بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بررسی تخصیص منابع در سیستم‌های بی‌سیم مبتنی بر رله و OFDM

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی برق - مخابرات

مهناز اشرفی

استادراهنما
دکتر محمدجواد امیدی

۱۳۹۳

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- مخابرات خانم مهناز اشرفی

تحت عنوان

بررسی تخصیص منابع در سیستم‌های بی‌سیم مبتنی بر رله و OFDM

در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۱۵ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

۱ - استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محمدجواد امیدی
۲ - استاد داور	دکتر محمدصادق فاضل
۲ - استاد داور	دکتر محمدمهدی نقش
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمدعلی خسروی‌فرد

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم، بزرگوارانی که از خواسته هایشان گذشتند، سختی ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام برسم.

سپاسگزاری

سپاس و ستایش خدای عزوجل را که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید.

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق » بسی شایسته است از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر امیدی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند، تقدیر و تشکر نمایم.

همچنین از اساتید گرامی جناب آقای دکتر فاضل و جناب آقای دکتر نقش که داوری این پایان‌نامه را به عهده گرفتند، تشکر می‌نمایم.

از خانواده عزیز ، دلسوز و مهربانم که آرامش روحی و آسایش فکری فراهم نمودند تا با حمایت های همه جانبه، مراتب تحصیلی را به نحو احسن به اتمام برسانم، سپاسگزاری می‌نمایم.

چکیده

امروزه به دلیل گسترش و پیشرفت مخابرات بی‌سیم، تقاضا برای ارسال با نرخ‌های بالا همراه با پوشش سراسری کاربران افزایش یافته است. برآورده کردن این تقاضاهای روز افزون مستلزم وجود منابع زیاد است که در عمل امکان‌پذیر نیست. از این‌رو تخصیص بهینه منابع محدود و در دسترس بین کاربران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. منظور از تخصیص بهینه منابع این است که منابع در دسترس به نحوی بین کاربران تقسیم گردد که با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود، عملکرد سیستم بهینه گردد. در سال‌های اخیر در بسیاری از استانداردها از سیستم‌های مبتنی بر رله و $OFDM$ استفاده شده است. دلیل پذیرش چنین سیستم‌هایی، مقاومت ذاتی آن‌ها در برابر پدیده‌های مخرب کانال از جمله تداخل بین سمبلی و محوشدگی چند مسیری است. هم‌چنین این سیستم‌ها ظرفیت افزایش کارایی طیفی را نیز دارند. از منابع مهم در سیستم‌های مبتنی بر رله و $OFDM$، می‌توان به زیرحامل‌ها، توان منبع و توان رله اشاره کرد. در این پایان‌نامه یک ایده شبه‌بهینه جدید برای تخصیص توان در سیستم‌های مبتنی بر $OFDM$ و رله با استراتژی کدبرداری و ارسال پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، تخصیص توان در طول دو گام متوالی انجام می‌شود. در گام اول فرض شده که به هر زیرحامل توان محدودی اختصاص یافته است. سپس با در نظر گرفتن این فرض، توان رله و منبع به نحوی تعیین شده است که نرخ ارسال هر زیرحامل بیشینه شود. در گام دوم با به‌کارگیری نتایج گام اول، توان هر زیرحامل با هدف بیشینه شدن جمع نرخ ارسال، تعیین شده است. مزیت روش پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین سادگی و دقت بالای آن در یافتن جواب است. با استفاده از نتایج عددی نشان داده شده که تعداد گام‌های لازم برای یافتن جواب بهینه در روش پیشنهادی کمتر از روش‌های مرسوم مانند $bisection$ است. هم‌چنین در روش پیشنهادی برخلاف روش‌های قبلی، میزان توان اختصاص یافته به هر زیرحامل به صورت دقیق محاسبه می‌شود. استفاده از روش رله انتخابی در ساختارهای مبتنی بر رله می‌تواند منجر به افزایش جمع نرخ ارسال شود. در این روش رله تنها در صورتی فعال است که باعث افزایش نرخ ارسال شود. در غیر این‌صورت ارسال از مبدا به مقصد به صورت مستقیم انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نیز گواهی بر این مدعاست. در نتایج عددی نشان داده شده است در صورتی که فاصله رله از نقطه وسط منبع و مقصد دور شود، روش رله انتخابی به صورت چشمگیری منجر به افزایش جمع نرخ ارسال می‌شود.

واژه‌های کلیدی: $OFDM$، رله، تخصیص منابع، بهینه‌سازی محدب، شرایط KKT و استراتژی کدبرداری و ارسال.

