





پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش مخابرات سیستم

به کارگیری روش های LiFi برای طراحی سرویس های اینترنت هوشمند

نگارش

محمدرضا پاشازانوسی

استاد راهنما

دکتر جواد صالحی

تیر ۱۳۹۸

تصویب نامه

به نام خدا

دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد

این پایان نامه به عنوان تحقق بخشی از شرایط دریافت درجه کارشناسی ارشد است.

عنوان: به کارگیری روش های **LiFi** برای طراحی سرویس های اینترنت هوشمند

نگارش: محمدرضا پاشازانوسی

کمیته ممتحنین:

استاد راهنما: دکتر جواد صالحی

امضاء.....

استاد راهنمای همکار: -

امضاء.....

استاد مشاور: دکتر فرید آشتیانی

امضاء.....

استاد مدعو: دکتر سید علیرضا نظام الحسینی

امضاء.....

تاریخ:.....



اظهارنامه

(اصالت متن و محتوای پایان نامه کارشناسی ارشد)

عنوان پایان نامه:

.....

نام استاد راهنما:

نام استاد راهنمای همکار:

نام استاد مشاور:

.....

این جانب:

اظهار می دارم:

.....

۱- متن و نتایج علمی ارائه شده در این پایان نامه اصیل بوده و منحصرأ توسط این جانب و زیرنظر استادان (راهنما، همکار و مشاور) نام برده شده در بالا تهیه شده است.

۲- متن پایان نامه به این صورت در هیچ جای دیگری منتشر نشده است.

۳- متن و نتایج مندرج در این پایان نامه، حاصل تحقیقات این جانب به عنوان دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف است.

۴- کلیه مطالبی که از منابع دیگر در این پایان نامه مورد استفاده قرار گرفته، با ذکر مرجع مشخص شده است.

نام دانشجو:

تاریخ

امضا

نتایج تحقیقات مندرج در این پایان نامه و دستاوردهای مادی و معنوی ناشی از آن (شامل فرمول ها، توابع کتابخانه ای، نرم افزارها، سخت افزارها و مواردی که قابلیت ثبت اختراع دارد) متعلق به دانشگاه صنعتی شریف است. هیچ شخصیت حقیقی یا حقوقی بدون کسب اجازه از دانشگاه صنعتی شریف حق فروش و ادعای مالکیت مادی یا معنوی بر آن یا ثبت اختراع از آن را ندارد. همچنین کلیه حقوق مربوط به چاپ، تکثیر، نسخه برداری، ترجمه، اقتباس و نظائر آن در محیط های مختلف اعم از الکترونیکی، مجازی یا فیزیکی برای دانشگاه صنعتی شریف محفوظ است. نقل مطالب با ذکر ماخذ بلامانع است.

نام استادان راهنما:

نام دانشجو:

تاریخ

تاریخ

امضا

امضا

سپاسگزاری

در ابتدا از پدر و مادرم تشکر می‌کنم که زحمات فراوانی را برای اینجانب متحمل شدند و بعد، از استاد راهنمای خود، آقای دکتر جواد صالحی بابت همه‌ی راهنمایی‌هایشان قدردانی می‌کنم. در آخر نیز از دوست خود آقای علیرضا پارسای تشکر می‌کنم که در روند انجام پروژه از مشورت دادن به اینجانب دریغ نکردند.

