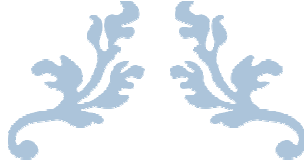


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس شهید رجائی



# اصول مخابرات بی سیم نوری

مبتنی بر دیودهای نورانی



ترجمه و تالیف:

سعید علیائی و فرزانه ابراهیمی

آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک - دانشگاه تربیت مدرس شهید رجائی

سرشناسه	: دیمیتروف، اسویلین Dimitrov, Svilen
عنوان و نام پدیدآور	: اصول مخابرات بی‌سیم نوری مبتنی بر دیودهای نورانی / [اسویلین دیمیتروف، هارالد هاس]؛ ترجمه و تالیف سعید علیانی، فرزانه ابراهیمی.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ۱۳۹۶
مشخصات ظاهری	: ۳۴۰: تصویر، جدول، نمودار؛ وزیری
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۹۹۶۶۹-۱-۲
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: عنوان اصلی: Principles of LED light communications: towards networked Li-Fi, 2015.
موضوع	: ارتباطات نوری
موضوع	: Optical communications
موضوع	: شبکه‌های محلی بی‌سیم
موضوع	: Wireless LANs
موضوع	: دیودهای نور گسیل
موضوع	: Light emitting diodes
شناسه افزوده	: هاس، هارالد، ۱۹۶۵ - م.
شناسه افزوده	: Haas, Harald
شناسه افزوده	: ابراهیمی، فرزانه، ۱۳۷۰ - مترجم
شناسه افزوده	: علیانی، سعید، ۱۳۵۳ - مترجم
شناسه افزوده	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
شناسه افزوده	: Shahid Rajaei Teacher Training University
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۶۶ الف۹۵/۵۱۰۳/۵۹TK
رده بندی دیویی	: ۶۲۱/۳۸۲۷
شماره کتابشناسی ملی	: ۵۰۷۴۹۴۶



دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

عنوان	: اصول مخابرات بی‌سیم نوری مبتنی بر دیودهای نورانی
ترجمه و تالیف	: دکتر سعید علیانی، عضو هیات علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی / مهندس فرزانه ابراهیمی
ویراستار علمی	: دکتر شهریار شیروانی مقدم
ویراستار ادبی	: عاطفه نجیبی
نوبت چاپ	: اول - زمستان ۱۳۹۶
انتشارات	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
لیتوگرافی	: رجاء نقشینه
چاپ	: شریف
طراح جلد	: محمد مشتاقی
ناظر چاپ	: محمد معتمدی نژاد
صفحه‌آرا	: عاطفه نجیبی
کارشناسان	: نیره فیروزی / طاهره کیا / علی رضایی اهوآنوئی
شمارگان	: ۱۰۰۰ جلد
قیمت	: ۲۵۰,۰۰۰ ریال
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۹۹۶۶۹-۱-۲
	ISBN: 978-600-99669-1-2

کلیه حقوق این اثر برای مؤلفین و دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی محفوظ است.  
نشانی: تهران، لویزان - کد پستی ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸ - صندوق پستی ۱۶۳ - ۱۶۷۸۵ - تلفن: (۲۶۳۲) ۹ - ۲۲۹۷۰۰۶۰  
۲۲۹۷۰۰۷۰، تلفکس: ۲۲۹۷۰۰۴۲، پست الکترونیکی: publish@srttu.edu، وب سایت: http://publish.srttu.edu

## تقدیم به:

پدر عزیز و مادر مهربانم؛

که همواره پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

و همسر عزیزم محمد؛

که همواره با مهربانی و صبوری همگام و امیدبخش من بوده است.

