بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

بررسی دایورسیتی همکارانه در مخابرات بی‌سیم با کانال لحظه‌ای معلوم

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق – مخابرات

علیرضا شریفیان

استاد راهنما
دکتر علی‌محمد دوست‌حسینی

۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق - مخابرات آقای علیرضا شریفیان
تحت عنوان

بررسی دایورسیتی همکارانه در مخابرات بی‌سیم با کانال لحظه‌ای معلوم

در تاریخ ۱۳۸۷/۳/۷ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱ -استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر علی‌محمد دوست‌حسینی

۲ -استاد مشاور پایان‌نامه دکتر محمدجواد امیدی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر علی‌محمد دوست‌حسینی

تشکر و قدردانی

در کلیه مراحل تحقیق و تدوین این پایان نامه از کمک و راهنمایی اساتید ارجمندی برخوردار بودم که لازم است مراتب قدردانی و تشکر خود را نسبت به آنان بیان دارم. از آقای دکتر علی‌محمد دوست‌حسینی، استاد راهنمای پایان‌نامه که در طی مدت تحصیل همواره نظرات سودمندشان حلال مشکلات بنده نه تنها در امور علمی بلکه در زندگی بوده است، کمال تشکر را دارم. بی‌شک بدون راهنمایی‌های ایشان انجام این پایان‌نامه میسر نبود. از آقای دکتر محمدجواد امیدی، استاد مشاور پایان نامه، که در مدت تحصیل از محضر ایشان بهره فراوان بردم و در انجام این تحقیق نیز از راهنمایی‌های ارزشمندشان خصوصا در مرحله‌ی نگارش پایان‌نامه استفاده نمودم سپاسگذاری و قدردانی می‌نمایم. همچنین لازم است از آقایان دکتر مدرس‌هاشمی و دکتر خسروی‌فرد که زحمت داوری این پایان‌نامه را متقبل شدند و با حضور در جلسه دفاع از پایان‌نامه نکات مفیدی را یادآوری نمودند، تشکر نمایم.

در نهایت آنچه هرگز نباید فراموش کنم عنایت الاهی است که در لحظه لحظه‌ی زندگی از آن برخوردار بوده‌ام. همچنین اگر کانون گرم و محبت‌های بی‌دریغ خانواده و مخصوصا پدر و مادر گرامی‌ام در کلیه‌ی مراحل تحصیل وجود نداشت، رسیدن به این مرحله‌ی تحصیلی امکان پذیر نبود. در همین جا تمام زحمات آنها را ارج می‌نهم و برای ایشان آرزوی سعادت‌مندی می‌نمایم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. این پایان‌نامه با حمایت مادی و معنوی مرکز تحقیقات مخابرات ایران به انجام رسیده است.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب----------هشت
چکیده----------۱

فصل اول-مقدمه

۱-۱مقدمه ---------- ۲
۱-۲ عناصر دایورسیتی همکارانه ---------- ۵
۱-۳ تاریخچه ---------- ۷
۱- ۴ رویکردهای پایه‌ی دایورسیتی همکارانه ---------- ۹
۱-۵ جنبه‌های دیگر همکاری ---------- ۱۳
۱-۵-۱ همکاری در لایه‌ی دسترسی به رسانه.....۱۳
۱-۵-۲ انتخاب رله به صورت توزیع شده.....۱۶
۱-۵-۳ مشابهت شبکه‌های حسگر و دایورسیتی همکارانه.....۱۸
۱-۵-۴ مقایسه‌ی مدولاسیون‌های همدوس و تفاضلی در کانال رله.....۱۹
۱-۵-۵ کدگذاری با اطلاعات جانبی.....۲۱
۱-۶ مدل ---------- ۲۲
۱-۷ ساختار پایان‌نامه ---------- ۲۳

فصل دوم-ظرفیت در دایورسیتی همکارانه

۲-۱ مقدمه ---------- ۲۵
۲-۲ ناحیه‌ی ظرفیت---------- ۲۵
۲-۳ اطلاعات متقابل در رویکردها---------- ۳۰
۲-۳-۱ تقویت-ارسال متعامد با همکاری مبدأ.....۳۱
۲-۳-۲ تصمیم‌گیری-ارسال متعامد با همکاری مبدأ.....۳۲
۲-۳-۳ تصمیم‌گیری-ارسال همزمان.....۳۴
۲-۳-۴ تقویت-ارسال همزمان.....۳۵
۲-۴ مقایسه‌ی ظرفیت رویکردها ---------- ۳۶
۲-۵ احتمال از کارافتادگی ---------- ۴۰
۲-۶ جمع‌بندی ---------- ۴۲

