

معرفی و مروری بر ویژگی‌های عملیاتی سیستم‌های ارتباط نوری در فضای آزاد، شبکه‌های بی‌سیم پهن‌بند و امن ارتباطات آینده

هادی بخشی^۱، احمد درودی^۲

^۱دانشجوی دکتری اپتیک، دانشگاه زنجان، Hadi.Bakhshi@znu.ac.ir

^۲دانشیار دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

چکیده

استفاده از نور برای ایجاد ارتباط و انتقال پیام سابقه‌ای موثر در تمدن بشری دارد. فانوس‌های دریایی، مورش‌نوری و اکنون، شبکه‌های حیاتی مخابراتی مبتنی بر فیبرنوری از روش‌هایی است که بشر برای تامین نیازهای ارتباطی خود از آن‌ها بهره‌گرفته‌است. سیستم‌های ارتباط نوری در فضای آزاد (FSO) که به اختصار اندفا نامیده می‌شود، فناوری جدیدی است که در ابتدا برای پاسخگویی به نیازهای ارتباطات فضایی و ماهواره‌ای معرفی شد و امروزه محققان در پی تامین نیازهای تجاری صنعت مخابرات با این فناوری هستند. در این فناوری از فرکانس‌های طیف مرئی و مادون قرمز امواج الکترومغناطیس به عنوان حامل پیام استفاده و پرتوهای لیزری بین فرستنده و گیرنده در فضای آزاد منتشر می‌شود. پهنای باند بسیار بالا و امنیت بیشتر در مقایسه با لینک‌های رادیویی و انعطاف‌پذیری بالا و هزینه‌ی عملیاتی پایین‌تر نسبت به شبکه‌های مبتنی بر فیبر، از ویژگی‌هایی است که این فناوری ارائه می‌نماید. در این مقاله مروری بر این فناوری خواهیم داشت و مزایای آن، در کنار چالش‌های پیشرو، کاربردها و اهمیت ورود و تحقیق در این فناوری به عنوان زیربنای ارتباطات آینده بررسی خواهیم کرد. در پایان سیستم اندفا طراحی و راه‌اندازی شده در دانشگاه زنجان به عنوان یکی از فعالیت‌های در حال انجام در این حوزه در داخل کشور را معرفی می‌نماییم.

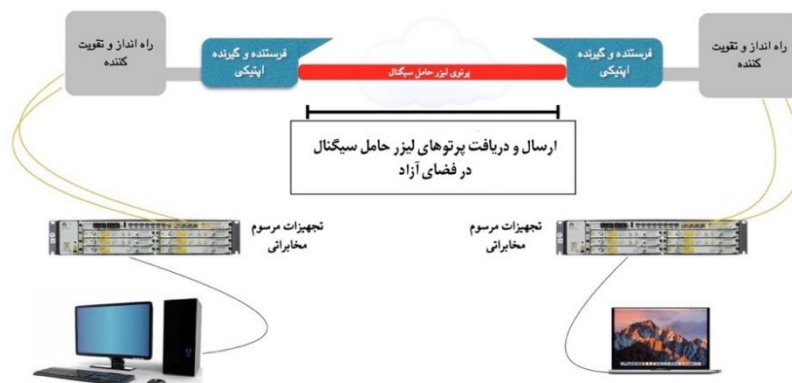
کلیدواژه

ارتباط نوری در فضای آزاد، شبکه‌های بی‌سیم، لینک امن، ارتباطات فضایی- ماهواره‌ای، لیزر.

مقدمه

ملموس برای ایجاد ارتباط هستند. تلاش‌های گراهام‌بل در راه‌اندازی تلفن نوری (۱)، بهره‌برداری مورش نوری در جنگ‌ها (۲) و بطور گسترده و عمیق‌تر بهره‌گیری اپراتورهای ارتباطی از

استفاده از نور برای ایجاد ارتباط و انتقال پیام سابقه طولانی و موثری در تمدن بشری دارد. فانوس‌های دریایی نمونه کاملاً



شکل ۱: سیستم‌های ارتباط نوری در فضای آزاد. در این روش، انتقال سیگنال‌های ارتباطی با استفاده از فرکانس‌های طیف مرئی و مادون قرمز امواج الکترومغناطیس به عنوان فرکانس حامل پیام و در فضای آزاد انجام می‌شود.

معرفی

بطور کلی لینک‌های نوری و لیزری به مراتب نسبت به لینک‌های رادیویی و یا گاهی نسبت به لینک فیبرنوری، مزایا و انعطاف پذیری بیشتری را برای اپراتورهای مخابراتی و حتی کاربران خرد، فراهم می‌کند. موارد زیر بیانگر برخی از مهم‌ترین برتری‌های لینک اندفا نسبت به سایر روش‌های ارتباطی است که در ادامه نکاتی در رابطه با هر یک از این موارد ارایه خواهد شد:

- مصونیت فرکانسی
- پهنای باند گیگابیتی
- امنیت بالا ارتباط
- فارغ از محدودیت‌ها و هزینه‌های رگولاتوری
- سهولت راه‌اندازی و تامین ارتباطات در شرایط بحران و اضطرار
- هزینه ارزان و تطابق پذیری بالا با سیستم‌های موجود.

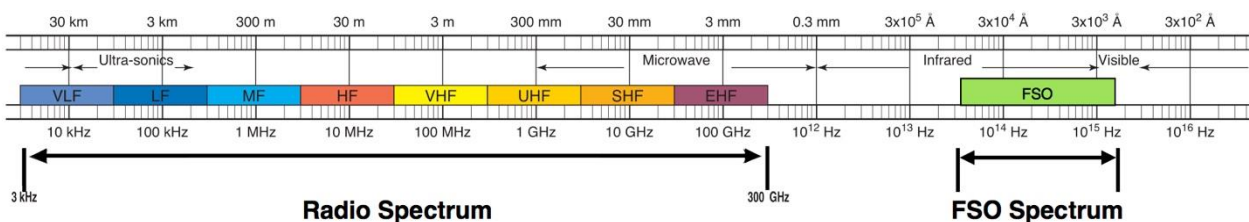
مصونیت فرکانسی

این سیستم به دلیل بهره‌گیری از پرتوهای نوری، در برابر عوامل مختل‌کننده از قبیل نوفه‌ها، تکنیک‌های جنگ الکترونیک و بمب‌های الکترومغناطیسی مصون است. لذا برای اهداف فضایی، نظامی و یا کاربری‌های تجاری معمول می‌تواند ارتباط امن، پایدار و مصون از هرگونه اختلال ارائه دهد (۵-۷).

پهنای باند گیگابیتی

به دلیل استفاده از طول موج‌های مرئی و مادون‌قرمز طیف الکترومغناطیس و فرکانس‌های بالاتر این محدوده از طیف به نسبت طیف رادیویی معمول در ارتباطات بی‌سیم، این سیستم‌ها ارتباطی با نرخ ارسال و دریافت بسیار بالای داده در مقایسه با لینک‌های رادیویی معمول ارائه می‌کند (۵ و ۶).