از طرف فرزانه ابراهیمی

## تقدیم به:

آنان که وجودم جز هدیه وجودشان نیست؛ **پدر صبور و مادر مهربانم**،

**و فرزند دلبندم، آرتین**؛ امیدبخش زندگی‌ام که آسایش او آرامش من است،

**و همسر مهربانم**؛ که با هم‌دلی و صبوریش در تمامی لحظات، رفیق راه بوده و هست.

از طرف سعید علیائی



## پیش‌گفتار

زمان زیادی از جایگزینی دیودهای نورانی به جای لامپ‌های رشته‌ای نمی‌گذرد، اما در همین مدت کوتاه، دیودهای نورانی در تامین روشنایی محیط‌های سرپوشیده و فضاهای باز رشد فزاینده‌ای داشته‌اند. از سوی دیگر محدودیت در پهنای باند مخابرات امواج رادیویی موجب شده محققان به دنبال راه حلی مکمل برای افزایش پهنای باند و نرخ انتقال داده باشند. مخابرات بی‌سیم نوری به دلیل داشتن طیف عظیم بدون نیاز به مجوز، نزدیک به ۶۷۰ تراهرتز، توانایی لازم برای فراهم کردن یک پیونده بی‌سیم با سرعت بسیار بالای انتقال داده را دارد. مخابرات بی‌سیم نوری در حین استفاده از دیودهای نورانی به عنوان تامین‌کننده روشنایی محیط، از قابلیت مدوله شدن و ارسال و دریافت سیگنال‌های نوری استفاده می‌کند؛ قابلیت که تا پیش از این به دلیل محدودیت فرکانسی شدید منابع نورانی تامین‌کننده روشنایی محیط، امکان‌پذیر نبود. این موضوع فقط به منابع روشنایی محیط‌های سرپوشیده ختم نمی‌شود. خودروهای امروزی از دیودهای نورانی بهره می‌برند و انواع دیودهای نورانی در چراغ‌های راهنمایی مورد استفاده قرار می‌گیرند و از این‌رو بستری بسیار مناسب را برای مخابرات نوری فراهم می‌سازند؛ مخابراتی که لزوماً برای انتقال پرتو نور نیازمند استفاده از موج‌برهایی مانند فیبر نوری نیست و از فضای آزاد برای انتقال داده‌های آنالوگ یا دیجیتال در قالب پرتو نور استفاده می‌کند.

با توجه به ضرورت پرداختن به این حوزه از علم، این کتاب قصد آن دارد تا به مباحثی در خصوص مخابرات بی‌سیم نوری بپردازد. عمده بخش‌های این کتاب برگرفته از کتاب نوشته Harald Haas و Svilen Dimitrov است که در سال ۲۰۱۵ توسط انتشارات دانشگاه کمبریج به زیور طبع آراسته شده است. با توجه به این‌که محتوای این کتاب نیاز به بازنگری داشته است بر آن شدیم تا بخش‌هایی از آن را با تغییراتی ارائه نماییم و همچنین روی کاربردهای آن تاکید بیشتری داشته باشیم. بنابراین در یک فصل مجزا نیز به ارائه سامانه مخابرات نور مرئی مبتنی بر حسگر تصویربرداری پرداخته‌ایم. فصل‌های ابتدایی این کتاب ضمن ارائه مقدمه‌ای از موضوع، به پیشرفت‌های جدید در حوزه مخابرات بی‌سیم نوری می‌پردازد. مباحث واحد پردازش غیرخطی و طرح‌های مدولاسیون دیجیتال نیز در فصل‌های سوم و چهارم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فصل

پنجم به موضوع نرخ انتقال داده و بازدهی طیفی اختصاص داده شده است و محدودیت‌های نرخ انتقال اطلاعات در مخابرات بی‌سیم نوری در آن بررسی می‌شود. انتقال چند ورودی - چند خروجی و مدل سامانه مخابرات بی‌سیم نوری نیز در فصل ششم آمده است. عملکرد شبکه‌های سلولی مخابرات بی‌سیم نوری در فصل هفتم و همان‌طور که اشاره شد موضوع سامانه مخابرات نور مرئی مبتنی بر حسگر تصویربرداری در فصل هشتم بیان شده است.

در این کتاب به منظور سهولت دسترسی خوانندگان محترم به معادل کلمه‌ها، علاوه بر قراردادن زیرنویس‌ها، در انتهای کتاب، دو واژه‌نامه فارسی به انگلیسی و انگلیسی به فارسی آورده شده است تا ضمن ایجاد متنی روان و با واژه‌های اصیل فارسی، امکان دسترسی سریع به اصل واژه نیز فراهم گردد. نمایه انتهای کتاب نیز سریع‌ترین راه برای دستیابی به مفاهیم، بدون صرف وقت زیاد برای جستجو در متن کتاب، است.