فهرست مطالب

لیست تصاویر ده

لیست جداول یازده

فصل ۱: مقدمه ۲

۱-۱ سیستم‌های مبتنی بر رله و $OFDM$ ۳

۱-۲ هدف پایان‌نامه و بیان مسأله ۴

۱-۳ ساختار پایان‌نامه ۵

فصل ۲: معرفی مفاهیم اساسی ۶

۲-۱ مقدمه ۶

۲-۲ معرفی ساختار $OFDM$ ۷

۲-۲-۱ مزیت‌های مدولاسیون $OFDM$ نسبت به مدولاسیون تک‌حاملی ۸

۲-۲-۲ مشکلات $OFDM$ ۸

۲-۳ معرفی رله و انواع روش‌های رله کردن ۹

۲-۳-۱ رله دائمی ۱۰

۲-۳-۲ رله انتخابی ۱۲

۲-۳-۳ رله افزایشی ۱۳

۲-۴ محاسبه ظرفیت کانال‌های رله‌ای ۱۳

۲-۴-۱ توصیف یک سیستم رله‌ای ساده ۱۳

۲-۴-۲ ظرفیت کانال سیستم‌های مبتنی بر رله با استراتژی کدبرداری و ارسال ۱۴

۲-۴-۳ ظرفیت کانال سیستم‌های مبتنی بر رله با استراتژی تقویت و ارسال ۱۶

۲-۵ شرایط لازم و کافی برای یافتن پاسخ بهینه یک مسأله بهینه‌سازی محدب ۱۷

۲-۵-۱ مسائل بهینه‌سازی محدب ۱۷

۲-۶ جمع‌بندی ۱۹

فصل ۳: تخصیص منابع در سیستم‌های $OFDM$ مبتنی بر رله با استراتژی کدبرداری و ارسال ۲۰

۳-۱ مقدمه ۲۰

۳-۲ تخصیص توان در سیستم‌های تک کاربره مبتنی بر $OFDM$ ۲۱

۳-۲-۱ تخصیص توان در سیستم‌های مبتنی بر $OFDM$ و رله با استراتژی کدبرداری و ارسال ۲۳

۳-۳ تخصیص منابع در سیستم‌های چند کاربره مبتنی بر $OFDMA$ ۲۸

۳-۳-۱ مسأله کلی تخصیص منابع در سیستم‌های چندکابره مبتنی بر $OFDM$ ۲۸

۳-۳-۲ تخصیص منابع در سیستم‌های مبتنی بر $OFDMA$ و رله با استراتژی کدبرداری و ارسال ۳۵
۳-۴ جمع‌بندی ۴۰

فصل ۴: کاهش پیچیدگی محاسباتی تخصیص منابع در سیستم‌های رله‌ای با استراتژی کدبرداری و ارسال مبتنی بر $OFDM$ ۴۱
۴-۱ مقدمه ۴۱
۴-۲ مدل سیستم ۴۲
۴-۳ الگوریتم شبه‌بهینه‌ی تخصیص توان با پیچیدگی محاسباتی کم در سیستم‌های مبتنی بر رله دائمی و $OFDM$ ۴۵
۴-۳-۱ گام اول ۴۵
۴-۳-۲ گام دوم ۵۲
۴-۴ الگوریتم شبه‌بهینه‌ی تخصیص توان با پیچیدگی محاسباتی کم در سیستم‌های مبتنی بر رله انتخابی و $OFDM$ ۶۱
۴-۴-۱ گام اول ۶۲
۴-۴-۲ گام دوم ۶۳
۴-۵ نتایج عددی ۶۶
۴-۶ جمع‌بندی ۷۴

فصل ۵: نتیجه‌گیری ۷۶
۵-۱ پیشنهادات ۷۷

پیوست آ: ۷۹

مراجع ۸۱

لیست تصاویر

۲-۱ نمایش مدولاسیون $OFDM$ در حوزه زمان- فرکانس [۳]. ۷
۲-۲ ساختار روش کدبرداری و ارسال. ۱۱
۲-۳ ساختار روش تقویت و ارسال. ۱۲
۲-۴ مدل سیستم یک ساختار مبتنی بر رله. ۱۴

۳-۱ تخصیص توان به روش واترفیلینگ بین N زیرحامل مختلف [۱۳]. ۲۲
۳-۲ مقایسه ساختارهای $OFDM$ و $OFDMA$. ۲۸
۳-۳ نمای کلی مسأله تخصیص منابع در سیستم‌های $OFDMA$ [۲۱]. ۲۹
۳-۴ بازده طیفی برحسب تعداد کاربران در یک سیستم مبتنی بر $OFDMA$ [۲۱]. ۳۴