چکیده

با گسترش نسل‌های جدید مخابرات بی‌سیم، مثل 4G، LTE و در آینده‌ی نزدیک 5G، نیاز به پهنای باند بیشتر در شبکه‌های دسترسی مخابراتی روز به روز در حال افزایش است، به ویژه وقتی که تکنولوژی‌های جدیدتری، مانند اینترنت اشیا، در حال توسعه هستند. به کمک سیستم‌های مخابراتی نور مرئی (VLC)، شبکه‌هایی در دهه‌های گذشته ایجاد شده است که قابلیت ارائه‌ی اینترنت با پهنای باندی در حدود چندین مگابیت بر ثانیه را دارند، ولی حتی این مقدار از پهنای باند نیز ناکافی است. بنابراین، نسل‌های جدیدتری از سیستم‌های VLC ایجاد شده است که به آن LiFi گفته می‌شود که در حقیقت مکمل شبکه‌های WiFi (در فرکانس‌های رادیویی) است. دو هدف اصلی LiFi ایجاد یک شبکه با ظرفیت بالا و استفاده از آن در امر روشنایی ساختمان به طور همزمان است. هدف اصلی این پروژه، با در نظر گرفتن چندین کاربر ثابت و نقطه‌ی اتصال LiFi، این است که چطور می‌توان مسئله‌ی تخصیص منابع در شبکه‌ی دسترسی را به وسیله‌ی الگوریتم‌های یادگیری ماشین حل کرد به گونه‌ای که چند شرط بهینه یا زیربهینه، مثل بیشینه‌کردن کمترین SINR و یا بیشینه‌کردن متوسط نرخ ارسال داده، اقناع شود. الگوریتم جدیدی به نام LiFi Grid معرفی شده است که یک روش هوشمند برای گروه‌بندی نقاط اتصال شبکه‌ی دسترسی LiFi محسوب می‌شود، طوری که این گروه‌ها، از نگاه طراحی کاربر-محور شبکه‌های دسترسی بی‌سیم، در دسته‌ی گروه‌های بی‌شکل قرار می‌گیرند. نشان داده شده است که الگوریتم LiFi Grid می‌تواند گروه‌بندی‌هایی را به صورت سیستماتیک ارائه دهد که از حیث بیشترین SINR کمینه، نزدیک به حالت بهینه باشد. همچنین تطبیق‌پذیری بسیار زیاد الگوریتم LiFi Grid با استاندارد IEEE 802.15.7 نیز نشان داده شده است.

کلیدواژه‌ها: شبکه‌های مخابرات نوری، شبکه‌های LiFi، یادگیری ماشین، اینترنت هوشمند، تخصیص منابع شبکه

فهرست مطالب

چکیده.....	د
فهرست جدول‌ها.....	ز
فهرست تصویرها.....	ح
فهرست نمودارها.....	ی
فصل ۱ : مقدمه.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۱
۱-۲ تاریخچه.....	۲
۱-۳ ویژگی‌های LiFi.....	۳
فصل ۲ : بررسی روش عملکرد یک فرستنده-گیرنده ی LiFi.....	۵
۲-۱ مدولاسیون‌های SCM.....	۷
۲-۱-۱ On-Off Keying (OOK).....	۸
۲-۱-۲ Pulse Position Modulation (PPM).....	۸
۲-۱-۳ Quadrature Amplitude Modulation (QAM).....	۹
۲-۲ مدولاسیون‌های MCM.....	۱۰
۲-۲-۱ خانواده ی مدولاسیون‌های OFDM.....	۱۱
۲-۲-۱-۱ DCO-OFDM.....	۱۳
۲-۲-۱-۲ ACO-OFDM.....	۱۵
۲-۲-۱-۳ بررسی چند مقاله در رابطه با مدولاسیون‌های ACO-OFDM و DCO-OFDM.....	۱۶
۲-۲-۱-۴ شبیه‌سازی دو مدولاسیون ACO-OFDM و DCO-OFDM.....	۱۸
۲-۳ مطالعه و بررسی لایه ی MAC پروتکل IEEE 802.15.7.....	۲۳
فصل ۳ : مطالعه و بررسی مباحث یادگیری ماشین.....	۲۶
۳-۱ نگاهی بر یادگیری ماشین.....	۲۶
۳-۲ بیان شکل‌گیری ایده‌های اولیه در استفاده از یادگیری ماشین.....	۳۱

۳-۲-۱	مقدمه‌ای کوتاه بر روش‌های CoMP	۳۴
۳-۲-۲	بررسی چندین مقاله در رابطه با مباحث یادگیری ماشین در شبکه‌های مخابرات نوری	۳۸
۳-۳	ایده‌ی مطرح شده در استفاده از یادگیری ماشین	۳۹
فصل ۴: الگوریتم LiFi Grid در شبکه‌های نوری بی‌سیم		
۴-۱	الگوریتم‌های یادگیری ماشین	۴۰
۴-۲	الگوریتم LiFi Grid در تشکیل سلول‌های بی‌شکل	۵۱
۴-۳	ساختار کد	۵۵
۴-۳-۱	ساختار کد مربوط به مدل‌سازی شبکه‌ی بی‌سیم نوری	۵۵
۴-۳-۲	ساختار کد مربوط به پیاده‌سازی الگوریتم‌های mean-shift و LiFi Grid	۵۷
۴-۳-۳	ساختار کد مربوط به روش Monte Carlo در حصول نتایج	۵۸
فصل ۵: نتیجه‌گیری		
۵-۱	نمودارها، شکل‌ها و جداول به دست آمده	۶۰
۵-۱-۱	شبیه‌سازی شماره‌ی ۱	۶۰
۵-۱-۲	شبیه‌سازی شماره‌ی ۲	۶۴
۵-۲	نتایج انجام پروژه	۶۸
مراجع		۷۳