در پایان بر خود لازم می‌دانیم که از کلیه عزیزانی که در ترجمه و تدوین این کتاب ما را یاری رسانده‌اند تشکر کنیم. نخست، از داوران گرامی که این کتاب را بازبینی و با ارائه نکات و پیشنهادهاى ارزنده، ما را در جهت بهبود نگارش علمی و محتوایی یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌نماییم. با توجه به موضوعات تخصصی این کتاب، برای غنای بیشتر علمی و روانی مطالب، از تجربه و تخصص استاد ارجمند و فرهیخته آقای دکتر شهريار شیروانی‌مقدم بهره بردیم که به این وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را تقدیم ایشان می‌داریم. از همکار عزیز، آقای مهندس محمد مشتاقی سپاس‌گزاریم که زیبایی طرح جلد این کتاب مدیون زحمات ایشان است. ویرایش ادبی این کتاب نیز بر عهده سرکار خانم عاطفه نجیبی بود که لازم است از صبر و حوصله و دقت نظر ایشان نیز تشکر کنیم. به مانند هر نوشتار دیگری، متن این کتاب نیز خالی از اشکال نیست هرچند که سعی شده است متن آن بارها ویرایش شود و بنابراین دریافت پیشنهادهاى ارزنده خوانندگان گرامی، موجب بهبود سطح علمی و ادبی آن در ویرایش‌های بعدی خواهد شد. امیدواریم خوانندگان فرهیخته با ارسال نظرات و نکات اصلاحی خود به نشانی [s\\_olyaee@srttu.edu](mailto:s_olyaee@srttu.edu) ما را در این مهم یاری‌گر باشند.

سعید علیائی و فرزانه ابراهیمی

زمستان ۱۳۹۶

## فهرست مطالب

## فصل نخست: مقدمه

۲	۱-۱- تاریخچه مخابرات بی‌سیم نوری
۶	۲-۱- پیشرفت‌های مخابرات بی‌سیم نوری
۸	۳-۱- حوزه‌های کاربرد
۱۰	۴-۱- Li-Fi
۱۰	۱-۴-۱- مدولاسیون
۱۲	۲-۴-۱- دسترسی چندگانه
۱۴	۳-۴-۱- پیونده فراسو (لینک رو به بالا)
۱۵	۴-۴-۱- آتوسل

## فصل دوم: کلیات سامانه مخابرات بی‌سیم نوری

۱۸	۱-۲- مقدمه
۲۰	۲-۲- راه‌اندازی سامانه
۲۲	۳-۲- سناریوهای ارتباطی
۲۳	۱-۳-۲- ارتباطات خط دید مستقیم
۲۳	۲-۳-۱- ارتباطات خط دید غیرمستقیم
۲۴	۴-۲- واحدهای پردازشی نوری
۲۴	۱-۴-۲- فرستنده
۲۹	۲-۴-۲- گیرنده
۳۲	۵-۲- کانال نوری بی‌سیم
۳۳	۱-۵-۲- مدل کانال
۳۴	۲-۵-۲- تلفات مسیر
۴۳	۳-۵-۲- گسترش تأخیر و پهنای باند همدوسی
۴۵	۴-۵-۲- متعادل‌ساز کانال
۵۰	۶-۲- خلاصه

---

**فصل سوم: واحد پردازش غیر خطی**


---

۵۴	۱-۳- مقدمه
۵۵	۲-۳- تابع انتقال غیر خطی تعمیم یافته
۵۷	۳-۳- پیش اعوجاج
۶۰	۴-۳- اعوجاج غیر خطی سیگنال های گوسی
۶۱	۱-۴-۳- تحلیل اعوجاج غیر خطی تعمیم یافته
۶۷	۲-۴-۳- تحلیل اعوجاج برش دوطرفه سیگنال
۷۴	۵-۳- خلاصه

---

**فصل چهارم: طرح های مدولاسیون دیجیتال**


---

۷۸	۱-۴- مقدمه
۷۸	۲-۴- سیگنال های نوری
۸۶	۳-۴- مدولاسیون تک حاملی
۸۷	۱-۳-۴- مدولاسیون موقعیت پالس: M-PPM
۹۱	۲-۳-۴- مدولاسیون دامنه پالس: M-PAM
۹۳	۳-۳-۴- عملکرد BER با پیش اعوجاج در AWGN
۹۶	۴-۴- مدولاسیون چند حاملی
۹۷	۱-۴-۴- OFDM نوری با M-QAM: DCO-OFDM و ACO-OFDM
۱۰۵	۲-۴-۴- عملکرد BER با اعوجاج غیر خطی تعمیم داده شده در AWGN
۱۰۷	۳-۴-۴- عملکرد BER با پیش اعوجاج در AWGN