۴-۱ مقایسه توابع $y_0(x)$ و $y_1(x)$ به ازای $G_{sd}(n) \geq G_{sr}(n)$ و $G_{sd}(n) \geq G_{rd}(n)$. ۴۷
۴-۲ تابع $y(x)$ توابع $y_0(x)$ و $y_1(x)$ به ازای $G_{sd} \geq G_{sr}$ و $G_{sd} \geq G_{rd}$ ۴۸
۴-۳ مقایسه توابع $y_0(x)$ و $y_1(x)$ به ازای $G_{rd}(n) \leq G_{sd}(n) \leq G_{sr}(n)$. ۴۸
۴-۴ تابع $y(x)$ به ازای $G_{rd}(n) \leq G_{sd}(n) \leq G_{sr}(n)$. ۴۹
۴-۵ مقایسه توابع $y_0(x)$ و $y_1(x)$ به ازای $G_{sr}(n) \leq G_{sd}(n) \leq G_{rd}(n)$. ۴۹
۴-۶ تابع $y(x)$ به ازای $G_{sr}(n) \leq G_{sd}(n) \leq G_{rd}(n)$. ۴۹
۴-۷ مقایسه توابع $y_0(x)$ و $y_1(x)$ به ازای $G_{sd}(n) \leq G_{sr}(n)$ و $G_{sd}(n) \leq G_{rd}(n)$. ۵۰
۴-۸ تابع $y(x)$ به ازای $G_{sd}(n) \leq G_{sr}(n)$ و $G_{sd}(n) \leq G_{rd}(n)$. ۵۰
۴-۹ تغییرات $A(m)$ برحسب m. ۶۷
۴-۱۰ تغییرات نرخ(بیت بر ثانیه) برحسب m. ۶۸
۴-۱۱ جمع نرخ ارسال برحسب توان کل(Ptot) برای روش شبه‌بهینه پیشنهادی و روش بهینه ۶۹
۴-۱۲ جمع نرخ ارسال بر حسب توان کل(P_{tot}). ۷۰
۴-۱۳ جمع نرخ ارسال بر حسب توان کل(P_{tot}) برای نسبت سیگنال به نویز پایین ($low\ SNR$). . ۷۲
۴-۱۴ جمع نرخ ارسال بر حسب توان کل(P_{tot}) برای نسبت سیگنال به نویز بالا ($high\ SNR$). . ۷۲
۴-۱۵ جمع نرخ ارسال بر حسب توان کل(P_{tot}). ۷۳
۴-۱۶ جمع نرخ ارسال بر حسب فاصله رله و منبع. ۷۴
۴-۱۷ جمع نرخ ارسال برحسب تعداد زیرحامل‌ها (N) ۷۴
۴-۱۸ جمع نرخ ارسال برحسب تعداد زیرحامل‌ها (N) برای SNRهای پایین. ۷۵
۴-۱۹ جمع نرخ ارسال برحسب تعداد زیرحامل‌ها (N) برای SNRهای بالا. ۷۵

لیست جداول

۲-۱ معرفی پارامترهای استفاده شده ۱۵

۳-۱ مروری بر کارهای انجام شده در زمینه تخصیص منابع در سیستم‌های مبتنی بر $OFDMA$. ۳۱

۴-۱ معرفی پارامترهای استفاده شده در سیستم ۴۳
۴-۲ مقایسه مقادیر $y_0(x)$ و $y_1(x)$ در نقاط $x = 0$ و $x = P(n)$ ۴۷
۴-۳ مقادیر توان منبع، توان رله و نرخ ارسال مربوط به زیرحامل nام ۵۱
۴-۴ مقادیر مختلف $G_D(n)$ مربوط به زیرحامل nام ۵۱
۴-۵ مقدار t_n مربوط به زیرحامل nام ۶۱
۴-۶ پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها ۶۷
۴-۷ پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها ۶۸
۴-۸ مقایسه روش شبه‌بهینه پیشنهادی و روش بهینه با استفاده از CVXبه ازای $\sigma^2 = 10^{-12}$ و ۱۰۰۰۰ تحقق کانال ۶۹
۴-۹ مقایسه زمان اجرای روش شبه‌بهینه پیشنهادی و روش بهینه با استفاده از CVXبه ازای $\sigma^2 = 10^{-12}$ و ۱۰۰۰۰ تحقق کانال ۷۰
۴-۱۰ مقایسه روش پیشنهادی و روش $bisection$ به ازای $\sigma^2 = 10^{-12}$ و ۱۰۰۰۰ تحقق کانال . . ۷۱
۴-۱۱ مقایسه زمان اجرای روش شبه‌بهینه پیشنهادی و روش بهینه با استفاده از CVXبه ازای $\sigma^2 = 10^{-12}$ و ۱۰۰۰۰ تحقق کانال ۷۱

فصل اول

مقدمه

امروزه با گسترش و پیشرفت مخابرات بی‌سیم، تقاضا برای نرخ‌های ارسال بیشتر و همچنین پوشش سراسری کاربران افزایش یافته است. برآورده کردن تمام نیازهای کاربران مستلزم وجود منابع زیاد است که این امر با توجه به محدودیت منابع در دسترس، امکان‌پذیر نیست. از این‌رو در سال‌های اخیر، مدیریت و تخصیص بهینه منابع رادیویی از اهمیت زیادی برخوردار شده است. پهنای باند در دسترس و بودجه توان ارسالی دو منبع مهم در مخابرات بی‌سیم محسوب می‌شوند که دسترسی به این منابع، به دلیل محدودیت آن‌ها و هم‌چنین نیازهای روزافزون و متنوع کاربران با چالش‌های جدیدی مواجه است.