فهرست جدول‌ها

- جدول ۴-۱- مقادیر استفاده شده در مدل شبکه‌ی نوری بی‌سیم..... ۵۶
- جدول ۵-۱- داده‌های مربوط به یک نمونه از شبیه‌سازی شماره‌ی ۱ با ۳ خوشه..... ۶۲
- جدول ۵-۲- داده‌های مربوط به یک نمونه از شبیه‌سازی شماره‌ی ۲ با ۶ خوشه..... ۶۶
- جدول ۵-۳- لیست اعداد Bell برای مجموعه‌های ۰ تا ۲۶ عضوی [35]..... ۷۱

فهرست تصویرها

- شکل ۱-۱ - بلوک دیاگرام پایه‌ای LiFi [1] _____ ۴
- شکل ۱-۲ - تابع انتقال شبیه‌سازی شده در [4] _____ ۷
- شکل ۲-۲ - خروجی یک مدولاتور DCO-OFDM [10] _____ ۱۴
- شکل ۳-۲ - خروجی یک مدولاتور ACO-OFDM [10] _____ ۱۵
- شکل ۴-۲ - مدل فرستنده-گیرنده‌ی به کار گرفته شده در شبیه‌سازی مدولاسیون‌های DCO-OFDM و ACO-OFDM [1] _____ ۱۸
- شکل ۵-۲ - نمودار نقاط منظومه‌ای آشکار شده در دمدولاتور DCO-OFDM _____ ۱۹
- شکل ۶-۲ - نمودار نقاط منظومه‌ای آشکار شده در دمدولاتور ACO-OFDM _____ ۲۰
- شکل ۷-۲ - نمودار نرخ خطای بیت بر حسب SNR برای مدولاسیون OFDM _____ ۲۰
- شکل ۸-۲ - نمودار نرخ خطای بیت بر حسب SNR برای مدولاسیون DCO-OFDM _____ ۲۱
- شکل ۹-۲ - نمودار نرخ خطای بیت بر حسب SNR برای مدولاسیون ACO-OFDM _____ ۲۱
- شکل ۱-۳ - ساختار کلی هوش مصنوعی [19] _____ ۲۶
- شکل ۲-۳ - معماری‌های مختلف یادگیری ماشین [22] _____ ۳۰
- شکل ۳-۳ - حالات مختلف گروه‌بندی LED-ها و تداخل‌های موجود [30] _____ ۳۲
- شکل ۴-۳ - یک مثال از نحوه‌ی به کارگیری CoMP [26] _____ ۳۵
- شکل ۱-۴ - نمونه‌ای از کاربران با دو توزیع گوسی متفاوت در اتاق و خوشه‌های آشکارشده با استفاده از یادگیری ماشین _____ ۴۱
- شکل ۲-۴ - مثالی از الگوریتم K-means clustering با دسته‌بندی سه گروهه [34] _____ ۴۴
- شکل ۳-۴ - گام‌های همگرایی یک Agent برای تشخیص مرکز تراکم [34] _____ ۴۵
- شکل ۴-۴ - مراحل الگوریتم mean-shift clustering [34] _____ ۴۶
- شکل ۵-۴ - مراحل الگوریتم DBSCAN [34] _____ ۴۸
- شکل ۶-۴ - دو نوع خوشه‌بندی اشتباه از الگوریتم K-means [34] _____ ۴۹
- شکل ۷-۴ - مراحل الگوریتم EM-GMM [34] _____ ۵۰

- شکل ۴-۸ - نمونه‌ای از چیدمان فرستنده‌ها (لوزی) و موقعیت ۹ Agent آن‌ها (نقطه) __ ۵۴
- شکل ۴-۹ - نمونه‌ای از اجرای الگوریتم LiFi Grid با ۱۶ فرستنده و ۷ خوشه‌ی گوسی __ ۵۴
- شکل ۴-۱۰ - موقعیت فرستنده‌ها در شبیه‌سازی شماره‌ی ۱ _____ ۵۸
- شکل ۴-۱۱ - موقعیت فرستنده‌ها در شبیه‌سازی شماره‌ی ۲ _____ ۵۹
- شکل ۵-۱ - گروه‌بندی سلول-محور برای ۱۵ حالت ممکن در شبیه‌سازی شماره‌ی ۱ __ ۶۱
- شکل ۵-۲ - شبیه‌سازی شماره‌ی ۱ - سمت چپ: خروجی الگوریتم mean-shift سمت راست: خروجی الگوریتم LiFi Grid _____ ۶۲
- شکل ۵-۳ - گروه‌بندی سلول-محور برای ۵ حالت متفاوت در شبیه‌سازی شماره‌ی ۲ __ ۶۵
- شکل ۵-۴ - شبیه‌سازی شماره‌ی ۲ - سمت چپ: خروجی الگوریتم mean-shift سمت راست: خروجی الگوریتم LiFi Grid _____ ۶۵