---

**فصل پنجم: نرخ انتقال داده و بازدهی طیفی**


---

۱۱۲	۱-۵- مقدمه
۱۱۴	۲-۵- محدودیت های نرخ اطلاعات در مخابرات بی سیم نوری
۱۱۵	۱-۲-۵- اختلالات پیونده
۱۱۷	۲-۲-۵- بهینه سازی نرخ اطلاعات
۱۲۰	۳-۵- طرح های مدولاسیون در کانال محوشوندگی تخت با AWGN
۱۲۱	۱-۳-۵- بهینه سازی بایاس سیگنال های گوسی



۱۲۵	۲-۳-۵- بیشینه بازدهی طیفی بدون محدودیت متوسط توان نوری
۱۲۹	۳-۳-۵- بازدهی طیفی با متوسط محدودیت توان نوری
۱۳۵	۴-۵- نرخ اطلاعات مدولاسیون مبتنی بر OFDM با اعوجاج غیرخطی
۱۳۵	۱-۴-۵- بهینه‌سازی بایاس سیگنال‌های گوسی
۱۳۹	۲-۴-۵- بیشینه نرخ اطلاعات بدون متوسط محدودیت توان نوری
۱۴۲	۳-۴-۵- نرخ اطلاعات با محدودیت متوسط توان نوری
۱۴۷	۵-۵- طرح‌های مدولاسیون در کانال پاشنده با AWGN
۱۴۸	۱-۵-۵- بهینه‌سازی بایاس سیگنال‌های گوسی
۱۵۱	۲-۵-۵- تاوان بایاس DC
۱۵۲	۳-۵-۵- تاوان متعادل‌ساز
۱۵۴	۴-۵-۵- بیشینه بازدهی طیفی بدون محدودیت متوسط توان نوری
۱۵۷	۶-۵- خلاصه

### فصل ششم: انتقال چند ورودی - چند خروجی

۱۶۲	۱-۶- مقدمه
۱۶۴	۲-۶- مدل سامانه
۱۶۸	۳-۶- روش‌های MIMO
۱۶۸	۱-۳-۶- کدگذاری تکراری
۱۷۱	۲-۳-۶- مالتی‌پلکس فضایی
۱۷۳	۳-۳-۶- مدولاسیون فضایی
۱۷۶	۴-۳-۶- پیچیدگی محاسباتی
۱۷۸	۴-۶- عملکرد نرخ خطای بیت
۱۷۸	۱-۴-۶- تغییر فاصله بین فرستنده‌ها
۱۸۵	۲-۴-۶- تغییر موقعیت گیرنده‌ها
۱۸۷	۳-۴-۶- عدم توازن توان بین فرستنده‌ها
۱۹۰	۴-۴-۶- انسداد پیونده
۱۹۲	۵-۶- خلاصه

### فصل هفتم: عملکرد شبکه‌های سلولی مخابرات بی سیم نوری

۱۹۶	۱-۷- مقدمه
۱۹۸	۲-۷- عملکرد سامانه با استفاده از بخش‌بندی منابع ایستا
۲۰۰	۱-۲-۷- مدل‌سازی نسبت سیگنال به تداخل به اضافه نویز
۲۰۵	۲-۲-۷- مدولاسیون وقفی و کدگذاری
۲۰۸	۳-۲-۷- عملکرد سامانه OFDM نوری در اتاقک هواپیما
۲۱۰	۳-۷- هماهنگ‌سازی تداخل در سلول‌های نوری با استفاده از سیگنال‌دهی پیام اشغال
۲۱۲	۱-۳-۷- مدل سامانه
۲۱۴	۲-۳-۷- هماهنگ‌سازی تداخل در سلول‌های نوری
۲۱۷	۳-۳-۷- اصل پیام اشغال
۲۲۰	۴-۳-۷- اجتناب از مغایرت بین سلول‌های همسایه
۲۲۳	۵-۳-۷- زمان‌بندی کاربر و سازوکار ذخیره‌سازی منصفانه
۲۲۷	۶-۳-۷- تطبیق پیونده
۲۲۹	۷-۳-۷- عملکرد سامانه با سیگنال‌دهی پیام اشغال
۲۳۹	۸-۳-۷- عملکرد سامانه با سیگنال‌دهی پیام اشغال و سازوکار ذخیره‌سازی منصفانه
۲۴۳	۴-۷- خلاصه