شبکه‌های فیبرنوری (۳ و ۴)، جایگاه استفاده از نور را برای انتقال پیام نشان می‌دهد. محدودیت‌های شبکه‌های ارتباطی مبتنی بر رادیو، اشباع فضای فرکانس رادیویی کشورها که خود از منابع ملی هر سرزمین به شمار می‌روند، در کنار عطش روزافزون کاربران به ارتباطاتی با پهنای باند بیشتر، به تدریج ایده بهره‌گیری از فرکانس‌های بالاتر از طیف رادیویی امواج الکترومغناطیس را مطرح کرد (۵-۷). فناوری ارتباط نوری در فضای آزاد FSO که به اختصار در زبان فارسی اندفا نامیده می‌شود، نسل آینده سیستم‌های ارتباطی است. این فناوری ارتباطی امن و سریع ارایه می‌کند که بر پایه بهره‌گیری از فرستنده/گیرنده‌های اپتیکی، شکل گرفته است (۵ و ۶). فرستنده/گیرنده‌های اپتیکی وظیفه‌ی مادوله کردن سیگنال‌های مخابراتی به پرتوهای نوری و ارسال/دریافت پرتوها با امکان ارایه پهنای باند گیگابیتی و بصورت بی‌سیم و بدون نیاز به فیبرنوری بعنوان حامل را ارایه می‌نماید. اولین ایده‌ی بهره‌گیری و کاربری این سیستم‌ها در ایجاد لینکی با پهنای باندی بالا جهت ارتباط ایستگاه زمینی با ماهواره‌ها شکل گرفت (۵-۷). این فناوری به دلیل بهره‌گیری از پرتوهای لیزری طیف مرئی و مادون‌قرمز، ارتباطی امن، با نرخ ارسال و دریافت بسیار بالا و ارزان قیمت، برخلاف لینک‌های رادیویی معمول ارایه می‌کند. در ابتدا دولت‌ها و آژانس‌های فضایی بهره‌بردار اصلی این فناوری بودند که با پیشرفت صنایع نیم‌رسانا و به تبع کاهش هزینه‌های طراحی و ساخت لیزرهایی با طول همدوسی بیشتر، توان بالاتر و ابعاد کوچکتر، تلاش‌ها برای بکارگیری فرکانس‌های طیف مرئی و مادون‌قرمز به عنوان فرکانس حامل پیام در بازار تجاری هم شدت گرفت. تقریباً یک دهه از معرفی اولین نسخه‌های تجاری شده‌ی این فناوری به بازارهای جهانی صنعت ارتباطات می‌گذرد و روزانه تحقیقات و محصولات جدیدی از ابعاد مختلف این فناوری گزارش و عرضه می‌گردد. در این مقاله در



شکل ۲: جدول فرکانسی اختصاص امواج جمهوری اسلامی ایران و موقعیت طیف رادیویی (۸). موقعیت فرکانس‌های FSO خارج از محدوده رگولاتوری می‌باشد.

امنیت بالای ارتباط

این فناوری مشکلات مربوط به تداخل باندهای فرکانسی رادیویی مجاور را ندارد. در صورت استفاده دو لینک اندفا مجاور از فرکانس‌های یکسان هم، به دلیل ماهیت ارتباطی دید مستقیم

ابتدا به معرفی این فناوری خواهیم پرداخت و در ادامه مزایا و چالش‌های پیش‌رو را مطرح خواهیم کرد. کاربردها و بازار هدف این فناوری را در ادامه بررسی و در آخر به وضعیت این فناوری در کشور اشاره خواهیم کرد.

بسیار بالا، فرآیندی به شدت زمان‌بر و پرهزینه، خصوصا در مواقع بحران و اضطرار می‌باشد، که نیاز به ایجاد هماهنگی با سایر سازمان‌ها و در نظر گرفتن مخاطرات طبیعی برای امنیت پایدار فیبر است. از طرفی بهره‌گیری از لینک‌های رادیویی هم با توجه به انعطاف نسبتا بالا برای ایجاد ارتباط و ظرفیت موقت، نیازمند مدیریت دقیق فرکانس رادیویی حامل و حتی پهنای باند محدودی است که لینک‌های رادیویی ارابه می‌کند. استفاده از فناوری اندفا با توجه به سهولت راه‌اندازی و انعطاف‌پذیری بالا یک ارتباط بی‌سیم و ارابه پهنای باند گیگابیتی، دغدغه‌ی مدیریت فرکانس‌های حامل برای جلوگیری از تداخل را نداشته و بعنوان یک راه‌حل مقرون به صرفه سهل‌الوصول در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر استفاده این سیستم بعنوان یک‌هال شبکه می‌توان از فناوری اندفا به عنوان لینک پشتیبان شبکه‌های فیبری جهت تامین پهنای باند بالا، هم بهره‌گرفت.

هزینه ارزان و سرعت نصب بالا

همان‌طور که اشاره شد، به دلیل ماهیت بی‌سیم بودن این ارتباط، استفاده از اندفا انعطاف‌پذیری و سرعت نصب بالایی ارابه می‌نماید و بدون هزینه‌های سنگین زیرساختی فیبرنوری می‌تواند پهنای باند گیگابیتی با ماهیت بی‌سیم عرضه نماید. نصب فرستنده و گیرنده در مکان موردنیاز و توجیح اولیه، تمامی عملیات اجرایی است که برای راه‌اندازی یک لینک اندفا مورد نیاز است. این فناوری در تطابق کامل با استانداردهای مخابراتی است، و بدون هیچ گونه تعریف و آماده‌سازی قابلیت اتصال به خروجی‌های استاندارد تجهیزات مخابراتی و ارابه سرویس را داراست.

چالش‌ها

شاید یکی از اصلی‌ترین محدودیت فناوری اندفا تاثیرپذیری آن از شرایط جوی است (۷ و ۹). در نسخه‌های اولیه‌ی این فناوری تاثیر کیفیت جو بین فرستنده و گیرنده، هنگام حضور غبار و مه در جو، مشخص شد. گاهی به دلیل پراکندگی پرتوهای لیزر، زمانی که جو، غبارآلود بوده و یا مه شدیدی حضور داشته باشد، از کیفیت پرتوی لیزر حامل سیگنال کاسته می‌شود (۱۰ و ۱۱). در طی چند سال اخیر مطالعات و تلاش‌های موثری برای رفع این محدودیت‌ها صورت پذیرفته است. بهره‌گیری از روش‌های ^۳ MIMO (۱۴-۱۲)، ارتباطات هیبرید مبتنی بر رادیو و اندفا (۱۵ و ۱۶)، مادولاسیون‌های تطبیق‌پذیر نرخ ارسال و دریافت^۴ (۲۰-۱۷)، بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته اپتیک‌فعال^۵

این سیستم‌ها، اصولا هیچ‌گونه تداخل فرکانسی برای این گونه از ارتباط متصور نیست. علاوه بر عدم امکان تداخل فرکانسی، به دلیل بهره‌گیری از پرتوهای همدوس لیزری و قطر بسیار محدود پرتوهای لیزر در هنگام انتشار، امکان شنود و نشت ارتباط هم به خاطر قطر پرتوی بسیار محدود، تقریبا غیرممکن بوده و امکان هرگونه نفوذ در لحظه مشخص می‌باشد. برخلاف لینک‌های رادیویی که امکان تشخیص و ردیابی منشا و فرکانس آن‌ها با تجهیزات Spectrum Analyzer و RF Meter^۲ وجود دارد، نمی‌توان از این تجهیزات برای تشخیص ارتباطات مبتنی بر اندفا استفاده کرد (۷و۶).