به طور کلی تخصیص منابع به دو روش ثابت و پویا انجام می‌شود. در روش‌های تخصیص ثابت، منابع طبق یک الگوی از پیش تعیین شده‌ای، بدون در نظر گرفتن شرایط کانال به کاربران اختصاص می‌یابد. مشکل این روش این است که در کانال‌های انتخاب‌گر فرکانس[۱]، در بعضی از بازه‌های زمانی ممکن است از یک باند فرکانسی، به دلیل محوشدگی[۲] شدیدی که دارد، هیچ استفاده مفیدی نشود. از این‌رو روش‌های تخصیص ثابت، بهینه نیستند و روش‌های دوم یعنی تخصیص پویای منابع بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در تخصیص پویا، منابع با توجه به شرایط کانال، بین کاربران توزیع می‌گردد. از این‌رو در روش‌های تخصیص پویا، از چندگانگی[۳] کانال بین کاربران که در مکان‌های مختلفی قرار گرفته‌اند، حداکثر استفاده می‌شود. این نوع از چندگانگی عموماً با نام چندگانگی چندکاربره[۴] شناخته می‌شود. به این معنا که اگر یک باند

---

[۱] Frequency Selective

[۲] Fading

[۳] Diversity

[۴] Multiuser Diversity

فرکانسی برای یک کاربر دچار محوشدگی شدیدی باشد، می‌توان این باند فرکانسی را با توجه به شرایط کانال به کاربری اختصاص داد که وضعیت بهتری در این باند فرکانسی دارد.

مسأله تخصیص منابع با توجه به شرایط و نیازمندی‌های سیستم‌های مختلف به اشکال متفاوتی مدل می‌شود. به طور کلی مسائل تخصیص منابع با توجه به اهداف و محدودیت‌هایی که دارند، به دو دسته کلی حاشیه وفقی[۱] و نرخ وفقی[۲] تقسیم می‌شوند. در دسته اول هدف کمینه کردن جمع توان ارسالی با در نظر گرفتن محدودیت نرخ ارسال برای کاربران است. حال آن‌که در دسته دوم ، جمع نرخ کاربران با درنظر گرفتن محدودیت توان سیستم، بیشینه می‌شود. در این پایان‌نامه به بررسی مسائل دسته دوم یعنی نرخ وفقی می‌پردازیم.

۱ - ۱ سیستم‌های مبتنی بر رله و $OFDM$

در سال‌های اخیر شبکه‌های بی‌سیم بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از مهمترین دلایل استفاده از این شبکه‌ها قابلیت تحرک، برپاسازی سریع و سهولت کاربرد آن‌ها نسبت به شبکه‌های باسیم است. یکی از مشکلات اساسی استفاده از این شبکه‌ها وجود پدیده محوشدگی در کانال‌های بی‌سیم است. پدیده محوشدگی به دلیل ماهیت تصادفی آن یک عامل مخرب برای سیستم‌های بی‌سیم محسوب می‌شود. زیرا این پدیده باعث کاهش نرخ ارسال و قابلیت اطمینان سیستم می‌شود. یک راه حل برای مقابله با این مشکل، استفاده از روش‌های مختلف چندگانگی از جمله چندگانگی زمانی، فرکانسی و مکانی است. در شیوه‌های مختلف چندگانگی، گیرنده نسخه‌های تکراری و مستقل سیگنال را دریافت می‌کند و سپس با استفاده از این نمونه‌های مستقل، سعی می‌کند محوشدگی کانال را جبران کند. در روش‌های چندگانگی زمانی و فرکانسی به دلیل ارسال اطلاعات در طول بازه‌های زمانی و فرکانسی مستقل، قابلیت اطمینان سیستم به بهای کاهش نرخ ارسال، افزایش می‌یابد. از این‌رو استفاده از چندگانگی فضایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در محیط‌های بی‌سیم می‌توان با قرار دادن آنتن‌های فرستنده و گیرنده در فاصله‌های مناسب از یکدیگر، کانال‌های مستقل از یکدیگر در فضا و یا به عبارت دیگر چندگانگی فضایی، ایجاد کرد [۱].

به دلیل کوچک بودن اندازه ادوات متحرک در شبکه‌های بی‌سیم، امکان قرار دادن چند آنتن با فاصله‌های مشخص در فرستنده و یا گیرنده وجود ندارد. لذا برای ایجاد چندگانگی فضایی و مقابله با پدیده محوشدگی کانال، مخابرات همکارانه[۳] پیشنهاد می‌شود. در مخابرات همکارانه چند رله در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف قرار می‌گیرند و برای ارسال سیگنال از فرستنده به گیرنده چند مسیر ارسال را ایجاد می‌کنند. استفاده از رله علاوه بر ایجاد چندگانگی، پوشش شبکه را نیز افزایش می‌دهد. در شبکه‌های بی‌سیم برای کاهش تداخل بین سلول‌ها، ایستگاه پایه[۴] سیگنال را با توان محدودی ارسال می‌کند.

---

[۱] Margin Adaptive

[۲] Rate Adaptive

[۳] Cooperative Communication

[۴] Base Station (BS)

از این‌رو، رله برای کاربرانی که در فاصله دورتری از ایستگاه پایه قرار دارند و یا سیگنال ارسالی از طریق ایستگاه پایه را به خوبی دریافت نمی‌کنند، نقش یک واسط را ایفا می‌کند و به پوشش تمام کاربران سلول کمک می‌کند [۲].