### فصل هشتم: سامانه مخابرات نور مرئی مبتنی بر حسگر تصویربرداری

۲۴۶	۱-۸- مقدمه
۲۴۷	۲-۸- حسگرهای تصویربرداری
۲۴۸	۱-۲-۸- حسگر تصویربرداری CCD
۲۴۹	۲-۲-۸- حسگر تصویربرداری CMOS
۲۵۰	۳-۲-۸- مقایسه حسگرهای تصویربرداری CCD، CMOS و آشکارسازهای نوری
۲۵۲	۳-۸- حسگر تصویربرداری به عنوان گیرنده مخابرات بی سیم نور مرئی
۲۵۳	۱-۳-۸- نمونه‌برداری موقت

- ۲۵۵ ۲-۳-۸- نمونه برداری فضایی
- ۲۵۶ ۳-۳-۸- بیشینه نرخ داده قابل دستیابی
- ۲۵۷ ۴-۸- طراحی یک سامانه مخابرات بی سیم نور مرئی مبتنی بر حسگر  
تصویربرداری
- ۲۵۷ ۱-۴-۸- فرستنده
- ۲۵۹ ۲-۴-۸- گیرنده
- ۲۶۰ ۳-۴-۸- کانال
- ۲۶۱ ۴-۴-۸- میدان دید
- ۲۶۲ ۵-۴-۸- اثر فاصله ارتباطی و فرکانس فضایی
- ۲۶۴ ۵-۸- ارسال نور مرئی کاملاً موازی
- ۲۶۴ ۱-۵-۸- مفهوم
- ۲۶۶ ۲-۵-۸- معماری سامانه
- ۲۶۸ ۳-۵-۸- ایجاد پیونده
- ۲۶۹ ۴-۵-۸- نمونه اولیه سامانه ارسال داده کاملاً موازی
- ۲۷۰ ۶-۸- برآورد وضعیت حسگر دقیق
- ۲۷۰ ۱-۶-۸- مقدمه
- ۲۷۰ ۲-۶-۸- هندسه دید منفرد
- ۲۷۳ ۳-۶-۸- برآورد وضعیت با استفاده از نور
- ۲۷۵ ۴-۶-۸- استخراج نور
- ۲۷۶ ۱-۴-۶-۸- محاسبه آستانه
- ۲۷۶ ۲-۴-۶-۸- استخراج گزینه‌های نوری
- ۲۷۶ ۳-۴-۶-۸- بررسی خطا
- ۲۷۷ ۷-۸- کاربردهای مخابرات مبتنی بر حسگر نوری
- ۲۷۷ ۱-۷-۸- مخابرات سیگنال ترافیک
- ۲۷۹ ۲-۷-۸- اندازه‌گیری مکان در مهندسی عمران
- ۲۷۹ ۱-۲-۷-۸- اساس مثلث‌سازی
- ۲۸۰ ۲-۲-۷-۸- مثلث‌سازی با مخابرات بی سیم نور مرئی مبتنی بر حسگر

	تصویربرداری
۲۸۱	۸-۷-۲-۳- کاربرد در نظارت بر شکل پل
۲۸۲	۸-۸- خلاصه

---

پیوست‌ها

---

۲۸۳	سرواژه‌ها
۲۸۹	مراجع
۳۰۹	واژه‌نامه انگلیسی به فارسی
۳۱۷	واژه‌نامه فارسی به انگلیسی
۳۲۵	نمایه

فصل نخست

مقدمه

اصول مخابرات بی سیم نوری

مبتهی بر دیوده‌های نورانی

مخابرات نوری یکی از شکل‌های ارتباطات است که از نور به‌عنوان حامل پیام استفاده می‌کند. مخابرات بی‌سیم نوری<sup>۱</sup> که از انتقال پیام با آتش و دود در فانوس‌های دریایی در زمان‌های کهن سرچشمه داشته است به فناوری مکمل مخابرات فرکانس رادیویی با ظرفیت بالا، تکامل یافته است. سامانه‌های<sup>۲</sup> مخابرات بی‌سیم نوری از طول موج‌هایی در طیف فرورسرخ برای مخابرات فرورسرخ<sup>۳</sup> و در طیف نور مرئی برای مخابرات نور مرئی<sup>۴</sup> استفاده می‌کنند. مخابرات بی‌سیم نوری به دلیل داشتن طیف عظیم بدون نیاز به مجوز<sup>۵</sup>، نزدیک به ۶۷۰ تراهرتز، توانایی لازم را برای فراهم کردن یک پیونده<sup>۶</sup> بی‌سیم با سرعت بسیار بالای انتقال داده دارد. در این کتاب شیوه‌های مدولاسیون نوری، پردازش سیگنال و روش‌های شبکه‌ای برای پیشینه‌سازی کارایی شبکه بی‌سیم نوری با استفاده از مؤلفه‌های موجود ارائه شده است.