معاف از محدودیت‌ها و هزینه‌های رگولاتوری در طیف رادیویی

همان‌طور که اشاره شد حامل فرکانسی این فناوری طول‌موج‌های مرئی و مادون‌قرمز طیف الکترومغناطیس است. برخلاف لینک‌های ماکروویو و رادیویی که در محدوده فرکانس‌های ملی و حاکمیتی، ملزم به رعایت دستورالعمل‌های رگولاتوری و پرداخت هزینه بهره‌مندی از منابع ملی و محدود فرکانسی هستند، فناوری اندفا در محدوده‌ی تراهرتز طیف الکترومغناطیس فعالیت می‌کند که خارج از محدوده‌ی تخصیص فرکانس رادیویی کشور بوده و به نوعی از قسمت آزاد طیف الکترومغناطیس بهره می‌برد (۸). فرکانس‌های حامل لینک‌های اندفا فارغ از هزینه‌ها و مجوزهای مورد نیاز برای راه‌اندازی لینک‌های رادیویی و تخصیص فرکانس از فضای فرکانسی کشور است.

سهولت راه‌اندازی از تباطات گیگابیتی در شرایط بحران و اضطرار

سرعت عمل و چابکی برای تامین ارتباط در شرایط بحران و اضطرار راه‌برد کلیدی کاهش میزان تلفات و خسارات است. مدیریت بار اضافی شبکه‌های ارتباطی و توزیع بار مسیرهای دسترسی شبکه بعد از وقوع بحران جهت دسترسی به مناطق آسیب دیده و ارزیابی شدت آسیب، در کنار مدیریت ارتباط عوامل امدادرسان با مراکز تصمیم‌گیر، از راه‌کارهای حیاتی مدیریت بحران اپراتورها هست. اختصاص ظرفیت اضافی به شبکه و راه‌اندازی سایت‌های اضطراری، همگی نیازمند افزایش پهنای باند ارتباطی درون شبکه است. دو راهکار اساسی و مرسوم برای افزایش ظرفیت، استفاده از فیبرنوری یا لینک‌های رادیویی است. راه‌اندازی لینک‌های فیبرنوری با توجه به ارابه پهنای باند

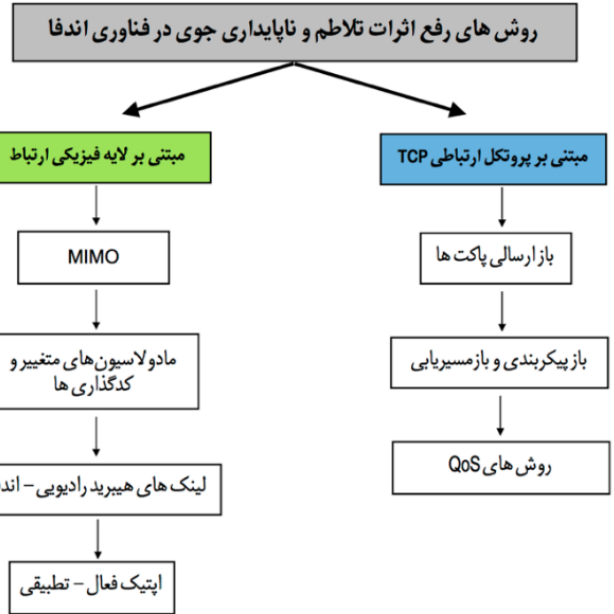
⁴ Adaptive send and receive modulations
⁵ Active Optics

² Radio Frequency Meter
³ Multi Input / Multi Output

و تطبیقی^۶ (۲۳-۲۱) در لایه فیزیکی ارتباط و روش‌های کنترلی پروتکل TCP^۷ (۲۴ و ۲۵)، نمونه‌ای از راه‌حل‌های موثر و گزارش شده برای رفع این محدودیت‌ها به شمار می‌آیند

در مقابل ارائه پهنای باندهای چندین گیگابیتی سیستم اندفا به مراتب سرانه هزینه ارسال داده و مدت زمان ارتباط را کاهش می‌یابد. با توجه به خصوصیات فیزیکی فرکانس‌های حامل این فناوری، امکان تشخیص پرتو و شنود تقریباً غیرممکن است. از طرفی به علت همدوسی بالای پرتوهای لیزر، واگرایی و افزایش قطر این پرتوها بسیار محدود و صرفاً از مرتبه چندین متر است که مطلقاً قابل مقایسه با میزان واگرایی امواج رادیویی نمی‌باشد. به دلیل همین محدود بودن قطر پرتو دریافتی در سطح زمین و عدم اتلاف انرژی، برخلاف لینک‌های رادیویی که سیگنال‌ها را در مخروط فضایی بزرگی را حین عبور انتشار می‌دهد، توان مصرفی انرژی برای ارسال داده مخصوصاً در ماهواره هم بسیار بهینه و کمتر از لینک‌های رادیویی می‌باشد^(۶). این موضوع در رابطه با مسایل و نگرانی‌های بودجه توانی و محدودیت‌های تولید، تامین و مصرف انرژی در ماهواره بسیار ارزشمند است. همین موارد باعث شده که سرمایه‌گذاری‌های عظیمی از سمت دولت‌ها و آژانس‌های فضایی جهت گذار به این فناوری برای تامین ارتباط ماهواره به ماهواره و ماهواره به ایستگاه زمینی صورت پذیرد.

مجموعه پروژه‌های^۸ GOPEX،^۹ OGS،^{۱۰} GOLD و یا^{۱۱} OPLAS اخیر ناسا برای ایجاد ارتباط پایگاه زمینی و ماهواره با تکنولوژی FSO، اقدامات آژانس فضایی اروپا با همکاری ناسا برای ایجاد ارتباط بین ماهواره‌های ARTEMIS و یا پروژه فعال^{۱۲} EDRS که از سال ۲۰۱۴ تاکنون در حال بهره‌برداری است، نمونه‌های گزارش شده بهره‌گیری از این تکنولوژی می‌باشند^(۲۶-۳۴). تلاش‌های آژانس فضایی ژاپن^{۱۳} JAXA در

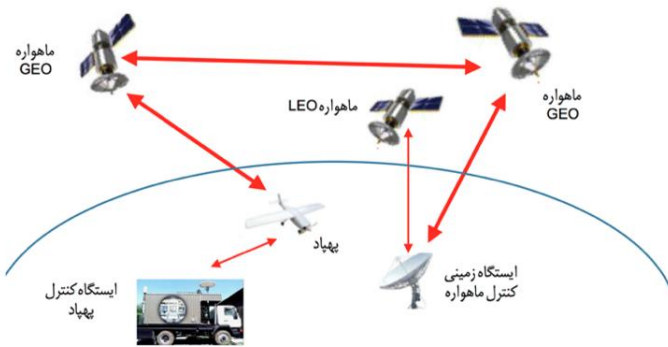


شکل ۳: راه‌کارهای ارائه شده در چند سال اخیر برای بهبود کیفیت لینک‌های مبتنی بر اندفا.