فصل سوم-آشکارسازی در دایورسیتی همکارانه

۳-۱ مقدمه ---------- ۴۳

۳-۲ آشکارساز حداکثر درستنمایی ---------- ۴۴

۳-۲-۱ تقویت-ارسال متعامد با همکاری مبدأ ۴۴

۳-۲-۲ تصمیم‌گیری-ارسال متعامد با همکاری مبدأ..... ۴۶

۳-۲-۳ تقویت-ارسال همزمان ۴۸

۳-۲-۴ تصمیم‌گیری-ارسال همزمان..... ۴۸

۳-۳ آشکارسازهای دیگر ---------- ۴۹

۳-۴ کدگذاری در دایورسیتی همکارانه ---------- ۵۱

۳-۴-۱ به‌کارگیری کدهای تطبیق پذیر سوراخ شده ۵۱

۳-۴-۲ آشکارساز حداکثر درستنمایی برای تقویت-ارسال و یک کد بلوکی در مبدأ..... ۵۴

۳-۵ جمع‌بندی ---------- ۵۶

فصل چهارم-تخصیص توان در دایورسیتی همکارانه

۴-۱ مقدمه ---------- ۵۷

۴-۲ تخصیص توان ---------- ۵۷

۴-۲-۱ تصمیم‌گیری-ارسال..... ۵۸

۴-۲-۲ تقویت-ارسال ۵۸

۴-۲-۳ در نظر گرفتن توام دو کاربر ۶۱

۴-۳ تخصیص توان در دایورسیتی همکارانه چندحاملی ---------- ۶۱

۴-۳-۱ تبدیل کانالهای غیرمسطح به کانالهای مسطح..... ۶۲

۴-۳-۲ تخصیص توان در زیر کانالهای فرکانسی ۶۴

۴-۴ جمع‌بندی ---------- ۶۷

فصل پنجم-نتیجه‌گیری و پیشنهادها ---------- ۶۸

پیوست -تحلیل احتمال خطا در رویکرد تقویت-ارسال با همراهی مبدأ ---------- ۷۳

مراجع ---------- ۷۶

چکیده

گسترش شبکه‌های بی‌سیم، افزایش کاربران، تقاضای رو به افزایش نرخ مبادله، منابع محدود و تخریب سیگنال در محیط بی‌سیم منشأ تحقیقات وسیع برای بهره‌برداری مناسب‌تر از منابع شده است. روش‌های دایورسیتی در هر سه بعد زمان، فرکانس و مکان برای کاهش عوارض و حتی بهره‌برداری از پدیده‌ی محوشدگی نقش کلیدی در بهبود کارایی شبکه‌های بی‌سیم دارند. دایورسیتی فضایی در مقایسه با دیگر انواع، به دلیل فراهم آوردن افزایش کارایی بدون اتلاف منابع فرکانسی و بدون ایجاد تاخیر، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این حال، به کارگیری دایورسیتی فضایی در شبکه‌های بی‌سیم باعث افزایش هزینه و حجم می‌گردد. در این صورت هم نباید به کلی از مزایای دایورسیتی فضایی چشم پوشید. دایورسیتی همکارانه با به اشتراک گذاشتن و بهره‌برداری هماهنگ از منابع و انتخاب متناسب روش همکاری، امکان استفاده‌ی نسبی از مزایای دایورسیتی فضایی را برای گره‌های تک آنتنه، به خصوص در شبکه‌هایی که با محدودیت‌های هزینه، حجم، انرژی و منابع فرکانسی مواجه‌اند، فراهم می‌کند. تحقیقات نشان داده است که سیستم‌های مخابراتی نسل آینده باید تطبیق-پذیر، توزیع شده و همکارانه باشند. دایورسیتی همکارانه، به عنوان مرز انفصال مخابرات گره به گره و شبکه‌ای، یک نامزد جدی برای نسل آینده‌ی شبکه‌های بی‌سیم است. در این پایان‌نامه مبانی و جنبه‌های دایورسیتی همکارانه به عنوان یک رویکرد جدید تحقیقاتی در سیستم-های مخابراتی معرفی می‌گردد. ظرفیت، آشکارسازی و تخصیص توان در دایورسیتی همکارانه به طور جزئی‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. دو رویکرد تقویت-ارسال و تصمیم‌گیری-ارسال، به موازات مطالعه شده‌اند. محاسبه‌ی ظرفیت و تعیین آشکارساز بهینه از دو جنبه‌ی لحاظ همکاری مبدأ و ارسال همزمان کاربران مورد مطالعه قرار گرفته است. الگوریتمی جهت تخصیص بهینه‌ی توان با معیار ظرفیت و در نظر گرفتن توام ارسال دو کاربر به عنوان یک حالت خاص از دایورسیتی همکارانه‌ی چندحاملی ارائه گردیده است. نشان داده شده است که در تصمیم‌گیری-ارسال، روش لب‌ریزی راه‌حل بهینه است و در تقویت-ارسال، روش لب‌ریزی به صورت دوری به تخصیص بهینه نزدیک می‌شود. در نهایت نیز پیشنهادهایی برای ادامه‌ی تحقیق ارائه شده است.

فصل اول

مقدمه

۱-۱مقدمه

گسترش شبکه‌های بی‌سیم، افزایش کاربران، تقاضای رو به افزایش نرخ مبادله و منابع محدود در مخابرات بی‌سیم منشاء تحقیقات وسیعی برای بهره‌برداری مناسب‌تر از منابع شده است. امواج الکترومغناطیس در محیط بی‌سیم تحت تاثیر پدیده‌ی چندمسیره و ماهیت تغییرپذیر کانال در معرض محوشدگی در سه حوزه‌ی زمان، فرکانس و فضا قرار می‌گیرند [۱]. تکنیک‌های دایورسیتی نیز در هر سه بعد برای کاهش عوارض و حتی بهره‌برداری از پدیده‌ی محو شدگی نقش کلیدی در بهبود کارایی شبکه‌های بی‌سیم دارند [۲]. بدون استفاده از روش‌های مذکور احتمال خطا که در صورت عدم وجود محوشدگی به صورت نمایی با توان کاهش می‌یابد، با وجود محوشدگی به صورت متناسب با معکوس سیگنال به نویز[1] خواهد بود. به کارگیری مناسب روش‌های دایورسیتی می‌تواند این رابطه را به رابطه‌ای متناسب با توانی از معکوس سیگنال به نویز نزدیک نماید [۱]. در صورت استقلال آماری کانال‌های مورد استفاده، این توان برابر تعداد کانال‌ها خواهد شد. سیستم‌های دایورسیتی بر اساس پارامترهای همدوسی شامل زمان همدوسی، فرکانس همدوسی و فاصله‌ی همدوسی طراحی می‌شوند تا استقلال کانال‌ها فراهم شود [۲]. استفاده‌ی بهینه از سیستم‌های دایورسیتی برای رسیدن به قدرت کامل آن‌ها به جای استفاده از کدهای تکرار نیز مسئله قابل توجهی است [۳].

