاد را می‌توان هم بر اساس نوع کاربرد و هم بر اساس نوع لینک برقراری تقسیم‌بندی نمود. اگر بخواهیم این سیستم‌ها را بر اساس نوع لینک برقراری دسته‌بندی نمائیم، می‌توان به دو سیستم نقطه به نقطه[4] و انتشاری اشاره کرد[۱]. این دو سیستم در شکل (۱-۲) نشان داده شده‌اند.

1 - Service Acceleration.
2 - Military Application.
3 -RF Backup
4 - point-to-point system



شکل ۱-۲: انواع مرسوم سیستم‌های مخابرات نوری فضای آزاد فرو سرخ[۱]

ساده‌ترین نوع لینک، سیستم نقطه به نقطه است که در آن فرستنده و گیرنده باید در خط مستقیم و میدان دید همدیگر قرار گیرند، به این نوع لینک، سیستم مستقیم نیز گفته می‌شود. در سیستم نوع انتشاری نیاز به دید مستقیم وجود ندارد، و خاصیت بازتاب نور در برخورد به سطوحی مثل سقف، دیوار و ... استفاده می‌شود، به این نوع لینک، سیستم غیر مستقیم نیز گفته می‌شود[۱۶].

۱-۴- فرستنده و گیرنده در سیستم‌های مخابرات نوری فضای آزاد

دو نوع عمده و متناسب از فرستنده نوری عبارتند از: لیزرهای نیمه رسانا[۱] ، و نیز دیودهای نوری[۲]. دیودهای نوری به طور طبیعی الگوی انتقال وسیعی دارند، و بنابراین برای لینک‌های غیر مستقیم مناسب هستند. علاوه بر این، برای ایمنی چشم نیز مشکلی ایجاد نمی‌کنند. مزیت عمده لیزرهای دیودی راندمان بالای تبدیل انرژی، پهنای باند بسیار بالا، و پهنای باریک طیف در آنها است[۱۶].

در بخش گیرنده نوری، فوتودیودهای سیلیکنی نوع pin برای مخابرات نوری فضای آزاد در محدوده طیف فرو سرخ، به خاطر راندمان کوانتومی بالا، ایده‌ال است. از فوتودیودهای نوع بهمنی[۳] به خاطر نویز بالا، برای مخابرات فضای آزاد کمتر استفاده می‌شود[۱۶].

1 - Laser Diode (LD)
2 - Light Emission Diode (LED)
3- Avalanche Photo Diode (APD)

در سیستم‌های مخابرات نوری فضای آزاد، آشکارساز علاوه بر منبع اصلی، توسط منابع دیگر نوری مثل نور طبیعی خورشید، نور لامپ‌های فلورسانس و نور لامپ‌های سفید نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرد. این منابع نوری باعث تغییراتی در جریان نوری آشکارساز شده، که در نتیجه باعث ایجاد نویز می‌شوند.

۱-۵- روش‌های مدولاسیون در مخابرات نوری فضای آزاد

بیشتر سیستم‌های مخابرات نوری فضای آزاد از مدولاسیون شدت و آشکارسازی مستقیم[1] برای مدولاسیون و دمدولاسیون استفاده می‌نمایند[۱۶]. چون از مدولاسیون شدت استفاده می‌کنیم، ورودی کانال یعنی$X(t)$ شدت نور است. متوسط توان نوری انتقال داده شده P_{T} است. هدف تعیین کمینه توان انتقالی مورد نیاز برای دسترسی به خطای بیت مورد نظر است. مناسب است که تعریف زیر را به عنوان نرخ سیگنال به نویز داشته باشیم:

$$SNR = \frac{R^2 H^2(0) P_t^2}{R_b N_0} \qquad (۱-۱)$$

که در آن $H(0)$ بهره کانال است که به صورت زیر تعریف می‌شود (تبدیل فوریه$h(t)$ که در صفر محاسبه شده است):

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)dt \qquad (۱-۲)$$

سیگنال ارسالی را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$X(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_{a_n}(t - nT_s) \qquad (۱-۳)$$

رشته $\{a_{\mathrm{n}}\}$ بیانگر اطلاعات ارسالی است که در آن a_{n} یکی از L سمبل ممکن از 0 تا L-1 است. R_{b} نرخ داده (یا نرخ بیت) ، Tزمان بیت ، R_{s} نرخ نمونه وT_{s} زمان نمونه با رابطه‌های زیر به هم مرتبط می‌شوند.

$$R_b = 1/T \quad , \quad R_s = 1/T_s \quad , \quad T_s = \log_2^L T \qquad (۱-۴)$$

1 - Intensity Modulation / Direct Detection (IM/DD)