فهرست نمودارها

- نمودار ۱-۵ - نمودار میانگین نرخ ارسال داده برای ۱۶ سرویس شبیه‌سازی شماره‌ی ۱_۶۳
- نمودار ۲-۵ - نمودار SINR بیشینه برای ۱۶ سرویس شبیه‌سازی شماره‌ی ۱_۶۳
- نمودار ۳-۵ - نمودار SINR میانگین برای ۱۶ سرویس شبیه‌سازی شماره‌ی ۱_۶۳
- نمودار ۴-۵ - نمودار SINR کمینه برای ۱۶ سرویس شبیه‌سازی شماره‌ی ۱_۶۴
- نمودار ۵-۵ - نمودار میانگین نرخ ارسال داده برای ۶ سرویس شبیه‌سازی شماره‌ی ۲_۶۶
- نمودار ۶-۵ - نمودار SINR بیشینه برای ۶ سرویس شبیه‌سازی شماره‌ی ۲_۶۷
- نمودار ۷-۵ - نمودار SINR میانگین برای ۶ سرویس شبیه‌سازی شماره‌ی ۲_۶۷
- نمودار ۸-۵ - نمودار SINR کمینه برای ۶ سرویس شبیه‌سازی شماره‌ی ۲_۶۷

فصل ۱ : مقدمه

۱-۱ مقدمه

با روی کار آمدن نسل‌های جدید ارتباط بی‌سیم و همچنین گسترش زیرساخت اینترنت نیاز به نرخ اطلاعات بیشتر روز به روز در حال افزایش است، و این نیاز دوجندان می‌شود وقتی که بفهمیم تکنولوژی‌های جدیدتری مثل اینترنت اشیا^۱ در حال رشد و توسعه هستند. به همین جهت روش‌های پیشین در به کارگیری اینترنت بی‌سیم دیگر جواب‌گوی این حجم از درخواست اطلاعات نخواهند بود [1]. پس باید روش‌های بهتری را پیدا کرد.

تا کنون نسل‌های مختلفی از اینترنت بی‌سیم روی کار آمده‌اند، و نسل پنجم نیز در آینده‌ی نزدیک به کار گرفته خواهد شد. در همه‌ی این نسل‌ها از مخابرات فرکانس‌های رادیویی^۲ استفاده شده است. یعنی پهنای باند حداکثر تا ۳۰ گیگاهرتز مطرح شده است. همچنین نرخ اطلاعات ارسالی نیز حداکثر تا چندین (کمتر از ۱۰) گیگابیت بر ثانیه پیاده‌سازی شده است [2]. اما با یک حساب سرانگشتی به راحتی می‌توان فهمید که حتی این نرخ اطلاعات نیز جواب‌گو نخواهد بود. برای مثال در این زمینه یک مثال واقعی را بررسی کنیم.

طبق برخی گزارشات اعلام شده^۳، در نسل چهارم اینترنت بی‌سیم، حداکثر نرخ اطلاعات 100 (Mbps) بایستی برای هر کاربر قابل دسترسی باشد. طبق برخی گزارشات دیگر^۴، به طور متوسط ۷۵۰ کاربر همزمان به یک نقطه‌ی اتصال^۵ وصل می‌شوند. پس هر نقطه‌ی اتصال باید بتواند نرخ اطلاعات (Gbps) 7.5 را بدهد، که نرخ اطلاعات بسیار زیادی محسوب می‌شود، و پیاده‌سازی چنین نقاط اتصالی بر اساس باندهای رادیویی RF بسیار کار پیچیده، هزینه‌بر و دشواری خواهد بود. پس باید راه حلی برای رفع این مشکل اندیشید.