[1] Signal to Noise Ratio

تقلید از طبیعت همیشه الهام بخش و منشا نوآوری‌های زیادی برای حل مسائل و مشکلات بوده است. یک ایده‌ی بنیادین، همکاری[1] است که در سال‌های اخیر توجه زیادی به تحقیق روی زمینه‌های مرتبط با آن در شبکه‌های بی‌سیم شده است [۴]. دایورسیتی فضایی در مقایسه با دیگر انواع، به دلیل فراهم آوردن افزایش کارایی بدون اتلاف منابع فرکانسی و بدون ایجاد تاخیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و باعث افزایش ظرفیت، افزایش مقاومت و افزایش برد ارسال می‌گردد [۵]. نشان داده شده است که فاصله‌ی همدوسی در شبکه‌های بی‌سیم با توجه به ارتفاع آنتن، بین ۱ تا ۱۰ برابر طول موج سیگنال می‌باشد [۲]. در این روش با استفاده از آنتن‌های چندگانه در فرستنده و/یا گیرنده و به کارگیری کدهای مناسب و الگوریتم‌های ترکیب دایورسیتی، کارایی طیفی کانال بی‌سیم افزایش می‌یابد. در صورت طراحی مناسب، به دلیل ایجاد کانال‌های مستقل بین زوج‌های فرستنده وگیرنده می‌توان به مرتبه‌ی دایورسیتی برابر با حاصل‌ضرب تعداد آنتن‌ها در ورودی و خروجی دست یافت [۶]. با این حال به کارگیری دایورسیتی فضایی در شبکه‌های بی‌سیم، باعث افزایش هزینه و حجم (با توجه به فاصله‌ی همدوسی و طول موج) می‌گردد. در این صورت هم نباید به کلی از مزایای دایورسیتی فضایی چشم پوشید. دایورسیتی همکارانه[2] با به اشتراک گذاشتن منابع و توان محاسباتی هر گره با گره‌های مناسب و انتخاب متناسب روش همکاری امکان استفاده‌ی نسبی از دایورسیتی فضایی و بعضی از مزایای شناخته شده و فوق‌العاده‌ی سیستم‌های چندورودی-چندخروجی را، برای گره‌های تک آنتنه، به خصوص در شبکه‌هایی که با محدودیت‌های هزینه، حجم، انرژی و منابع فرکانسی مواجه‌اند، فراهم می‌کند [۷،۸]. به طور خلاصه یکی از روش‌های مقابله با عوارض کانال بی‌سیم، استفاده از دایورسیتی به معنای به وجود آوردن مسیرهای مستقل است و دایورسیتی همکارانه راه جدیدی برای استفاده از دایورسیتی فضایی به معنای ارسال و/یا دریافت سیگنال از نقاط مختلف در شبکه‌های تک آنتنه توسط رله[3] کردن سیگنال همکاران و به اشتراک گذاشتن منابع است [۴].

در یک محیط بی‌سیم سیگنال ارسالی توسط تمام گره‌های مجاور شنیده می‌شوند و گره‌ها بدون هزینه‌ی اضافی می‌توانند به سیگنال‌های غیر از سیگنال مورد نظر خود نیز گوش دهند. در این شرایط با پردازش مناسب و ارسال مجدد[4] داده‌ها توسط گره‌های مجاور می‌توان عملکرد سیستم را بهبود داد. به عبارت دیگر، مخابرات همکارانه[5] به طرحی گفته می شود که گره‌های شبکه با همکاری، سعی در ارسال توام اطلاعات خاص خود در محیط بی‌سیم می-نمایند. در این طرح علاوه بر حصول دایورسیتی به طور طبیعی با پدیده‌های افت و اثر سایه نیز مقابله می‌شود [۹].

---
[1] Cooperation
[2] Cooperative Diversity
[3] Relaying
[4] Forward
[5] Cooperative Communications

هدف اصلی، بهبود عملکرد به تعبیرهای مختلف از جمله احتمال از کار افتادگی، احتمال خطای سمبل یا بیت و نظایرآن‌ها در یک نرخ ارسال داده شده یا افزایش نرخ در یک قابلیت اطمینان داده شده، است. با این دیدگاه، همکاری با بده بستان‌هایی بین کارایی و استفاده از منابع روبرو خواهد بود و درجات آزادی جدیدی به طراحی اضافه می‌شود. الگوریتم‌های پردازش و رویکردهای متعددی تاکنون ارائه شده است که بهبود کارایی را در معیارهای ذکر شده و صرفه جویی در منابع شبکه و کانال را به اثبات رسانده‌اند [۴]. تحقیقات روی مفاهیم همکارانه را می‌توان به دو بخش محاسبه‌ی حدود کارایی و طراحی و تحلیل سیستم‌های مبتنی بر همکاری، تقسیم کرد. ظرفیت، مگر در حالات خاص فقط به صورت کران‌های بالایی (کات ست[1]) و پایینی (بر مبنای طرح‌های عملی) به دست آورده شده است. هرچند هنوز بین این دو کران فاصله وجود دارد [۱۰].