در سال‌های اخیر $OFDM$[۱] به عنوان یک فن‌آوری فراگیر در بسیاری از استانداردهای بی‌سیم مانند DVB[۲]، LTE[۳] و سری‌های $IEEE\ 802.1x$ پیاده‌سازی شده است. علت پذیرش این مدولاسیون، مقاومت ذاتی آن در برابر محوشدگی انتخاب‌گر فرکانس و هم‌چنین ظرفیت آن برای رسیدن به کارایی طیفی[۴] بالا است. یکی دیگر از محاسن $OFDM$ انعطاف بالایی است که در تخصیص منابع ایجاد می‌کند. علت این امر این است که در این مدولاسیون با تقسیم پهنای باند در دسترس به تعدادی زیرکانال[۵]، امکان اختصاص هر یک از این زیرکانال‌ها به بهترین کاربر وجود دارد.

ترکیب استفاده از $OFDM$ و مخابرات همکارانه، امکان افزایش بیشتر عملکرد سیستم و هم‌چنین پوشش شبکه را فراهم می‌کند. در یک سیستم مبتنی بر رله و $OFDM$، علاوه بر توان و زیرحامل‌ها، رله نیز به عنوان یک منبع مطرح است. در حقیقت در یک سیستم مبتنی بر رله استفاده و یا عدم استفاده از رله و هم‌چنین انتخاب بهترین رله از میان چندین رله، باید در بحث تخصیص منابع مورد بررسی قرار گیرند.

۱ - ۲ هدف پایان‌نامه و بیان مسأله

هدف از انجام این پایان‌نامه، بررسی تخصیص منابع در یک سیستم مبتنی بر $OFDM$ و رله با استراتژی کدبرداری و ارسال[۶] است. بدین منظور پس از آشنایی مختصر با سیستم‌های مبتنی بر رله و $OFDM$ و هم‌چنین آشنایی با مطالعات انجام شده در این حوزه، به معرفی یک ایده جدید در زمینه تخصیص توان با پیچیدگی پایین می‌پردازیم. کارهای جدید انجام شده در این پایان نامه عبارتند از:

- ارائه یک روش دقیق تخصیص توان با پیچیدگی پایین، در یک سیستم تک کاربره مبتنی بر $OFDM$ و رله با استراتژی کدبرداری و ارسال،
- تعمیم الگوریتم پیشنهادی برای ساختار رله انتخابی.

---

[۱] Orthogonal Frequency Division Multiplexing

[۲] Digital Video Broadcasting

[۳] Long Term Evolution

[۴] Spectral Efficiency

[۵] Subchannel

[۶] Decode and Forward

۱-۳ ساختار پایان‌نامه

فصل دوم به معرفی مفاهیم اساسی مورد نیاز برای فصول بعدی اختصاص دارد. بدین منظور ابتدا به صورت کلی با ساختار سیستم‌های مبتنی بر $OFDM$ آشنا می‌شویم. سپس سیستم‌های مبتنی بر رله، همچنین انواع رله و ظرفیت سیستم‌های رله‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. به دلیل ضرورت آشنایی با مباحث بهینه‌سازی و به خصوص بهینه‌سازی محدب، در پایان این فصل، به صورت مختصر به معرفی مسائل بهینه‌سازی محدب می‌پردازیم.

در فصل سوم با تحقیقات انجام شده در زمینه تخصیص منابع در سیستم‌های مبتنی بر $OFDM$ و رله آشنا می‌شویم. به دلیل گستردگی تحقیقات انجام شده در این زمینه، تنها مسائلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که هدفشان بیشینه کردن جمع نرخ ارسال باشد. در این فصل، به منظور طبقه‌بندی مطالعات پیشین، ابتدا به بررسی تخصیص منابع در سیستم‌های تک کاربره برای حالت بدون رله و پس از آن برای حالت مبتنی بر رله می‌پردازیم. سپس در قسمت بعد، تحقیقات انجام شده را برای حالت چندکاربره برای حالت بدون رله و با رله بررسی می‌کنیم.

در فصل چهارم، یک روش دقیق تخصیص توان با پیچیدگی پایین برای سیستم‌های تک کاربره پیشنهاد خواهیم داد. در روش پیشنهادی، تخصیص توان در دو گام متوالی انجام می‌شود، از این‌رو، حل مسأله ساده‌تر می‌شود . بدین منظور ابتدا در گام اول فرض می‌کنیم که هر زیرحامل، یک توان محدودی در اختیار دارد. سپس با در نظر گرفتن این فرض برای هر زیرحامل، سهم توان منبع و رله از این توان محدود تعیین می‌شود. هم‌چنین نرخ ارسال هر زیرحامل به صورت کلی به صورت یک فرم بسته به‌دست می‌آید که حل مسأله را ساده‌تر می‌کند. سپس در گام دوم، توان هر زیرحامل به نحوی تعیین می‌شود که جمع نرخ ارسال زیرحامل‌ها بیشینه شود.