^۱ Internet of Things (IoT)

^۲ Radio Frequencies (RFs)

^۳ <http://www.wustech.com.tw/products/scooter/t&g>

^۴ <http://www.cliffam.com/much-data-youtube-video-use>

^۵ Base Station (BS)

^۶ <https://blog.wirelessmoves.com/2016/02/lte-and-the-number-of-simultaneously-connected-users.html>

برای رفع مشکل کمبود پهنای باند یک روش نسبتاً قدیمی مطرح شده است، و آن هم مهاجرت از فرکانس‌های مرکزی کمتر (مثل امواج RF) به فرکانس‌های مرکزی بالاتر (مثل امواج نوری). اگر طبق یک قاعده‌ی سرانگشتی فرض کنیم تقریباً پهنای باند قابل حصول در یک سیستم مخابراتی ۱۰ درصد فرکانس مرکزی باشد، پس اگر بتوانیم یک سیستم مخابراتی بسازیم که بتواند در فرکانس‌های مرکزی چند صد تراهرتز (امواج نور مرئی) کار کند، پهنای بسیار بسیار بیشتری نسبت به امواج رادیویی خواهد داد. در این جاست که مخابرات نوری چه به صورت بی‌سیم و چه در بستر فیبر نوری مطرح می‌شود. مخابرات نوری تقریباً از دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی مطرح شده است و چه در زمینه‌ی فیبرهای نوری و چه در زمینه‌ی مخابرات بی‌سیم گسترش یافته است، اما گسترش مخابرات بی‌سیم نور مرئی^۱ در دهه‌ی اخیر رشد بسیار بیشتری داشته است، که در ادامه‌ی روند این رشد به LiFi می‌رسیم که هدف از این گزارش، معرفی و بررسی شبکه‌های LiFi است.

در ای گزارش در فصل ۱ مقدمه‌ای بر مخابرات نوری بیان شده است. در فصل ۲ مخابرات نور مرئی در دولاایه‌ی فیزیکی^۲ و لایه‌ی MAC مورد بررسی قرار گرفته شده است. فصل ۳ شامل مقدمه‌ای بر یادگیری ماشین است. در این فصل بیان می‌شود که در اصل چرا سمت و سوی این پروژه به سمت مباحث یادگیری ماشین کشیده شده است. در فصل ۴ الگوریتم‌های یادگیری ماشینی که شبیه‌سازی شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته شده است و در فصل ۵ نتایج مختلف پروژه از زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۱-۲ تاریخچه

مخابرات نور مرئی اولین بار توسط گراهام بل با ابداع photophone در دهه‌ی ۱۸۸۰ میلادی به وجود آمد، که یک وسیله‌ی ساده بود که نور خورشید را با صدای انسان مدوله و دمدوله می‌کرد، اما این اختراع وسیله‌ی کارآمدی نبود. بعد از گذشت تقریباً یک قرن و با به وجود آمدن مبانی ریاضی محکم در زمینه‌ی دانش مخابرات، مخابرات نور مرئی کار خود را با عنوان VLC آغاز کرد. نرخ اطلاعات ارسالی در VLC به چند ده مگابیت بر ثانیه می‌رسید. بعد از گذشت یکی دو دهه، عنوان LiFi اولین بار به طور گسترده در سال ۲۰۱۱ میلادی عنوان شد. در حقیقت LiFi همان VLC ولی با

^۱ Visible Light Communication (VLC)

^۲ Light Fidelity (LiFi)

^۳ Physical (PHY)

نرخ اطلاعات خیلی بیشتر است. LiFi و VLC هر دو از شاخه‌های OWC^۱ هستند. شاخه‌ی سوم OWC، مخابرات FSO^۲ است، که یک مخابرات معمولاً دید مستقیم^۳ محسوب می‌شود. یک نکته‌ی دیگر این که هنوز یک دهه از عنوان LiFi نگذشته است، و این ویژگی چندین نتیجه دارد؛ اول این که هنوز زمینه‌های تحقیقاتی زیادی در LiFi وجود دارد، و دوم این که هنوز یک سیستم مخابرات بهینه و فراگیر در LiFi ایجاد نشده است. LiFi مکمل WiFi محسوب می‌شود [1] که ویژگی‌های آن در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

به طور کلی موضوعات متعددی در زمینه‌ی شبکه‌های مخابرات نوری مطرح شده است که از جمله موارد آن می‌توان به مسئله تخصیص منابع شبکه، مثل توان و یا پهنای باند، انواع مدولاسیون‌های لایه‌ی فیزیکی، انواع مدل‌های کانال و ... اشاره کرد.