کاربردها

ارتباطات فضایی

عرصه کاربری‌های فضایی، همواره نیازمند برقراری لینکی پایدار و با ارائه نرخ بالای دریافت و ارسال جهت تامین ارتباط امن ایستگاه زمینی با ماهواره‌ها بوده‌است^(۵ و ۶). محدودیت‌های پهنای باندی لینک‌های رادیویی در کنار ملاحظات شدید امنیتی ارتباطات ماهواره، اصلی‌ترین دغدغه‌ها و نیازهای صنعت فضایی بود که توجیح جایگزینی فناوری کارآمدتر را برای تامین این گونه از ارتباط فراهم کرد^(۵). محدودیت زمانی ارتباط ماهواره با ایستگاه زمینی برای ارسال و دریافت داده، در کنار پهنای باند پایین لینک‌های رادیویی، سرانه هزینه برای ارسال و دریافت داده به ماهواره و ایستگاه زمینی را شدیداً افزایش می‌دهد. از طرفی به علت ساختار انتشار امواج رادیویی و واگرایی شدید این امواج بعد از انتشار، امکان شنود و دریافت داده ارسال ماهواره را در سطح وسیعی به مرکزیت ایستگاه زمینی امکان پذیر است^(۵-۷).



شکل ۴: کاربردهای اندفا در ارتباطات فضایی. امکان ایجاد ارتباطی امن و سریع بین ماهواره‌ای در لایه‌های مختلف و ایستگاه زمینی وجود دارد.

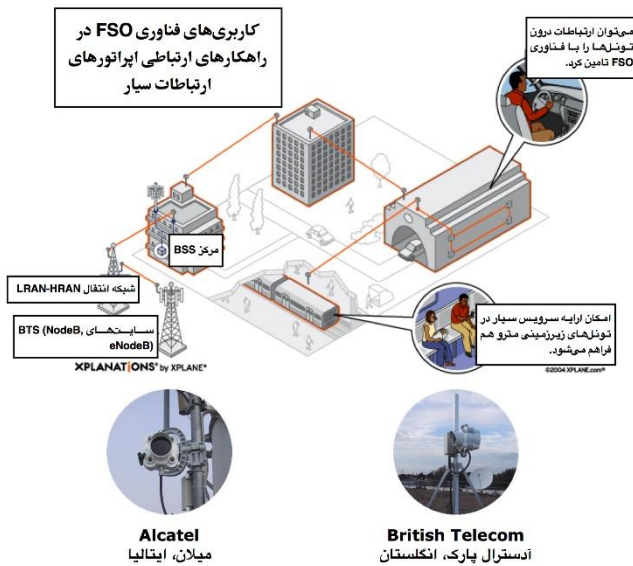
Ground Orbiter Lasercom Demonstration¹⁰
Optical Payload for Lasercomm Science¹¹
European Data Relay System¹²
Japan Aerospace Exploration Agency¹³

Adaptive Optics⁶
Transmission Control Protocol⁷
Galileo Optical Experiment⁸
Optical Ground Stations⁹

کاربردهای تجاری

کاربری این فناوری را می‌توان در دو قسمت شرکت‌ها و اپراتورهای ارائه‌دهنده ارتباطات و کاربران خرد، بررسی کرد. هر یک از این دو گروه متناسب با نیازمندی‌ها و رسالت خود می‌توانند از راه‌کارهای مبتنی بر اندفا جهت ارائه سرویس مطلوب بهره‌مند گردند.

یکی از اصلی‌ترین بروزرسانی‌ها و هزینه‌های توسعه‌ای اپراتورهای مخابراتی تامین و افزایش پهنای‌بند ارتباط بین نودهای شبکه است. در سال‌های گذشته و قبل از فراگیری و توسعه کلان شبکه فیبرنوری، ایستگاه‌های رادیویی پزرفیت ماموریت تامین ارتباط را برعهده داشتند. با سرمایه‌گذاری بسیار عظیمی که جهت بهره‌برداری و تکمیل شبکه فیبرنوری در کشور انجام شد، مسولیت اصلی تامین ارتباطات را برعهده شبکه فیبرنوری



Alcatel
میلان، ایتالیا

British Telecom
ادسترال پارک، انگلستان

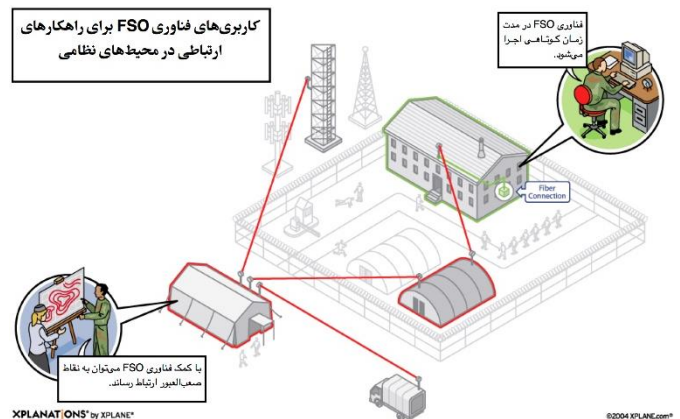
شکل ۶: کاربری‌های تجاری فناوری اندفا. اپراتورهای مخابراتی در بسیاری از کشورها در حال گذار به این فناوری جهت تامین لینک‌های ارتباطی خود هستند. Alcatel در میلان و ایتالیا و British Telecom در ادسترال پارک انگلستان از تجهیزات شرکت Fsona مبتنی بر فناوری اندفا جهت تامین ارتباط سایت‌های موبایل بهره‌برده‌اند (۴۴).

قرارگرفت. اما گاهی جهت توسعه ارتباط بین مراکز شهری و یا توسعه شبکه انتقال، هزینه‌های اخذ مجوز حفاری معابر شهری، عملیات حفاری و راه‌اندازی لینک‌های جدید فیبرنوری، حتی در سطح کلان برای اپراتورها هم بسیار سرسام‌آور و عظیم است، که به ناچار رویکردهای مبتنی بر رادیو حتی با در نظر داشتن محدودیت‌های لینک‌های رادیویی به‌عنوان تنها راه‌حل مورد توجه قرار می‌گیرد. استفاده از فناوری اندفا می‌تواند ضمن کاهش

ایجاد ارتباط ماهواره‌ای مبتنی بر FSO، همانند پروژه^{۱۴} OICETS (۳۷-۳۵)، یا فعالیت‌های شرکت‌های مستقل پیشرو در صنعت فضایی همانند SpaceX، بطور مشخص جهت برقراری ارتباط لیزری بین ماهواره‌ای، در پروژه عظیم StarLink (۳۸-۴۰)، و یا گزارش‌های منتشرشده از زیرساخت‌های پروژه‌های جهانی ارائه‌دهنده اینترنت همگانی همانند GoogleX شرکت گوگل و یا Facebook Aquila شرکت فیس‌بوک هم موید این موضوع است که نسل بعدی ارتباطات به سمت مخابرات نوری سیار و تکنولوژی FSO خواهد رفت (۴۱-۴۳). اخیراً نیز تلاش‌هایی هم از سمت تعداد معدودی از شرکت‌های فناوری جهان برای ارائه‌ی این فناوری با کاربری تجاری ارتباط شبکه‌های تلویزیونی ماهواره‌ای آغاز شده است.