در بخش دوم این فصل پس از معرفی دو حالت ارسال شامل ارسال مستقیم و ارسال با کمک رله، الگوریتم پیشنهادی برای این دو حالت تعمیم داده می‌دهیم. در پایان، در فصل پنجم به بیان نتایج پرداخته و پیشنهاداتی را جهت ادامه کار در این حوزه ارائه می‌نماییم.

فصل دوم

معرفی مفاهیم اساسی

۲-۱ مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از مدولاسیون $OFDM$ در بسیاری از استانداردها از جمله استاندارد نسل چهارم مخابرات سلولی، مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهمترین دلایل پذیرش این مدولاسیون، مقاومت ذاتی آن در برابر پدیده‌های مخرب کانال از جمله محوشدگی چند مسیری[۱] است. در کانال‌های بی‌سیم اطلاعات ارسالی از طریق چندین مسیر با تأخیرهای مختلف، در گیرنده دریافت می‌شود که این امر منجر به تداخل سمبل‌های مختلف با یکدیگر می‌گردد. در مدولاسیون $OFDM$ به دلیل افزایش طول سمبل، درصد کمتری از سمبل دستخوش این تداخل می‌شود. یکی دیگر از مزایای استفاده از این مدولاسیون، ساده‌تر شدن همسان‌سازی[۲] در گیرنده است. در این مدولاسیون پهنای باند به تعدادی زیرکانال با پهنای باند کمتر تقسیم می‌شود که هر یک از زیرکانال‌ها را می‌توان با یک کانال با محوشدگی مسطح[۳] تقریب زد. به همین دلیل همسان سازی در حوزه فرکانس بسیار ساده است.

امروزه با افزایش تعداد کاربران و افزایش تقاضا برای نرخ‌های ارسال بالا، افزایش کارایی طیفی و پوشش شبکه‌های بی‌سیم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین دلیل در سال‌های اخیر استفاده از مخابرات همکارانه مورد توجه قرار گرفته است. در مخابرات همکارانه، برای ارسال اطلاعات از منبع به مقصد از گره‌های واسطی به نام رله استفاده می‌شود که این گره‌ها به دلیل افزایش پوشش شبکه و هم‌چنین ایجاد چندگانگی در کانال‌های بی‌سیم، کارایی سیستم را ارتقا می‌بخشند.

---

[۱] Multipath fading

[۲] Equalization

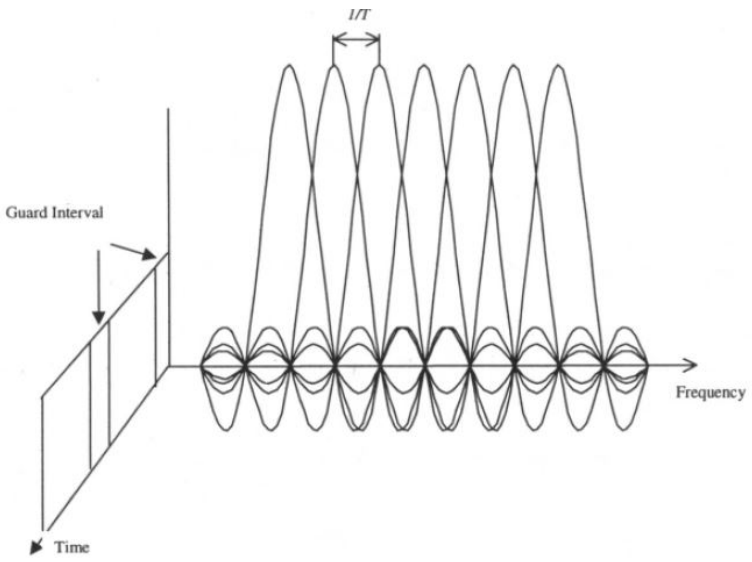
[۳] Flat Fading

در یک شبکه تعدادی از کاربران در فاصله زیادی از ایستگاه پایه قرار دارند و یا به دلیل وضعیت بد کانال، قادر به دریافت اطلاعات ارسالی از ایستگاه پایه نیستند، لذا رله برای این دسته از کاربران نقش یک واسط را ایفا می‌کند و یا به عبارت دیگر به پوشش سراسری شبکه کمک می‌کند. همچنین به دلیل وجود پدیده‌های مخربی مانند محوشدگی در کانال‌های بی‌سیم، استفاده از شیوه‌های مختلف ایجاد چندگانگی[۱] در این کانال‌ها قابلیت اطمینان سیستم را بالا می‌برد. یک روش ساده و کم هزینه برای ایجاد چندگانگی، استفاده از ایستگاه‌های رله در شبکه‌های بی‌سیم است. استفاده از ایستگاه‌های رله باعث ایجاد چندین مسیر مستقل بین فرستنده و گیرنده می‌شود. گیرنده با ترکیب پیام‌های دریافتی از مسیرهای مختلف، می‌تواند با محوشدگی کانال مقابله کند.