## ۱-۱- تاریخچه مخابرات بی‌سیم نوری

مثال‌هایی از مخابرات بی‌سیم نوری به شکل آتش چراغ‌های دریایی و علامت با دود برای ارسال پیام را در اغلب فرهنگ‌ها می‌توان پیدا کرد. خطوط سمافور<sup>۷</sup> اولین شکل از کاربرد تخصصی از مخابرات بی‌سیم نوری بود [۱]. مهندس فرانسوی کلاد چاپ<sup>۸</sup> اولین شبکه تلگراف نوری را در سال ۱۷۹۲ ساخت. برج‌های سمافور او توانایی انتقال ۱۶۹ علامت اطلاعاتی را داشت که به‌وسیله مکان دو بازو متصل به یک میله عرضی کد شده بودند. هلیوگراف به‌عنوان مثال دیگری از سامانه مخابرات بی‌سیم نوری اولیه، یک تلگراف بی‌سیم خورشیدی است که با فلاش‌هایی از نور خورشید به‌وسیله چرخش آینه یا قطع پرتو توسط یک شاتر، علامت می‌دهد. بعد از اختراع کد مورس در سال ۱۸۳۶،

<sup>1</sup> Optical Wireless Communications (OWC)

<sup>2</sup> Systems

<sup>3</sup> IR Communications

<sup>4</sup> Visible Light Communications (VLC)

<sup>5</sup> License

<sup>6</sup> Link

<sup>7</sup> Semaphore

<sup>8</sup> Claude Chappe

کشتی‌های نیروی دریایی با استفاده از علامت نوری، برای جهت‌یابی، با فانوس دریایی در ساحل ارتباط برقرار می‌کردند. در سال ۱۸۸۰، الکساندر گراهام بل اولین پیاده‌سازی پیونده نوری فضای آزاد<sup>۱</sup> را به شکل فوتوفون نمایش داد [۲]. بل با استفاده از آینه ارتعاشی در فرستنده و لرزش بلور سلینیوم در نقطه کانونی گیرنده سهموی توانست یک سیگنال صوتی را روی یک سیگنال نوری مدوله کند.

پیشرفت فناوری مخابرات بی‌سیم نوری بعد از پژوهش پیش‌گام جی‌فلر و باپست<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۹ سرعت قابل‌توجهی به دست آورد [۳]. آن‌ها توانایی بالای مخابرات بی‌سیم نوری در شبکه‌های خانگی را که نوید دهنده پهنای باند چند هزار تراهرتز در حوزه نوری طیف الکترومغناطیس است نشان دادند. یکی از شاخه‌های مخابرات بی‌سیم نوری، مخابرات نوری فضای آزاد برای فاصله‌های طولانی را هدف قرار داده است که بیش‌تر با استفاده از دیودهای لیزری با همدوسی نور بالا تحقق می‌یابند [۴]. در سمت گیرنده، عموماً یک دیود نوری<sup>۳</sup> به‌کار گرفته می‌شود. شاخه دیگری از مخابرات بی‌سیم نوری روی شبکه‌های بی‌سیم موبایل در محیط داخلی تمرکز دارد که با استفاده از انتشار دیودهای نورانی<sup>۴</sup> به‌عنوان فرستنده تحقق بخشیده می‌شوند [۳]. اولین سامانه مخابرات بی‌سیم نوری در محیط داخلی در سال ۱۹۷۹ توسط جی‌فلر و باپست مطرح شد [۳]. در مرکز طیف فرسرخ در طول موج ۹۵۰ نانومتر، این سامانه با استفاده از مدولاسیون OOK<sup>۵</sup> و پخش تابش برای پوشش یک اتاق اداری، ظرفیت دریافت ۱ مگابیت بر ثانیه را داشت [۵]. در سال ۱۹۹۶ مارش و کان<sup>۶</sup> یک سامانه پخش OOK فرسرخ در محیط داخلی با سرعت انتقال اطلاعات ۵۰ مگابیت بر ثانیه را تشریح کردند. سپس در سال ۲۰۰۰ کاروترز و کان<sup>۷</sup> پیاده‌سازی یک سامانه OOK فرسرخ سریع‌تر، سرعت انتقال

<sup>1</sup> Free Space Optics (FSO)