کاربردهای نظامی

همان گونه که قابل حدس است ارائه سیستم ارتباطی با تامین پهنای‌بند بسیار بالا و عدم تاثیرپذیری از عوامل مخرب و عدم امکان شنود در کنار مصرف پایین انرژی و سهولت راه‌اندازی در شرایط رزم، اولویت‌های اصلی ارتباطی هر یگان نظامی است. گزارش‌های بسیاری از اختصاص بودجه‌های تحقیقاتی عظیم و بکارگیری این فناوری در نیروهای نظامی کشورهای توسعه‌یافته منتشر شده است (۴۵-۴۹). ساختار اپتیکی این فناوری برای ارسال و دریافت داده، مصونیت آن را در برابر تکنیک‌های جنگ الکترونیک تضمین می‌کند. از طرفی همان‌طور که پیشتر اشاره شد، قطر بسیار محدود واگرایی پرتو لیزر امکان ایجاد ارتباطی کاملاً هدفمند و دور از احتمال شنود را فراهم می‌نماید.



شکل ۵: کاربری‌های فناوری اندفا برای تامین ارتباط در محیط‌های نظامی. می‌توان در کوتاه‌ترین زمان ارتباطی امن و سریع را در شرایط سخت پیاده‌سازی و بهره‌برداری نمود. در بسیاری از پایگاه‌های نظامی در منطقه، همانند پایگاه هوایی بگرام در افغانستان، از این راه‌کار ارتباطی استفاده می‌شود. ایده از (۴۴).



شکل ۸: کاربران خانگی هم می‌توانند از این فناوری به عنوان نقاط دسترسی به شبکه داخلی و یا اینترنت استفاده کنند.

مرسوم به عنوان مودم روتر وظیفه ی تامین ارتباط گجت‌ها به شبکه محلی با برد محدود خانگی را بر عهده دارند. محصولات مبتنی بر این فناوری از استاندارد IEEE 802.11bb که موسوم به LiFi^{۱۹} است، استفاده می‌نمایند (۵۰-۵۲).

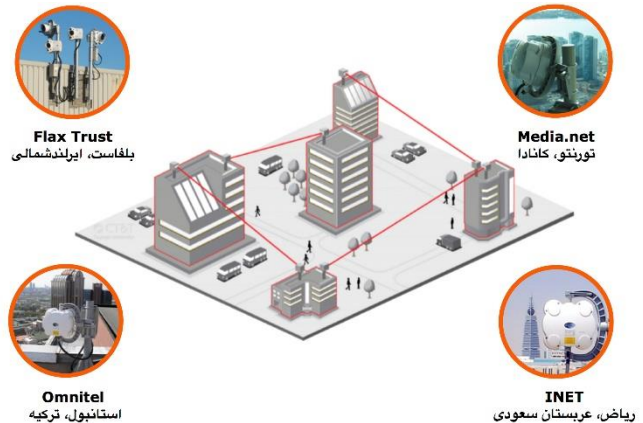
اندفا در ایران

با توجه به چشم‌انداز، مزایا و در لبه‌ی دانش قراردادن این فناوری، تلاش‌هایی از سوی گروه‌های تحقیقاتی داخل کشور برای بررسی این فناوری هرچند بطور نظری و شبیه‌سازی انجام گرفته است. برگزاری دو دوره کنفرانس بین‌المللی مخابرات نوری بی‌سیم غرب آسیا و ارایه مقالات گروه‌های ایرانی موید علاقه‌مندی به این موضوع است. تلاش‌ها و تحقیقات گزارش شده در داخل کشور برای بررسی و مطالعه‌ی این فناوری بطور نظری و شبیه‌سازی انجام گرفته است و تاکنون گزارشی از طراحی و اجرای نمونه عملی این فناوری غیر از فعالیت‌های تیم اندفا دانشگاه زنجان در داخل کشور منتشر نشده است.

معرفی سیستم اندفا طراحی و راه‌اندازی‌شده دانشگاه زنجان

سیستم ارتباط نوری در فضای آزاد دانشگاه زنجان که به اختصار سیستم اندفای دانشگاه زنجان نامیده می‌شود قسمتی از پروژه دکتری هادی بخشی از دانشجویان دانشگاه زنجان است که با راهنمایی دکتر احمد درودی از اساتید گروه فیزیک و مساعدت شرکت مخابرات منطقه زنجان در حال انجام است. این سیستمی کاملاً بومی است و با توجه به موفقیت نمونه‌های اولیه

Near Infrared¹⁸
Light Fidelity¹⁹



شکل ۷: در حوزه کاربران خرد ارتباطی هم بسیاری از سرویس‌دهندگان ارتباطات بی‌سیم در سراسر دنیا از تجهیزات مبتنی بر اندفا جهت ارایه سرویس‌های بی‌سیم به مشتریان خود بهره‌می‌گیرند. تعدادی از این سرویس‌دهنده‌ها با بهره‌گیری از تجهیزات شرکت Fsona در تصویر مشخص شده است (۴۴).

هزینه‌های عملیاتی، در کوتاه‌مدت بازگشت سرمایه را ممکن شود. مدتی است که علاوه بر بهره‌گیری از فناوری اندفا در لایه انتقال شبکه‌های مخابراتی، تلاش‌های بسیاری جهت پیاده‌سازی این فناوری در ارتباطات سیار هم صورت پذیرفته است. در رابطه با کاربران خرد هم، گرچه با ورود تجهیزات بی‌سیم مبتنی بر فناوری Radio IP بسیاری از محدودیت‌ها در ارایه ارتباط بی‌سیم به این کاربران مرتفع شده ولی هم‌چنان محدودیت پهنای باند این تجهیزات عطش کاربران را به تامین پهنای باند بالایی همانند فیبر، فراهم نکرده است. محدودیت بُرد و فاصله ارایه سرویس هم یکی دیگر از نقاط ضعف Radio IP هاست. تلاش جهت دستیابی به مسافت‌های بیشتر و یا پهنای باند بالاتر (در صورت امکان با تجهیزات E-Band) خود نیاز به اخذ مجوز برای بهره‌گیری از فرکانس‌هایی خارج از محدوده تخصیص یافته Radio IP است. اندفا راه حلی بسیار ارزان‌تر و بدون چالش است.