۱-۳ ویژگی‌های LiFi

- محدوده‌ی فرکانسی آن بین فرکانس‌های مادون قرمز تا ماورای بنفش است.
- طیف آن پهنای باند ۱۰۰۰۰ برابر بیشتری نسبت به امواج رادیویی تا فرکانس مرکزی ۳۰ گیگاهرتز را دارد.
- در اصل برای کاربردهای درون ساختمانی^۴ مطرح شده است.
- محققین دانشگاه آکسفورد تاکنون توانسته‌اند توسط مخابرات نور مرئی به نرخ اطلاعات 224 (Gbps) برسند! [3]
- تاکنون نرخ اطلاعات بین 10 (Mbps) تا 100 (Mbps) در این نوع شبکه‌ها تجاری‌سازی شده است.
- به صورت دید غیر مستقیم^۵ نیز استفاده می‌شود.
- در هسته‌ی مرکزی LiFi، VLC قرار گرفته است (شکل ۱-۱) [1].

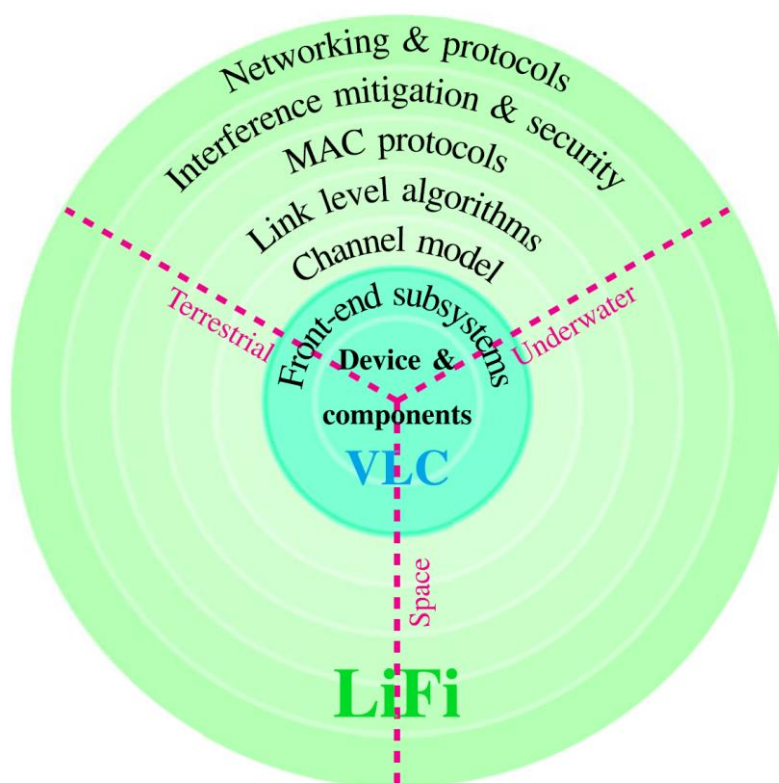
^۱ Optical Wireless Communication (OWC)

^۲ Free Space Optical communication (FSO)

^۳ Line of Sight (LoS)

^۴ indoor

^۵ Non-Line of Sight (NLOS)



شکل ۱-۱ - بلوک دیاگرام پایه‌ای LiFi [1]

فصل ۲: بررسی روش عملکرد یک فرستنده-گیرنده LiFi

چون در مخابرات نور مرئی از ادوات و فرستنده‌های نوری برای ارسال سیگنال‌های مخابراتی استفاده می‌شود، باید چندین نکته را در نظر گرفت. اولین نکته و شاید مهم‌ترین نکته این است که لامپ‌ها و LED-هایی که برای ارسال سیگنال استفاده می‌شوند فقط در صورتی روشن می‌شوند و شروع به کار می‌کنند که جریان مثبتی از آن‌ها عبور کند. پس دیگر نمی‌توان از هر نوع مدولاسیونی که پیش از این در مخابرات رادیویی (RF) مطرح می‌شد، استفاده کرد، چرا که در ارسال سیگنال در مخابرات رادیویی هیچ قیدی مبنی بر مثبت بودن سیگنال اعمال نمی‌شد، و آنتن‌های مورد استفاده به راحتی می‌توانستند سیگنال‌های با دامنه‌های منفی را هم ارسال کنند. اما در مخابرات نور مرئی دیگر این امکان وجود ندارد و هر سیگنالی که قرار باشد فرستاده شود، بایستی به یک سیگنال با دامنه‌ی مثبت تبدیل شود طوری که حداقل دامنه‌ی مثبت آن بتواند چراغ فرستنده‌های LiFi را روشن کند. بدین منظور مدولاسیون‌های مختلفی در مخابرات نور مرئی مطرح شده است که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهیم کرد.