دایورسیتی همکارانه در شبکه‌های با زیر ساخت[2] و بدون زیر ساخت[3] قابل به کارگیری است. به دلیل آنکه کاربران برای اطلاع از داده‌های یکدیگر مجبور به صرف منابع فرکانسی هستند، از این روش نمی‌توان بهره‌ای مشابه کانال‌های چندآنتنه انتظار داشت، هرچند که با توجه به ماهیت پخش کانال بی‌سیم، انرژی اضافه‌ای از این نظر لازم نیست. در واقع فاز اول بهایی است که در مقابل ایجاد دایورسیتی می پردازیم و اغلب توسط این بهره جبران می شود. نکته‌ی دیگر آنکه کاربران لازم است از کانال‌های متعامد برای ارسال استفاده کنند تا امکان دریافت داده‌های همکاران میسر شود. ضمن آنکه در صورت استفاده از تعامد فرکانسی، لازم است حداقل در دو فرکانس، دریافت و/ یا ارسال انجام گیرد (در شبکه‌های سلولی در مسیر برگشت[4] قابلیت دریافت وجود دارد. با فرض تعامد فرکانسی در دایورسیتی همکارانه لازم است که در مسیر رفت[5] نیز قابلیت دریافت در نظر گرفته شود که مطلوب نیست) که برای اجتناب از این مسئله می‌توان از تعامدهای مبتنی بر زمان یا کد استفاده کرد. چنین مسائلی باعث تفاوت طراحی سیستم‌های دایورسیتی همکارانه از آرایه‌ی آنتن‌ها می‌شود [۳].

یک ساختار همکارانه را می‌توان به سه زیر بخش چگونگی همکاری (شامل میزان همکاری)، گروهبندی (انتخاب همکار) و تخصیص منابع تجزیه نمود. هر چند سه موضوع ارائه شده مستقل از یکدیگر نمی‌باشند و مرز بندی دقیق دشوار است، با این حال این دسته‌بندی برای درک و بررسی مسئله مفید خواهد بود.

---

[1] Cut Set Bound
[2] Infrastructure Based Network
[3] Non- Infrastructure Based Network
[4] Downlink
[5] Uplink

در دیدگاه سنتی، لایه فیزیکی به منزله‌ی یک مجرای بیت از یک گره به گره‌ی دیگر تلقی می‌شود. علی رغم سادگی، به دلیل آنکه کانال بی‌سیم یک رسانه‌ی چندورودی-چندخروجی[1] است، این دیدگاه موجب استفاده‌ی غیر بهینه از منابع می‌گردد [۱۱]. روش بهتر آن است که گره‌ها با مشارکت در سطح سمبل‌ها، داده‌های شرکای خود را به مقصد مورد نظر ارسال کنند. همکاری در سطح لایه‌ی فیزیکی متفاوت از همکاری در لایه‌های بالاتر در حد بسته‌ها است.

در نگاه اول به نظر می‌رسد که به دلیل افزایش تعداد ارسال‌ها توان ارسالی افزایش یافته است. با این حال دایورسیتی ایجاد شده، امکان کاهش توان ارسالی را فراهم می‌کند. همچنین ممکن است به نظر برسد چون هر کاربر لازم است اطلاعات بیشتری را ارسال نماید، نرخ ارسال کاهش یافته است. با این حال با نگاه به جنبه‌ی دیگر مسئله می‌توان دریافت که به علت به وجود آمدن دایورسیتی نرخ کدهای به کار رفته در سیستم می‌تواند افزایش یابد [۳].
به‌کارگیری همکاری در شبکه های بی سیم قالب جدیدی ایجاد کرده است که در کنار به وجود آوردن مزایای متنوعی شامل مقاومت در برابر اثرات مخرب کانال، افزایش میزان گذار[2]، کاهش تاخیر، کاهش تداخل (نتیجه‌ی صرفه‌جویی در توان)، افزایش برد، تقسیم عادلانه‌تر منابع شبکه، افزایش بازده پهنای باند و توان، و به طور کلی افزایش کارایی کل شبکه از دیدگاه‌های مختلف، مسائل و چالش‌های جدیدی نیز به همراه آورده است. به طور کلی به کارگیری تمام ظرفیت‌هایی که مفاهیم مشارکتی ایجاد می‌کنند نیاز به بازنگری و در بعضی موارد طراحی مجدد و در عین حال بین لایه‌ای[3] پروتکل‌های مخابراتی برای تطبیق بهینه‌ی تقاضای متغیر با شرایط متغیر در شبکه‌های بی‌سیم دارد [۹].