کاربری‌های خانگی اندفا

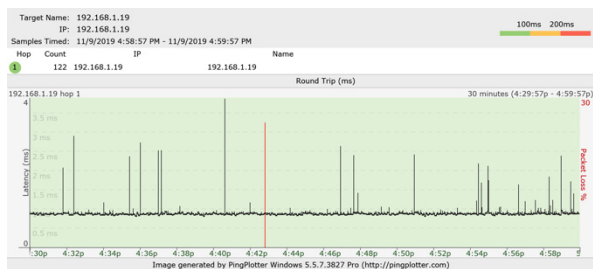
ارتباطات بی‌سیم خانگی هم در یک دهه اخیر رشد عظیمی داشته است. اتصال به شبکه جهانی، راه‌کارهای خانه هوشمند و فراگیر شدن سناریوهای IoT^{۱۵} همگی تقاضا برای اتصال بی‌سیم بهتر و سریع‌تر را افزایش داده‌اند. زیرشاخه‌ی تجاری-خانگی تکنولوژی FSO، فناوری OWC^{۱۶} است که به دو دسته بهره‌گیری از نور مرئی VLC^{۱۷} و طیف NIR^{۱۸} تقسیم می‌شود. ایده‌ی اصلی VLC فراهم آوردن ارتباط محدود بر پایه نور مرئی منابع روشنایی خانه‌ها است. در این فناوری سیستم‌های روشنایی

Internet of Things¹⁵
Optical Wireless Communication¹⁶
Visible Light Communication¹⁷

- در تطابق کامل با پروتکل TCP/IP²⁰ در لینک‌های Ethernet و یا لینک‌های SDH²¹ است.

- این سیستم مستقیماً از ورودی و خروجی استاندارد تجهیزات مخابراتی استفاده می‌شود. لذا تطابق کامل با تجهیزات مخابراتی موجود را دارد.

با توجه به چشم‌انداز، مزایا و در لبه‌ی دانش قراردادن این فناوری، تلاش‌هایی از سوی گروه‌های تحقیقاتی داخل کشور برای بررسی این فناوری هرچند بطور نظری و شبیه‌سازی انجام گرفته است. هرچند تاکنون گزارشی از طراحی و اجرای نمونه عملی این فناوری غیر از فعالیت‌های تیم اندفا دانشگاه زنجان در داخل کشور منتشر نشده است. در سال ۹۷ نسخه اولیه این سیستم بومی، پیرو بازدید که مدیران و کارشناسان مخابرات منطقه زنجان داشتند تست، آزمایش و مورد تأیید قرار گرفت.



شکل ۱۰: تصویری از نتایج تست Latency شبکه متصل شده با لینک اندفا دانشگاه زنجان.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تامین ارتباطی امن و با پهنای‌بند بالا و ارزان‌قیمت اصلی‌ترین نیازهای ارتباطی و مخابراتی هر جامعه‌ای می‌باشد. در طول تاریخ صنعت ارتباطات روش‌ها و فناوری‌های متفاوتی با هدف تامین این خواسته‌ها معرفی و به کار گرفته شده‌اند. شبکه‌های فیبرنوری پهنای‌بند تقریباً نامحدودی ارائه می‌کنند ولی در مقابل نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان، مدت زمان بالای اجرا و هزینه‌های نگهداری و انعطاف‌پذیری پایینی هستند. روش‌های ارتباطی بی‌سیم مبتنی بر طیف رادیویی با وجود انعطاف‌پذیری بالا در اجرا، کاربران و اپراتورها را با محدودیت‌های بسیاری در اختصاص فرکانس، پهنای‌بند قابل ارائه و آسیب‌پذیری امنیت ارتباط مواجه می‌نمایند. فناوری اندفا با ارائه روشی کارآمدتر، انعطاف‌بالای شبکه‌های بی‌سیم و پهنای‌بند شبکه‌های فیبر را در کنار هزینه‌های پایین‌تر اجرا و نگهداری و ارتباطی با امنیت بالاتر ارائه می‌کند. کاربری‌های متنوع این فناوری در عرصه فضایی، نظامی

آزمایشگاهی در فواصل ۲۰، ۴۰، ۵۶ متری و نسخه‌ی اخیر ۱۲۰ متری، می‌تواند در شرایط واقعی و خارج از فضای سرپوشیده، لینک پایداری را با پهنای‌بند 150Mb/s بین دو ساختمان دانشکده‌ی علوم دانشگاه زنجان ارائه نماید (۵۴).

این سیستم به طور بسیار خلاصه دارای مشخصات زیر است:
- استفاده از طول موج ۱۵۵۰ نانومتر طیف مادون قرمز نزدیک جهت ارسال داده
- استفاده از طول موج ۵۳۲ نانومتر جهت توجیح فرستنده و گیرنده
- ارائه پهنای‌بند ۱۵۰ مگابیت بر ثانیه، بطور تقریبی معادل با یک لینک Fast Ethernet
- بهره‌گیری از فناوری دیجیتال الکتروپتیک بومی و نوآورانه
- استفاده از تکنولوژی HotPluggable. سیستم اندفا طراحی و راه‌اندازی شده در دانشگاه زنجان، فارغ از هرگونه تعریف و یا آماده‌سازی اولیه است.



شکل ۹: سیستم اندفا طراحی و راه‌اندازی شده دانشگاه زنجان. (آ) تجهیزات فرستنده و گیرنده نصب شده در ساختمان فیزیک. به منظور مطالعه و کنترل بیشتر بر روی لینک فرستنده و گیرنده در یک مکان نصب شده‌اند. (ب) ایستگاه بازتابنده با قابلیت کنترل از راه‌دور نصب‌شده در ساختمان علوم طبیعی به منظور تامین طول سیر ۱۲۰ متری در یک بار رفت و برگشت پرتو. (ج) نمای هوایی ساختمانی فیزیک و ساختمان علوم طبیعی و مسیر حرکت پرتو اندفا. تصویر از Google Earth.

Transmission Control Protocol/Internet Protocol²⁰
Synchronous Digital Hierarchy²¹

فناوری (با توجه هزینه کرد سیستم اندفا دانشگاه زنجان) در داخل کشور و توجه به محدودیت های شدید انتقال دانش و حتی تامین تجهیزات، هزینه های به مراتب ارزان تری را بدون در نظر گرفتن محدودیت ها و هزینه های جانبی تامین تجهیزات در شرایط تحریم، خواهد داشت. در کاربری های فضایی و یا نظامی همانطور که اشاره شد تلاش های بسیار جدی از سمت بازیگران مطرح عرصه فضایی در حال انجام است و با توجه به تکنولوژی کسب شده در دانشگاه زنجان، به نظر می رسد با حمایت و پشتیبانی فعالیت های تحقیق و توسعه، به سرعت بتوان به فناوری FSO فضایی هم در کشور رسید.