نکته‌ی مهم دیگر این است که معمولاً فرستنده‌های LiFi لامپ‌ها و LED-هایی هستند که نمی‌توانند بیشتر از یک میزان مشخصی روشنایی تولید کنند. به عبارت دیگر این فرستنده‌ها دارای یک آستانه‌ی معلوم هستند که این خود می‌تواند یک عامل تعیین‌کننده‌ی نرخ اطلاعات ارسالی در این نوع سیستم‌های مخابراتی باشد. علاوه بر آستانه‌ی ذکر شده، یک آستانه‌ی پایین نیز برای این نوع فرستنده‌ها مطرح است، چرا که این چراغ‌ها اول باید روشن شود تا بتوانند کار خود را شروع کنند. پس میزان توان انتقالی به لامپ‌ها و LED-های فرستنده‌های LiFi بایستی در محدوده‌ی مشخصی قرار بگیرد که با استفاده از برگه‌ی مشخصات^۱ فرستنده می‌توان به این دو آستانه دست یافت. این امر منجر به این می‌شود که دیگر نمی‌توان هر سیگنال با هر دامنه‌ی مثبت را ارسال کرد، بلکه بایستی یک نوع قطع‌کردن^۲ قبل از انتقال سیگنال به فرستنده‌های LiFi صورت گیرد تا بتوان آن را به درستی ارسال کرد.

^۱ Datasheet

^۲ Clipping

سومین نکته‌ی مهم این است که لامپ‌ها و LED-های LiFi معمولاً در حالت کلی دارای یک تابع مشخصه‌ی غیرخطی هستند. به عبارت دیگر در حالت عادی حتی نمی‌توان به آستانه‌هایی که در نکته‌ی قبلی ذکر شد، دست یافت، بلکه محدوده‌ی عملکرد خطی فرستنده‌های LiFi بازه‌ی کوچکتري را شامل می‌شود. حال اگر از یک سیگنالینگی استفاده شود که بازه‌ی سیگنال ارسالی در آن کمی خارج از این محدوده‌ی خطی فرستنده‌های LiFi شود، سیگنال دچار اعوجاج^۱ می‌شود. اعوجاج منجر به این می‌شود که در گیرنده به راحتی نتوان سیگنال ارسال شده را بازیابی کرد، یا به عبارت دیگر، اعوجاج منجر به افزایش نرخ خطای بیت^۲ می‌شود و این یعنی برای داشتن یک مخابره‌ی مطمئن^۳ بایستی نسبت توان سیگنال به توان نویز^۴ بیشتری داشته باشیم. در اینجا یک داد و ستد^۵ بین خطینگی سیگنال ارسال شده و میزان نرخ خطای بیت سیگنال دریافتی ایجاد می‌شود. هر قدر که بخواهیم سیگنال دریافتی ما خطی‌تر باشد بایستی توان سیگنال در محدوده‌ی کوچکتري واقع شود و این یعنی کاهش SNR، و بالعکس، هر قدر که SNR را با افزایش توان سیگنال بیشتر کنیم، بیشتر وارد ناحیه‌ی غیرخطی می‌شویم. شکل ۱-۲ تابع انتقال یک LED در یک سیستم مخابرات نوری را مشخص می‌کند که در [4] مطرح شده است. در مقاله‌ی [4]، شبیه‌سازی رفتار غیرخطی فرستنده، توسط تابع تکه‌ای چندجمله‌ای^۶ صورت گرفته است. در حقیقت این تابع از مجموعه‌ای از بازه‌های مشخص تشکیل شده است که در هر بازه یک چند جمله‌ای از درجه‌ای معلوم تابع را بیان می‌کند، در عین این که پیوستگی تابع و مشتق آن در کل بازه‌ها حفظ شود. علت آن که بایستی پیوستگی خود تابع و مشتق آن حفظ شود این است در واقعیت LED-ها نمی‌توانند رفتار گسسته یا رفتار غیر نرم داشته باشند. منظور از رفتار غیر نرم، وجود نقاط گسسته و نقاط شکستگی (نقاط گوشه) در تابع انتقال است.

^۱ Distortion

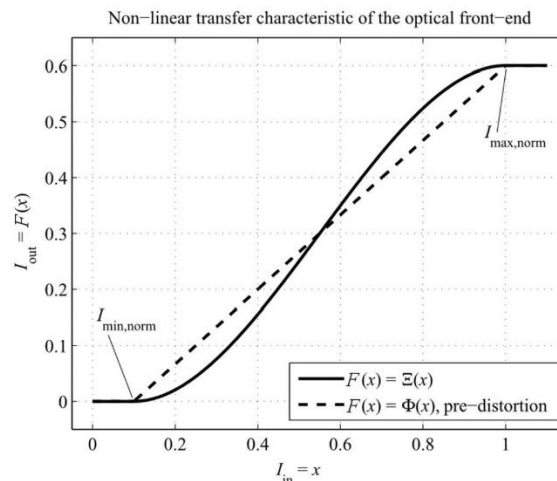
^۲ Bit Error Rate (BER)