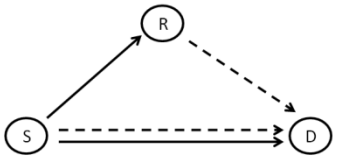
۱-۲ عناصر دایورسیتی همکارانه

هرچند دایورسیتی همکارانه با توجه به امکان تعدد گره‌های درگیر در چیدمان‌های مختلفی قابل ارائه است، شبکه‌ی سه تایی مبدأ-رله-مقصد سنگ بنای دایورسیتی همکارانه در شبکه‌های بی‌سیم است. چنین شبکه‌ای را کانال رله می‌نامند. (شکل ۱-۱)

به عنوان یک توضیح مقدماتی دو کاربر را در نظر بگیرید. علی رغم آنکه هر کاربر تک آنتنه است، می‌تواند پیغام کاربر دیگر را (با توجه به طبیعت پخش کانال بی‌سیم و امکان دریافت رایگان پیام‌های غیر مربوط) دریافت نماید و یک نسخه مناسب آنرا همراه با داده خود مجددا ارسال کند. به این ترتیب با هزینه کاهش کارایی طیفی،

[1] Multiple Input Multiple Output
[2] Throughput
[3] Cross Layer Design

دایورسیتی به وجود می‌آید. به عبارت ساده درصورت از بین رفتن مسیر مستقیم، ارسال مـی‌توانـد از طریـق رلـه انجـام گیرد و ارتباط در صورتی قطع می شود که هر دوکانال در محوشدگی عمیق قرار گیرند که به طور شهودی بـه معنـی دایورسیتی مرتبه‌ی دو است. به علاوه مقصد می‌تواند پیام‌هایی با کیفیـت مختلـف را ترکیـب کـرده و تصـمیم بگیـرد. حالت ذکر شده قابل تعمیم به حالتی که گره‌های بیشتری در ارسال و دریافت همکاری می‌کنند نیز می‌باشد.



شکل ۱-۱: ساختار سیستم دایورسیتی همکارانه با یک رله.

D,R,S به ترتیب مبدأ، رله، مقصد و خطوط پر و نقطه چین، فاز اول و دوم را نشان می دهند.

هزینه و فایده‌ی دایورسیتی همکارانه در چیدمان‌های مختلف نسبت به حال غیر همکارانه، در منابع یکسان و از منظر معیارهای مختلف کارایی (ازجمله نرخ ارسال [۱۳،۱۲]، انرژی ارسالی بر بیت [۹]، تداخل به وجود آمده [۹]، احتمال خطا[1] [۱۳]، احتمال از کار افتادگی[2] [۱۵،۱۴]، ظرفیت [۱۷،۱۶]، ناحیه‌ی ظرفیت[3] [۷،۸]، بازدهی پهنای باند[4]، بده بستان دایورسیتی-مولتی پلکسینگ[5] [۱۵،۱۴]، مرتبه دایورسیتی [۱۵،۱۴][6]) موضوع مهمی محسوب می‌شود. هر چند بررسی‌های نظری و شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که معیارهای کارایی با استفاده از دایورسیتی همکارانه بهبود می-یابد ولی این مطلب به آن معنا نیست که در همه‌ی شرایط، یک رویکرد خاص دایورسیتی همکارانه بهتر از ارسال مستقیم عمل نماید. با این حال در شرایط مناسب و با بکارگیری الگوریتم‌های همکاری متناسب، امکان صرفه‌جویی وجود دارد [۷،۸]. از جمله مسائل با اهمیت در موضوع همکاری در شبکه‌های بی‌سیم، میزان بهره‌ی هر کاربر در مقابل منابعی است که به اشتراک می‌گذارد. یک وضعیت نامطلوب آن است که افزایش کارایی یک کاربر به قیمت کاهش کارایی کاربر دیگر نسبت به ارسال مستقیم تمام شود. این مسائل باعث تحقیقات تلفیقی وسیعی در حوزه‌های مخابرات گره به گره، پردازش سیگنال و شبکه و توجه مجدد به مسائل از یاد برده شده در سال‌های اخیر گردیده است [۴].

دایورسیتی همکارانه، در بین دیگر قابلیت‌ها، از استقلال سیگنال‌های دریـافتی از مسـیرهای مختلـف اسـتفاده مـی-نماید. به عنوان مثال اگر سیگنال دریافتی از مبدأ دچار محوشدگی عمیق شود، احتمال آنکه سیگنال دریافتی از رله بـا

[1] Bit Error Rate
[2] Outage Probability
[3] Capacity Region
[4] Band-Width Efficiency
[5] Diversity Multiplexing Tradeoff
[6] Diversity Order