در این فصل ابتدا به معرفی ساختار کلی مدولاسیون $OFDM$ می‌پردازیم. سپس براساس نحوه پردازش سیگنال در رله، با انواع رله آشنا می‌شویم. پس از آن به دلیل اهمیت جایگاه مبحث بهینه‌سازی در فصول بعدی، به معرفی مسائل بهینه‌سازی محدب و همچنین روش‌های حل آن می‌پردازیم.

۲-۲ معرفی ساختار $OFDM$

$OFDM$ به عنوان یکی از روش‌های مدولاسیون فراگیر، مطرح است. ایده اصلی این مدولاسیون آن است که پهنای باند مشخصی را به تعداد مشخصی زیرکانال تقسیم می‌کند و هر زیرکانال را به یک زیرحامل نسبت می‌دهد. سپس سیگنال‌های پیام متمایز، توسط هر یک از زیرحامل‌ها، در یک دوره زمانی سمبل (Ts) ارسال می‌شود (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱: نمایش مدولاسیون $OFDM$ در حوزه زمان-فرکانس [۳].

به دلیل اینکه اطلاعات متمایزی در یک دوره زمانی سمبل (Ts) ارسال می‌شود، شکل سیگنال زمانی خاصی پدید می‌آید که به دلیل عمود بودن سمبل‌هایی که در یک دوره زمانی حضور دارند، امکان استخراج اطلاعات در گیرنده وجود دارد.

[۱] Diversity

همچنین برای اینکه سمبل‌های مختلف با یکدیگر تداخل پیدا نکنند، یک باند محافظ[۱] بین سمبل‌ها قرار داده می‌شود. برای حفظ خاصیت عمود بودن سمبل‌ها، این باند محافظ یک کپی از انتها و یا ابتدای سمبل $OFDM$ می‌باشد.

۲-۲-۱ مزیت‌های مدولاسیون $OFDM$ نسبت به مدولاسیون تک‌حاملی

همسان‌سازی آسان در حوزه فرکانس

در مدولاسیون $OFDM$، با تقسیم پهنای باند به تعدادی زیرکانال، می‌توان هر یک از این زیرکانال‌ها را به صورت یک کانال با محوشدگی مسطح در نظر گرفت. بنابراین برای همسان‌سازی کانال، کافی است هر نمونه را در عکس عدد مختلط متناظر با هر زیرکانال ضرب کرد. بدین منظور باید N نمونه خروجی DFT[۲] در N عدد مختلط ضرب شوند تا اثر کانال جبران شود. اما همسان‌سازی فرکانس برای مدولاسیون تک حاملی معادل با تخمین کانالی معادل با کل پهنای باند است که دارای پیچیدگی زیادی است. در حالی که در مدولاسیون $OFDM$ این همسان‌سازی به N ضرب تبدیل می‌شود.

حذف پدیده تداخل بین سمبلی

به دلیل اینکه طول سمبل $OFDM$ بسیار بیشتر از طول سمبل مدولاسیون تک‌حاملی است و گستره تأخیر کانال مستقل از نوع مدولاسیون است، تداخل بین سمبلی[۳] درصد کمتری از سمبل $OFDM$ را نسبت به مدولاسیون تک‌حاملی از بین می‌برد. همین امر باعث می‌شود تأثیر مخرب کانال روی مدولاسیون $OFDM$ کمتر از مدولاسیون تک‌حاملی باشد. همچنین به دلیل زیاد بودن طول سمبل $OFDM$، امکان قرار دادن باند محافظ بین سمبل‌ها و از بین بردن کامل تداخل بین سمبل‌ها وجود دارد.

۲-۲-۲ مشکلات $OFDM$

بالا بودن نسبت توان بیشینه به توان متوسط

در شکل موج زمانی سمبل $OFDM$، ممکن است در یک لحظه تمام زیرحامل‌ها همفاز شده و با هم جمع شوند، لذا قله این شکل موج نسبت به متوسط آن بسیار بیشتر است و بنابراین نسبت توان بیشینه به توان متوسط[۴] بالایی دارد. مشکلی که این پدیده به وجود می‌آورد این است که در فرستنده باید از تقویت کننده‌هایی استفاده کرد که دارای محدوده خطی وسیعی

---

[۱] Guard Interval

[۲] Discrete Fourier Transform

[۳] Intersymbol Interference

[۴] Peak to Average Power Ratio (PAPR)

باشند. زیرا شکل موج $OFDM$ نسبت به اعوجاج حساسیت بالایی دارد و اگر این شکل موج کمی خراب شود، خاصیت عمود بودن زیرحامل‌ها از بین رفته و امکان استخراج صحیح اطلاعات وجود نخواهد داشت.

تداخل بین حاملی

در کانال‌های بی‌سیم به دلیل وجود پدیده داپلر که در اثر تغییرات کانال ایجاد می‌شود، یک جابه‌جایی فرکانسی در سیگنال ارسالی ایجاد می‌شود. در ارسال اطلاعات با استفاده از مدولاسیون $OFDM$، جابه‌جایی فرکانسی باعث از بین رفتن تعامد سمبل $OFDM$ می‌شود. لذا یکی از مشکلات اساسی مدولاسیون $OFDM$ حساسیت آن به جابه‌جایی فرکانسی است که منجر به ایجاد تداخل بین زیرحامل‌ها[۱] می‌شود.