^۳ Reliable Communication

^۴ Signal to Noise Ratio (SNR)

^۵ Trade-off

^۶ Piecewise Polynomial



شکل ۱-۲ - تابع انتقال شبیه‌سازی شده در [4]

در حالت کلی این مشکل و یا داد و ستد را نمی‌توان حذف کرد، اما روش‌هایی برای غلبه بر آن مطرح شده است. یکی از روش‌های مهم غلبه بر رفتار غیرخطی فرستنده‌های LiFi، پیش‌اعوجاج^۱ کردن است. در این روش تابع غیرخطی فرستنده به وسیله یک تابع غیرخطی تخمین زده می‌شود (البته فرض می‌شود که این تابع در بازه‌ای که شامل نقاط کار فرستنده است، یک به یک است)، سپس عکس این تابع بر سیگنالی که می‌خواهد وارد فرستنده شود، به وسیله پیش‌اعوجاج کننده اعمال می‌شود. در این صورت با گذر سیگنال حاصل شده از فرستنده، در حالت کلی یک رفتار خطی مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که در این فصل، این سه نکته به تدریج مورد بررسی قرار خواهند گرفت. حال در ادامه به بررسی انواع مدولاسیون‌های مطرح شده در مخابرات نوری می‌پردازیم.

۲-۱ مدولاسیون‌های SCM

در این نوع مدولاسیون‌ها از نور با یک طول موج معلوم و با یک فرکانس کاری معلوم برای ارسال داده استفاده می‌شود. در حقیقت اگر طیف فرکانسی سیگنال تولید شده به وسیله مدولاسیون‌های

^۱ Predistortion

^۲ Predistorter

SCM را بررسی کنیم، خواهیم دید که بیشتر توان ارسالی حول یک فرکانس (یک حامل) متمرکز شده است.

این روش‌ها، به دلیل سادگی، جزو اولین روش‌هایی محسوب می‌شوند که در مخابرات نوری مطرح شده‌اند. نرخ تبادل اطلاعات در این مدولاسیون‌ها چندان زیاد نیست (معمولاً کمتر از 10 Mbps). در حقیقت مبانی مخابرات نوری بر این نوع مدولاسیون‌ها شکل گرفته است، ولی پیشرفت آن مربوط به مدولاسیون‌های جدیدتر است. شاید از مهمترین مدولاسیون‌های پایه‌ای که در مخابرات نوری مطرح شد، بتوان دو مدولاسیون OOK و PPM را نام برد، که در ادامه اشاره‌ی کوتاهی به این دو می‌کنیم. همچنین به طور کوتاه به مدولاسیون QAM می‌پردازیم.

۲-۱-۱ مدولاسیون On-Off Keying (OOK)

اولین و شاید پایه‌ای‌ترین روش ارسال داده در مخابرات نوری روش OOK است. در این روش بیت‌های یک هم‌ارز LED با سطح تابش بیشتر و بیت‌های صفر هم‌ارز LED با سطح تابش کمتر فرض می‌شوند. امروزه از این روش به طور مستقیم استفاده نمی‌شود، بلکه از این روش در مدولاسیون‌های دیگر (مثل O-OFDM) استفاده می‌شود. آشکارسازی داده در این نوع مدولاسیون بر مبنای Intensity Modulation/Direct Detection یا IM/DD است. این نوع مدولاسیون در مخابرات فیبر نوری نیز کاربرد فراوانی دارد. در حقیقت وقتی که بیت یک وارد فرستنده شد، LED «روشن»، و وقتی که بیت صفر وارد آن شد، LED «خاموش» می‌شود. نرخ تبادل داده در این مدولاسیون پایین بوده و در سیستم‌های پیشرفته‌تر معمولاً از این نوع مدولاسیون‌ها به طور مستقیم استفاده نمی‌شود.

۲-۱-۲ مدولاسیون Pulse Position Modulation (PPM)

در این مدولاسیون، در حالت باینری، بازه‌ی زمانی ارسال یک سمبل به دو قسمت تقسیم می‌شود. اگر بیت یک وارد فرستنده شد، LED در تکه‌ی اول روشن و در تکه‌ی دوم خاموش می‌شود، و اگر بیت صفر وارد فرستنده شد، LED در تکه‌ی اول خاموش و در تکه‌ی دوم روشن می‌شود (یا بالعکس).

^۱ Carrier