چنین وضعیتی روبرو گردد بسیار اندک است. به دلیل آنکه مخابرات همکارانه به طور ذاتی یک مسئله شبکه ای است، لذا مسائلی مانند لایه‌بندی پروتکل و طراحی بین‌لایه‌ای مطرح می شوند. در پایین‌ترین لایه یعنی لایه‌ی فیزیکی، کد گذاری [۱۸-۳،۲۲]، مدولاسیون [۱۳،۲۳-۲۴] و تخصیص توان [۲۶-۳۳] در مبدأ و رله و همچنین کدبرداری و به طور کلی آشکارسازی در مقصد، مسائل اساسی محسوب می شوند. با این حال چنین مسائلی را می توان بخشی از کدگذاری و ارسال مجدد در لایه‌ی پیوند[1]، مثل مکانیزم‌های ارسال مجدد خودکار[2] [۳۴]، نیز دانست. حل و فصل مدیریت و زمان‌بندی ارسال در زمان و فرکانس نیز می‌بایست در لایه‌ی پیوند و در زیر لایه‌ی کنترل دسترسی به رسانه[3]، هماهنگ با لایه‌ی فیزیکی صورت گیرد [۱۲،۱۵]. همزمان‌سازی در سطوح حامل، سمبل و قاب داده نیز از دیگر مسائل مرتبط با لایه‌ی فیزیکی می باشند. بالاخره انتخاب گره‌های همکار [۱۱،۳۵-۳۶] از میان گره-های قابل دسترسی مسئله دیگری است که ممکن است به جز لایه‌های فیزیکی و پیوند، لایه‌ی شبکه را نیز تحت تاثیر قرار دهد [۳۶]. به عبارت کلی، طراحی یک رویکرد دایورسیتی همکارانه، مسئله ای است که نیاز به دیدگاه عمیق نسبت به مسائل ذکر شده و نگرش مناسب به لایه‌ها دارد. کاربرد مورد نظر، محدودیت‌های سخت افزاری ، پردازشی و رادیویی این طراحی را نیز تحت تاثیر قرار خواهد داد.

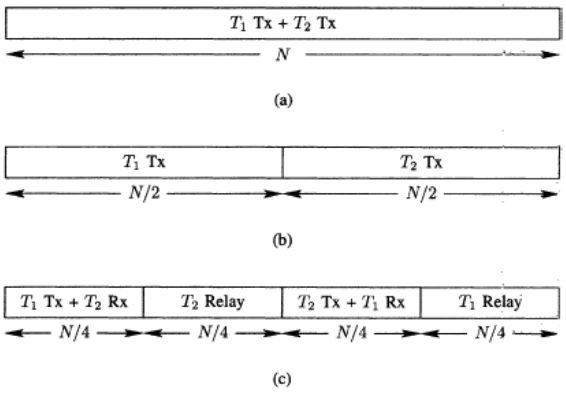
به دلیل آنکه در طرح‌های همکارانه مطلوب آنست که هیچ گره ای صرفا رله نباشد، لازم است تا ارسال کاربران در کانال‌های متعامد صورت گیرد. این کانال‌ها می‌توانند در فرکانس، زمان یا کد از هم جدا شوند. برای مثال در یک طرح زمانی ارسال دوکاربر می‌تواند به صورت شکل ۱-۲ به چهار شکاف زمانی شامل دو شکاف مشارکتی و دو شکاف غیر مشارکتی تقسیم شود. این طرح را ارسال متعامد زمانی یا ارسال چهارشکافی می‌نامیم.

۱-۳ تاریخچه

فرمول‌بندی اولیه‌ی مسئله‌ی رله در [۱۶] از دیدگاه تئوری اطلاعات و ظرفیت صورت گرفت. بسیاری از ایده‌های توسعه داده شده‌ی بعدی از مقاله‌های مذکور منشاء گرفته است. با این حال تحقیقات اخیر از چند جنبه با فرضیات [۱۶،۳۷] متفاوت است. در تحقیقات اخیر محوشدگی در نظر گرفته می‌شود و تاکید روی دایورسیتی است. ضمنا هیچ گره‌ای اختصاصا رله در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین به جای حالت غیرعملی دوسویه[4]، حالت یک سویه[5] مورد توجه قرار گرفته است. حالت دو سویه به امکان دریافت و ارسال همزمان در یک باند اتلاق می‌شود و حالت یک

[1] Link Layer
[2] Automatic Repeat reQuest
[3] Medium Access
[4] Full Duplex
[5] Half Duplex

سویه در صورت عدم وجود این امکان فرض می‌شود. به طور نظری به دلیل اینکه هر گره از سیگنال ارسالی خود با خبر است، حذف این تداخل از سیگنال دریافتی امکان پذیر است اما در عمل به دلیل عدم اطلاع دقیق از ویژگی‌های سخت افزاری، عدم امکان ایزولاسیون مناسب، اثر دقت محدود چندی‌سازی[1] و بالاتر بودن فوق‌العاده توان ارسال نسبت به دریافت، حالت دوسویه با توجه امکانات امروزی قابل پیاده‌سازی نیست [۱۱]. به همین دلیل کانال‌های ارسال و دریافت متعامد در نظر گرفته می‌شوند. این مسئله در طرح‌های مبتنی بر تسهیم کد نیز به دلیل ارسال و دریافت در یک فرکانس و یک زمان نیز مطرح می‌شود. راه‌حل استفاده از طرح‌های ترکیبی تسهیم کد و تسهیم زمان است.



شکل ۱-۲: سیگنال دهی در a) ارسال مستقیم با تداخل،b) ارسال مستقیم بدون تداخل، c)مثالی از دایورسیتی همکارانه با یک رله.