<sup>2</sup> Gfeller and Bapst

<sup>3</sup> Photodiode

<sup>4</sup> Light Emitting Diode (LED)

<sup>5</sup> On-Off Keying (OOK)

<sup>6</sup> Marsh and Kahn

<sup>7</sup> Carruthers and Kahn

اطلاعات ۷۰ مگابیت بر ثانیه و توانایی انتقال داده با نرخ بیش از ۱۰۰ مگابیت بر ثانیه را ارائه کردند [۶]. اولین بار تانکا<sup>۱</sup> و همکارانش دیود نوری سفید را علاوه بر روشنایی محیط یک اتاق برای انتقال اطلاعات در نظر گرفتند. در سال ۲۰۰۳ آن‌ها بر پایه یک سامانه OOK VLC، سیستمی با سرعت انتقال اطلاعات بیش از ۴۰۰ مگابیت بر ثانیه را ارائه دادند [۷]. افگانی<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۶ برای اولین بار با استفاده از اثبات مفهومی حد بالای نسبت بیشینه به موثر<sup>۳</sup> مالتی پلکس تقسیم فرکانس متعامد<sup>۴</sup>، نشان داد که به طور معمول در مخابرات فروسرخ یک عیب می‌تواند به یک مزیت در مدولاسیون چگالی/ آشکارسازی مستقیم<sup>۵</sup> تبدیل شود. آن‌ها طرح انتقال OFDM نوری با بایاس جریان مستقیم<sup>۶</sup> را پیاده‌سازی کردند که بعدها توسط گروه‌های تحقیقاتی دیگر مورد استفاده قرار گرفت. وسیس<sup>۷</sup> توانایی سامانه‌های مخابرات نور مرئی را با تحقق سرعت ۵۰۰ مگابیت بر ثانیه نمایش داد [۹]. پیاده‌سازی آن‌ها بر اساس DCO-OFDM همراه با بارگذاری بیت و توان و برش متقارن سیگنال بود. آن‌ها همچنین توانستند با مدولاسیون مستقل مودهای قرمز، سبز و آبی، یک RGB white LED در یک روش مالتی پلکس تقسیم طول موجی<sup>۸</sup> و با به‌کارگیری فیلترهای نوری نسبی در گیرنده، سرعت انتقال ۸۰۰ مگابیت بر ثانیه‌ای یک سیگنال نوری RGB LED را نشان دهند [۱۰]. خالد<sup>۹</sup> با روشی مشابه DCO-OFDM، پیوندهای با بیشینه سرعت ۱ گیگا بیت بر ثانیه را با استفاده از دیود نوری سفید پوشیده شده با فسفر، ارائه داد [۱۱]. هم‌چنین آن‌ها پیونده ۳/۴ گیگا بیت بر ثانیه‌ای را با استفاده از RGB LED های موجود تشریح کردند [۱۲]. سامانه مخابرات بی‌سیم نوری دیگری با سرعتی در حد گیگا بیت بر ثانیه با دیود نوری سفید پوشیده شده با فسفر با بهره‌برداری از پیکربندی چهار ورودی چهار خروجی،

<sup>1</sup> Tanka et al.

<sup>2</sup> Afgani et al.

<sup>3</sup> Root Mean Square (RMS)

<sup>4</sup> Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

<sup>5</sup> Intensity Modulation/ Direct Detection (IM/DD)

<sup>6</sup> Direct-Current-biased Optical OFDM (DCO-OFDM)

<sup>7</sup> Vucic et al.

<sup>8</sup> Wavelength Division Multiplexing (WDM)

<sup>9</sup> Khalid et al.



توسط آزه‌ار<sup>۱</sup> تشریح شد [۱۳]. هم‌چنین تسونو<sup>۲</sup> سرعت انتقال ۳/۵ گیگابیت بر ثانیه را را از یک میکرو دیود نورانی تک‌رنگ به شکل یک ورودی-یک خروجی مطرح کرد [۱۴]، [۱۵].

در این کتاب اصول مدولاسیون نوری و پردازش سیگنال که توانایی پیاده‌سازی سرعت‌های انتقال اطلاعات یاد شده را دارند در کنار مفاهیم جدید شبکه ارائه می‌شود [۱۶، ۱۸]. این پیشرفت‌ها، مخابرات بی‌سیم نوری را به‌عنوان فناوری شبکه بی‌سیم در حال ظهور ارتقاء داده است. هماندهی نوری<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۱ توسط هارالد هاس<sup>۴</sup> در تدگلوبال<sup>۵</sup> ابداع شد [۱۹].