و یا تجاری، ضمن خودکفایی و استقلال کشور از تجهیزات تحریمی وارداتی، در کنار دستیابی به فناوری های روز دنیا، ضامن سلامت و پایداری شبکه ارتباطی کشور خواهد بود. محدودیت های تامین تجهیزات در زمان تحریم، غیرقابل اطمینان بودن سلامت تجهیزات ارتباطی - مخابراتی وارداتی از منظر نفوذ و شنود، لزوم سرمایه گذاری و برنامه ریزی بلندمدت برای توسعه این فناوری نوظهور را هم در ابعاد تجاری، نظامی و هم در عرصه فضایی که خاستگاه اصلی این فناوری می باشد را کاملاً موجه و الزامی می سازد. مباحث مربوط به سیاست های پدافند غیرعامل مطرح شده در سند راهبردی سازمان پدافند غیرعامل کشور و اولویت این مباحث در توسعه شبکه ارتباطی کشور (۵۴ - ۵۶)، از دیگر ضروریات تحقیق و توسعه در این زمینه است. در کنار اولویت خودکفایی داخلی در صنعت تجهیزات مخابراتی و ارتباطی به نظر می رسد هزینه تمام شده طراحی و ساخت این

مراجع

- [10] A. Vavoulas, H. G. Sandalidis, and D. Varoutas, "Weather effects on FSO network connectivity," *J. Opt. Comm. and Net.*, vol. 4, no. 10, pp. 734-740, 2012.
- [11] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser Beam Propagation through Random Media*. SPIE Press, 2005.
- [12] Z. Hajjarian and J. Fadlullah, "MIMO free space optical communications in turbid and turbulent atmosphere," *J. Comm.*, vol. 4, no. 8, pp. 524-532, 2009.
- [13] N. Letzepis and A. Guilléni Fàbregas, "Outage probability of the Gaussian MIMO free-space optical channel with PPM," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 57, no. 12, pp. 3682-3690, 2009.
- [14] N. Cvijetic, S. G. Wilson, and M. Brandt-Pearce, "Receiver optimization in turbulent free-space optical MIMO channels with APDs and Q-ary PPM," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 19, no. 2, pp. 103-105, 2007.
- [15] I. I. Kim and E. Korevaar, "Availability of free space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems," Lightpointe Tech. Report, (Weblink: <http://www.opticalaccess.com>).
- [16] Y. Tang, M. Brandt-Pearce, and S. Wilson, "Adaptive coding and modulation for hybrid FSO/RF systems," in *Proc. IEEE, 43rd Asilomar Conf. on Sig., Sys. and Comp.*, (Pacific Grove, CA), 2009.
- [17] X. Zhu and J. M. Kahn, "Pilot-symbol assisted modulation for correlated turbulent free-space optical channels," *Proc. SPIE, Intl. Symp. Optical Science Technol, San Diego, CA*, 2001.
- [18] S. Hranilovic and D. A. Johns, "A multilevel modulation scheme for high-speed wireless infrared communications," *Proc. IEEE Int. Symp. Cir. & Sysm.*, vol. 6, pp. 338-341, 1999.
- [1] Alexander Graham Bell (*October 1880*). "On the Production and Reproduction of Sound by Light". *American Journal of Science. Third Series. XX (118): 305-324*. also published as "Selenium and the Photophone" in *Nature*, September 1880.
- [2] "German, WWII, WW2, Lichtsprechergerät 80/80". LAUD Electronic Design AS. Archived from the original on July 24, 2011. Retrieved June 28, 2011.
- [3] Alwayn, Vivek. "Fiber-Optic Technologies". Fiber-Optic Technologies. April 23, 2004. Retrieved May 27, 2020.
- [4] Edwin Conway. *Optical Fiber Communications Principles and Practice*. Sterling Biographies. Scientific e-Resources. 2019, ISBN 9781839472374.
- [5] A. Majumdar and J. Ricklin, *Free-Space Laser Communications: Principles and Advances*, vol. 2. Springer, 2008.
- [6] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on free space optical communication: A communication theory perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231-2258, 2014.
- [7] H. Kaushal, G. Kaddoum, "Free Space Optical Communication: Challenges and Mitigation Techniques.", arXiv:1506.04836, CoRRabs/1506.04836 (2015)
- [8] جدول تخصیص فرکانس امواج جمهوری اسلامی ایران، سازمان تنظیم مقررات و ارتباطات رادیویی، www.cra.ir
- [9] N. Kumar and A. K. Rana, "Impact of various parameters on the performance of free space optics communication system," *Optik*, vol. 124, no. 22, pp. 5774-5776, 2013.