دایورسیتی همکارانه به شکل امروزی آن با توسعه کانال رله به مجموعه‌ای از کاربران (هر کدام با داده‌هایی برای ارسال) که نقش رله را نیز انجام می‌دهند، شکل گرفته است [۷–۸]. از نظر تاریخی می‌توان ریشه‌ی مخابرات همکارانه را در ذیل کانال‌های با فیدبک توسعه داده شده[2] نیز جستجو کرد هر چند که به آن کمتر اشاره شده است [۷]. سیر تکاملی مفاهیم همکاری در شبکه‌های بی‌سیم را می‌توان در سه مرحله تقسیم بندی نمود: دوره‌ی اول شامل مقالات کاور [۱۶] ، وندرمولن و همکاران آن‌ها در مورد ارائه‌ی ایده‌ی همکاری در ارسال داده و در زمینه‌ی ظرفیت کانال رله [۳۷] است. تحقیقات عمده در دوره‌ی دوم با تاخیر بیست ساله، شامل تحقیقات آژنگ [۷–۸] ، لینمن [۱۴،۲۴–۱۵]، ارکیپ [۷–۸، ۱۸–۱۹]، نصرتی نیا [۳، ۲۰–۲۱] و مدسن [۱۷] با فرض‌های منطقی‌تر و توجه ویژه به روش‌های عملی همکاری می‌باشد. بعد از این دوره با توجه به چشم‌انداز روشن‌تر، بلافاصله تحقیقات متعددی در زمینه‌های گوناگون تعریف شده است. شناخت بهتر کانال‌های محوشدگی، شبکه‌های سلولی و اقتضایی[3]، مفاهیم کانال‌های چند آنتنه [۶]، مفاهیم کدگذاری و مدولاسیون، ارسال وفقی و حل شدن مسائل پیاده‌سازی تاثیر زیادی در باز شدن راه و فراهم آوردن ابزارهای جدید برای توسعه مفاهیم همکاری در شبکه‌های بی‌سیم داشته است.

---
[1] Quantization
[2] Generalized Feedback Channel
[3] Ad Hoc

هر چند پروتکل‌های همکاری از بعضی جهات شبیه به ارسال چندگامی است با این وجود، این دو موضوع به طور بنیادین با یکدیگر متفاوت اند. به طور خلاصه این تفاوت‌ها را می‌توان در مواردی مانند پردازش هوشمندانه‌تر در رله بر اساس شرایط، امکان تعدد رله‌ها در یک ارسال، استفاده‌ی مقصد از دو دسته سیگنال فاز اول و دوم، امکان همراهی مبدأ در فاز دوم، امکان به‌کارگیری ارسال فضا-زمان، استفاده از اطلاعات نرم (که در لایه شبکه وجود ندارد) و رله‌ی صرف نبودن گره‌ها ذکر کرد.

۱- ٤ رویکردهای پایه‌ی دایورسیتی همکارانه

طرح‌های زیادی در مورد پیش‌پردازش در مبدأ، پردازش در رله و آشکارسازی در مقصد یا به طور کلی کد-گذاری توام در مبدأ و رله و کدبرداری توام در مقصد و رله برای بالا بردن کارایی و نزدیک شدن به حدود کارایی(ظرفیت) ارائه گردیده است. در هر چیدمان همکاری، ارسال به دو فاز (احتمالا با اندازه‌های مناسب) تقسیم می‌شود. بعد از ارسال در فاز اول توسط مبدأ، چندین امکان برای فاز دوم، مستقل از پردازش صورت گرفته در رله، وجود دارد. مبدأ می‌تواند در این فاز یک کلمه‌ی کد دیگر در همان کانال یا درکانال متعامد ارسال نماید. در صورتی که مبدأ بتواند ارسال رله را پیش‌بینی و همزمانی لازم را فراهم کند، همکاری با ارسال در همان کانال رله، قابل انجام است [۱۰].

تقویت-ارسال[1] **:** در رویکرد تقویت-ارسال، رله اقدام به تقویت آنالوگ سیگنال دریافتی و ارسال مجدد آن با توجه به محدودیت توان خود می‌نماید. به عبارت دیگر در فاز اول، مبدأ سیگنال خود را ارسال و رله و مقصد دریافت می‌کنند. رله در فاز دوم، با همراهی و یا بدون همراهی مبدأ، سیگنال تقویت شده‌ی دریافتی خود را برای مقصد ارسال می‌نماید. هر چند رویکردهای دیگری بر مبنای نگاشت خطی در رله نیز توسعه یافته‌اند با این حال تقویت-ارسال، معروف‌ترین و شناخته شده‌ترین آن‌ها است. مقصد با پردازش دو دسته سیگنال دریافتی به وسیله نوعی الگوریتم ترکیب دایورسیتی، سمبل ارسالی را تخمین خواهد زد. پردازش سیگنال آنالوگ در این الگوریتم از مشکلات آن محسوب می شود [۳].

تصمیم‌گیری-ارسال[2]**:** در رویکرد تصمیم‌گیری-ارسال، رله با اعمال گونه‌ای از آشکارسازی و/یا کدبرداری روی سیگنال دریافتی وکدگذاری و مدولاسیون مجدد آن، همکاری می‌نماید. چنین پردازش‌هایی اصولا نگاشت-هایی غیر خطی‌اند. در این صورت فرض بر این است که کانال منتهی به رله کیفیت خوبی داشته و بنابراین سمبل‌های مورد نظر به طور صحیح آشکار می‌شوند. در غیر این صورت تصمیم‌گیری غلط باعث انتشار خطا می‌شود. الگوریتم-

[1] Amplify-Forward (AF)
[2] Decode-Forward (DF)

های متنوعی بر اساس تصمیم‌گیری-ارسال توسعه یافته‌اند [۷-۸]. به طور مشابه، مقصد با اعمال نوعی تکنیک ترکیب دایورسیتی، سیگنال ارسالی را از دو دسته سیگنال دریافتی استخراج می‌کند.