در اصل، پیونده بی‌سیم نوری در طیف فرورسرخ نزدیک<sup>۶</sup> برای مخابرات برد کوتاه هدف‌گذاری شده است [۳، ۲۰، ۲۲]. از سال ۱۹۹۳ استانداردسازی مجموعه پروتکل‌های انجمن داده فرورسرخ<sup>۷</sup> در مخابرات بی‌سیم فرورسرخ وسایل قابل‌حمل مانند گوشی موبایل، لپ‌تاپ، دوربین، کنترل‌کننده‌های از راه دور و وسایلی دیگر اجرا شد [۲۳]. با پیشرفت فناوری نوردهی حالت جامد، دیودهای نورانی به دلیل قابلیت اطمینان و بهره انرژی بالای‌شان (به‌عنوان مثال ۵٪ و ۳۰٪ در دیودهای نورانی رایج) جایگزین لامپ‌های رشته‌ای شدند [۲۴]. هم‌چنین در دیودهای نورانی علاوه بر ایجاد روشنایی، ظرفیت بالای پخش داده‌های بی‌سیم نیز دیده می‌شود [۲۳، ۲۵]. استانداردسازی تحقیقات مخابرات نور مرئی توسط کنسرسیوم مخابرات نوری در ژاپن انجام می‌شود. در سال ۲۰۱۱ سازمان IEEE استاندارد IEEE 802.15.7\_2011، "استاندارد IEEE برای

<sup>1</sup> Azhare

<sup>2</sup> Tesono

<sup>3</sup> Light Fidelity (LiFi)

<sup>4</sup> Harald Haas

<sup>5</sup> TED Global

<sup>6</sup> Near InfraRed (NIR)

<sup>7</sup> Infrared Data Association (IrDA)

شبکه‌های محلی و شهری، بخش ۱۵/۷: مخابرات بی سیم نوری برد کوتاه با استفاده از نور مرئی " را برای VLC منتشر کرد [۳۵].

## ۱-۲- پیشرفت‌های مخابرات بی سیم نوری

در دو دهه اخیر گسترش بی سابقه سامانه‌های مخابرات بی سیم مشهود است. در ابتدا این سامانه‌ها فقط توانایی ارائه خدمت صوتی و بعضی خدمات اولیه اطلاعاتی را داشتند و در حال حاضر به شبکه‌های بسته داده با سرعت بالا ارتقاء یافته‌اند [۳۶]. با این حال، هنوز به افزایش کارایی انتقال داده و در نتیجه آن، افزایش سرعت انتقال داده نیاز است [۳۷].

با افزایش محبوبیت تلفن‌های هوشمند، ترافیک انتقال داده دستگاه‌های موبایل به صورت نمایی رشد می‌کند. هشدارهای متعددی در مورد بحران طیف RF وجود دارد زیرا افزایش درخواست انتقال داده ادامه دارد در حالی که بازده طیفی شبکه با وجود استانداردهای تازه و پیشرفت‌های عظیم فناوری اشباع شده است [۳۸]. در سال ۲۰۱۵ انتظار می‌رفت که کل ترافیک داده بی سیم به ۶ اگزابایت<sup>۱</sup> در ماه برسد، در نتیجه به طور بالقوه یک فاصله ۹۷ درصدی در شبکه‌های موبایل بین تقاضای ترافیک در هر دستگاه و سرعت انتقال داده در دسترس در هر دستگاه به وجود می‌آید [۳۹]. پیش‌بینی شده بود که در سال ۲۰۱۷ بیش از ۱۱ اگزابایت ترافیک داده از طریق شبکه‌های موبایل در هر ماه انتقال داده شود [۴۰]. به تازگی اتحادیه گیگابیت بی سیم<sup>۲</sup> استفاده از موج‌های میلی‌متری در باند ۶۰ گیگاهرتزی بدون نیاز به مجوز را پیشنهاد کرده است، که پهنای باند ۷ گیگاهرتزی در دسترس برای پیوندهای بی سیم برد کوتاه ۷ گیگا بیت در ثانیه را فعال می‌کند [۴۱]. هم‌چنین باند ۶۰ گیگاهرتزی به عنوان بخشی از چهارچوب کاری IEEE 802.11ad برای پیوندهای انتقال داده با کارایی بسیار بالا در شبکه‌های بی سیم

<sup>1</sup> Exabytes

<sup>2</sup> Wireless Gigabit Alliance