- [33] "Laser communications relay demonstration: The next step in optical communications," Goddard Space Flight Center, (NASA), Tech. Report: Weblink: http://www.nasa.gov/pdf/742122main_LCRDFactSheet3.pdf.
- [34] R. M. Sova, J. E. Sluz, D. W. Young, J. J. C., A. Dwivedi, N. M. Demidovich III, J. E. GrJohnaves, M. Northcott, J. Douglass, J. Phillips, D. Don, A. McClarin, and D. Abelson, "80 Gb/s free-space optical communication demonstration between an aerostat and a ground terminal," in *Proc. SPIE, Free Space Laser Comm. VI*, vol. 6304, 2006.
- [35] M. Toyoda, M. Toyoshima, T. Takahashi, M. Shikatani, Y. Arimoto, K. Araki, and T. Aruga, "Ground to ETS-VI narrow laser beam transmission," *Proc. SPIE*, vol. 2699, pp. 71–80, 1996.
- [36] A. Katsuyoshi, "Overview of the optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS) project," *J. Nat. Inst. of Info. and Comm. Tech.*, vol. 59, pp. 5–12, 2012.
- [37] "OICETS - Trajectory Details". *National Space Science Data Center*. NASA. Retrieved 7 January 2017.
- [38] SpaceX. "Launch Manifest". Website: www.spacex.com, Retrieved 2015-10-19.
- [39] "SpaceX's 60-Satellite Launch Is Just the Beginning for Starlink Megaconstellation Project". Space.com website. 24 May 2019. Retrieved 24 May 2019.
- [40] Tung, Liam (15 July 2020). "SpaceX Starlink Internet Beaming Satellite Service Takes Next Step for Beta Test". *zdnet.com*. Retrieved 16 July 2020.
- [41] "Google Laser-Beams the Film Real Genius 60 Miles Between Balloons". *WIRED*. Retrieved 2018-02-24.
- [42] Russell, John (2019). "Facebook is reportedly testing solar-powered internet drones again — this time with Airbus". *TechCrunch*. Retrieved 2019-05-30.
- [43] Price, Rob (29 June 2018). "Facebook tested plane-mounted lasers that fire super high-speed internet over California — here are the photos". *Business Insider*. Retrieved 21 July 2018.
- [44] Website: <http://www.fsona.com>.
- [45] H. R. Burris et al., "Comparison study of packet error rates and bit error rates at the U.S. Naval Research Laboratory free-space lasercom test facility," in *SPIE Defense and Security Symposium*, Orlando, FL, 2007, pp. 65510G-65510G-8.
- [46] C. Reynolds. (2013, Nov. 25). Tactical Line-of-Sight Optical Network. [Online]. Available: <http://www.exelisinc.com/news/pressreleases/Pages/Exelis-completes-US-Naval-Research-Laboratory-evaluation-of-high-speed-laser-based-communications-technology.aspx>
- [47] US Federal Employees. "\$86.5M in FY2008 & 2009, Page 350 Department of Defense Fiscal Year (FY) 2010 Budget Estimates, May 2009, Defense Advanced Research Projects Agency, Justification Book Volume 1, Research, Development, Test &
- [19] A. Desai and S. Milner, "Autonomous reconfiguration in free-space optical sensor networks," *IEEE J. Sel. Areas in Comm.*, vol. 23, no. 8, pp. 1556–1563, 2005.
- [20] A.R. Hammons Jr. and F. Davidson, "On the design of automatic repeat request protocols for turbulent free-space optical links," in *Military Comm. Conf. (MILCOM)*, 2010.
- [21] R. K. Tyson, *Principles of adaptive optics*. Academic, Boston, MA, 1998. P:85-90.
- [22] F. E. Zocchi, "A simple analytical model of adaptive optics for direct detection free-space optical communication," *Opt. Comm.*, vol. 248, no. 4-6, pp. 359–374, April 2005.
- [23] P. Barbier, D. Rush, M. Plett, and P. Polak - Dingels, "Performance improvement of a laser communication link incorporating adaptive optics," *Proc. SPIE, The Inter. Society for Opt. Eng.*, vol. 3432, pp. 93–102, 1998.
- [24] S. A. Kah and S. A. Arshad, "QoS provisioning using hybrid FSO-RF based hierarchical model for wireless multimedia sensor networks," *J. Comp Sc. and Inf. Security*, vol. 4, no. 1, 2009.
- [25] R. Peach, G. Burdge, F. Reitberger, C. Visone, M. Oyler, C. Jensen, and J. Sonnenberg, "Performance of a 10 Gbps QoS-based buffer in a FSO/RF IP network," *Proc. SPIE, Free Space Laser Comm. X*, vol. 7814, 2010.
- [26] K. E. Wilson and J. R. Lesh, "An overview of Galileo Optical Experiment (GOPEX)," Tech Report: TDA progress Report 42-114, Communication Systems Research Section, NASA, 1993.
- [27] S. Janson and R. Welle, "The NASA optical communication and sensor demonstration program: An update," 28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2014.
- [28] K. E. Wilson, "An overview of the GOLD experiment between the ETS-VI satellite and the table mountain facility," TDA Progress Report 42-124, Comm. Sys. and Research Sec., pp. 9-19, 1996.
- [29] T. T. Nielsen and G. Oppenhausser, "In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX," *Proc. SPIE, Free Space Laser Comm. Tech. XIV*, vol. 4635, 2002.
- [30] "Europe's EDRS-C/Hylas-3 satellite launch set for early 2018". Space Intel Report. 15 April 2017. Retrieved 18 August 2017.
- [31] M. Abrahamson, B. Oaida, O. Sindi, and A. Biswas, "Achieving operational two-way laser acquisition for OPALS payload on the international space station," *Proc. SPIE 9354, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVII*, 2015.
- [32] Hauschildt, Harald (2012). "European Data Relay System – one year to go!". *International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*. Retrieved 2015-09-07.

- network communication with the application of solar power". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. **173** (1): 012016.
- [52] Li-Fi Consortium next generation optical wireless communication technology. (2014, Apr. 19). [Online]. Available: <http://www.lificonsortium.org>
- [53] هادی بخشی و احمد درودی، "تحلیل پارامترهای انتشار پرتو برای سیستم ارتباط نوری در فضای آزاد آزمایشگاه اپتیک دانشگاه زنجان"، بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، ۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸.
- [54] سیدعلی میررفیع و غلامرضا جلالی فراهانی، "ارایه راهبردهای پدافند غیرعامل کشور در برابر تهدیدات سایبری"، فصلنامه مطالعات دفاعی استراتژیک، سال ۱۷، شماره ۷۵، بهار ۱۳۹۸.
- [55] سند راهبردی پدافند سایبری کشور، سازمان پدافند غیرعامل کشور، ۱۳۹۲.
- [56] غلامرضا جلالی فراهانی و محمد لونی، (۱۳۸۵)، تدوین راهبرد ملی پدافند غیرعامل در حوزه ارتباطات، دانشگاه عالی دفاع ملی، ۱۳۸۵.
- Evaluation, Defense-Wide, Fiscal Year (FY) 2010" (PDF). Retrieved October 4, 2014.
- [48] US Federal Employees. "US\$40.5M in 2010 & 2011, page 273, Department of Defense, Fiscal Year (FY) 2012 Budget Estimates, February 2011, Defense Advanced Research Projects Agency, Justification Book Volume 1, Research, Development, Test & Evaluation, Defense-Wide, Fiscal Year (FY) 2012 Budget Estimates". Retrieved October 4, 2014.
- [49] US Federal Employees. "US\$5.9M in 2012, page 250, Department of Defense, Fiscal Year (FY) 2014 President's Budget Submission, April 2013, Defense Advanced Research Projects Agency, Justification Book Volume 1, Research, Development, Test & Evaluation, Defense-Wide". Archived from the original on October 25, 2016. Retrieved October 4, 2014.
- [50] Tsonev, Dobroslav; Videv, Stefan; Haas, Harald (18 December 2013). "Light fidelity (Li-Fi): towards all-optical networking". *Proc. SPIE. Broadband Access Communication Technologies VIII. Broadband Access Communication Technologies VIII*. **9007** (2): 900702.
- [51] Ayara, W. A.; Usikalu, M. R.; Akinyemi, M. L.; Adagunodo, T. A.; Oyeyemi, K. D. (July 2018). "Review on Li-Fi: an advancement in wireless

A Review of the Operational Features of FSO Links, the Broadband and Secure Wireless Links of the Future Communications

Hadi Bakhshi & Ahmad Darudi
FSO Lab., Department of Physics, University of Zanjan

Abstract

The usage of light to communicate and convey a message has an effective history of human civilization. Lighthouses, optical Morse and now, the vital optical fiber networks are some of the techniques that humans have used to meet their communication needs. Free Space Optical Communication System, FSO, is an innovative technology that was first introduced to support the demands of space and intra-satellite communications, and today researchers are working to meet the commercial demands of the communication industry by the technology. In this method, the frequencies of the visible and infrared spectra of Electromagnetic waves are used as carriers of the signals and laser beams are transmitted between the transmitter and the receiver in free space. The higher bandwidth and providing greater security and immunity in compare with radio links, besides higher flexibility and lower operating costs compared to fiber-based networks, are some of the main features that this technology offers. In this article, we will review this technology and its benefits, along with the challenges ahead, the applications and the importance of starting research and investigation at this technology as the foundation of future communications. In the end, we introduce the designed and driven the FSO system at University of Zanjan as one of the ongoing activities in this field in the country.

(Times New Roman 10)

Keywords:

Free Space Optical Communication, Wireless Networks, Secure Link, Intra-Satellite and Space Connections, Lasers.