۲-۳ معرفی رله و انواع روش‌های رله کردن

در سیستم‌های مبتنی بر رله، رله نمی‌تواند همزمان در یک باند فرکانسی ارسال و دریافت را انجام دهد. شیوه‌های مختلفی برای رفع این مشکل وجود دارد. یک راه حل برای این مشکل، استفاده از رله در حالت نیمه-دوطرفه[۲] است. درواقع در این روش، ارسال در طول دو شیار زمانی [۳] مختلف و غیرهمپوشان انجام می‌شود. در شیار زمانی اول منبع اطلاعات را برای مقصد و رله به صورت پخشی [۴] ارسال می‌کند و در شیار دوم رله اطلاعاتی که از منبع دریافت کرده است را پس از پردازش، به‌سوی مقصد ارسال می‌کند. اصطلاحاً، شیار زمانی اول شیار پخشی[۵] و شیار زمانی دوم شیار رله‌ای[۶] نامیده می‌شود [۴]. زیرا در شیار اول اطلاعات به صورت پخشی ارسال می‌شود و در شیار دوم تنها رله اطلاعات را ارسال می‌کند.

بر اساس نحوه پردازش اطلاعات توسط رله و نحوه حضور رله در سیستم، سه روش رله دائمی[۷]، رله انتخابی[۸] و رله افزایشی[۹] برای رله کردن وجود دارد.

---

[۱] Inter Carrier Interference (ICI)

[۲] Half-Duplex

[۳] Time Slot

[۴] Broadcast

[۵] Broadcasting Slot

[۶] Relaying Slot

[۷] Fixed Relaying

[۸] Selection Relaying

[۹] Incremental Relaying

۲-۳-۱ رله دائمی

در روش رله دائمی، همیشه رله اطلاعات دریافتی از فرستنده را برای گیرنده ارسال می‌کند، به عبارت دیگر همیشه رله حضور دارد. در سیستم‌هایی که امکان اطلاع از وضعیت کانال وجود ندارد و یا مسیر مستقیم دچار محوشدگی شدیدی شده باشد، استفاده از روش رله دائمی مفید است.

روش‌های مختلفی برای پردازش اطلاعات در رله وجود دارد که مهمترین آن‌ها عبارت است از کدبرداری و ارسال، تقویت و ارسال[۱]، فشرده سازی و ارسال[۲] و همکاری کدشده[۳].

از میان روش‌های نام‌برده، دو روش کدبرداری و ارسال و تقویت و ارسال به دلیل سادگی و طراحی شهودی، رایج‌تر از روش‌های دیگر است [۵]. از این‌رو در این بخش به معرفی این دو روش ارسال می‌پردازیم.

روش کدبرداری و ارسال

این روش اولین بار توسط کاور[۴] و الجمال[۵] ارائه شد [۶] و یکی از قدیمی‌ترین روش‌های رله کردن است [۷]. در این روش ابتدا منبع، اطلاعات پیام را به صورت پخشی ارسال می‌کند. سپس رله و مقصد اطلاعات را دریافت می‌کنند. رله اطلاعاتی که از منبع دریافت می‌کند را کدبرداری و پس از آن برای فرستنده ارسال می‌کند. در نهایت، مقصد اطلاعات دریافتی از منبع و رله را با ضرایب مشخصی ترکیب کرده و براساس آن اطلاعات را آشکار می‌کند. روش‌های مختلفی برای ترکیب سیگنال در گیرنده وجود دارد که از مهمترین آن‌ها می‌توان به حداکثر نسبت ترکیب[۶]، ترکیب انتخابی[۷] و ترکیب با ضرائب یکسان[۸] اشاره کرد [۸]. نحوه عملکرد روش کدبرداری و ارسال در شکل ۲-۲ نمایش داده شده است.

مزیت این روش سادگی و تطبیق آن با شرایط کانال است [۷]. اما مشکل اساسی این روش این است که اگر رله نتواند کدبرداری را به درستی انجام دهد، با ارسال سیگنال به مقصد، خطا در سیستم منتشر می‌شود. در واقع زمانی که کانال بین منبع و رله با محوشدگی شدیدی مواجه باشد و یا فاصله رله و منبع بسیار زیاد باشد، این مشکل به وجود می‌آید. در این شرایط عدم استفاده از رله می‌تواند بهتر از استفاده از رله باشد. برای حل این مشکل، مرجع [۹] پیشنهاد می‌دهد در لحظاتی که کانال بین منبع و رله دارای نسبت سیگنال به نویز[۹] بالایی است، رله اطلاعات را آشکار و پس از آن برای مقصد ارسال

---

[۱] Amplify and Forward

[۲] Compress and Forward

[۳] Coded Cooperation

[۴] Cover

[۵] El Jamal

[۶] Maximum Ratio Combining

[۷] Selection Combining

[۸] Equal Gain Combining

[۹] Signal to Noise Ratio