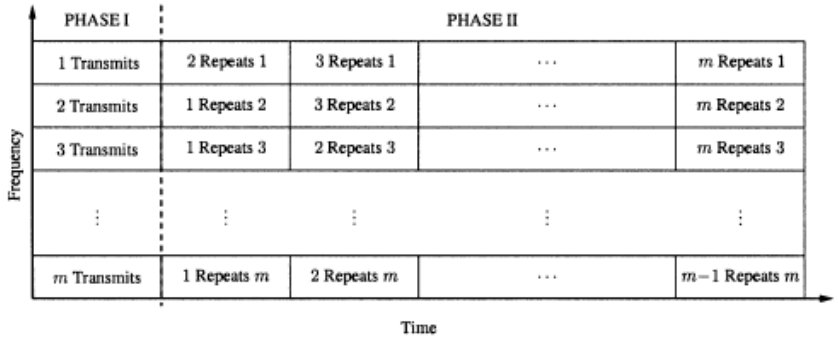
برای بهبود تصمیم‌گیری-ارسال و جلوگیری از انتشار خطا، در [۱۴] راهکاری ارائه شده است که وقتی کانال منتهی به رله نسبت سیگنال به نویز بالایی دارد، رله از تصمیم‌گیری-ارسال استفاده می‌کند و در غیر این صورت گره-ها به حالت غیر همکارانه بر می‌گردند. به این رویکرد تصمیم‌گیری-ارسال انتخابی[1] اتلاق می‌شود. اصلاح دیگری که در الگوریتم‌های دایورسیتی همکارانه بررسی شده است [۱۴]، اعلام وضعیت کدبرداری توسط مقصد به فرستنده‌ها است. در این روش، به نام ارسال افزایشی[2]، در فاز اول گیرنده اقدام به اعلام وضعیت صحت کدبرداری به فرستنده‌ها می‌کند و تنها در صورتی همکاری به کار می‌رود که فاز اول کافی نباشد. در طرح دیگری [۷-۸] همکاری بر اساس تقسیم کد[3] مورد بررسی قرار گرفته است. در این طرح هر پریود سیگنال‌دهی از سه بخش تشکیل شده است. است. در بخش اول و دوم هر گره بیت‌های خود را با کد مختص به خود ارسال می‌کند. هر گره، قسمت دوم بیت‌های گره‌ی دیگر را تشخیص می‌دهد و در بخش سوم هر گره، یک ترکیب خطی از بیت‌های بخش دوم خود و بخش دوم گره‌ی دیگر را با کدهای متناظر ارسال می‌کند. نکته‌ی قابل توجه آنکه با تغییر ضرایب توان (همراه با لحاظ قید توان) پروتکل، تطبیق لازم با شرایط را پیدا می‌کند. به زبان ساده وقتی کانال میان دو کاربر به اندازه‌ی کافی خوب است توان بیشتری به همکاری اختصاص می‌یابد و بر عکس. لازم به ذکر است در این طرح، مقصد از کانال میان دو کاربر مطلع است.

در یک طرح ترکیبی [۲۰-۲۲] که زیر شاخه‌ای از تصمیم‌گیری-ارسال محسوب می‌شود، هر گره بعد از اضافه کردن افزونگی چرخشی[4] وکدگذاری اطلاعات، اقدام به تقسیم کلمه‌ی کدشده‌ی خود از طریق سوراخ‌کردن[5] می-کند. سپس در فاز اول دو گره اقدام به ارسال قسمت اول کلمه‌ی کد خود، برای مقصد مشترک در کانال‌های مجزا می‌نمایند. هر گره بعد از دریافت قسمت اول کلمه‌ی گره‌ی دیگر، اقدام به چک کردن افزونگی چرخشی پیام همکار خود می‌نماید. در صورتی که افزونگی چرخشی صحیح باشد در فاز دوم، قسمت دوم پیام همکار خود را با کدکردن مجدد، ارسال می‌کند. با توجه به شرایط کانال‌ها، چهار حالت برای همکاری قابل تصور است. در طرح ذکر شده از کدهای تطبیق پذیر سوراخ شده[6] که قابلیت تطبیق دارند استفاده می‌شود تا مکانیزمی برای در نظر گرفتن شرایط

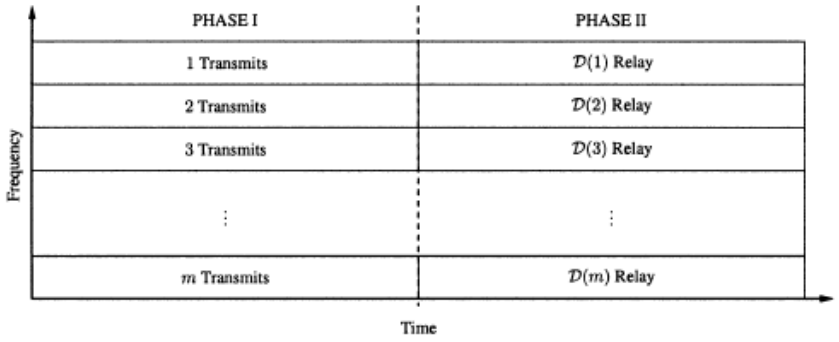
[1] Selective Decode-Forward (SDF)
[2] Incremental Relaying (IR)
[3] Code Division Multiplexing Access (CDMA)
[4] Cyclic Redundancy Check (CRC)
[5] Puncturing
[6] Rate Compatible Puncturing Codes (RCPC)

لحاظ گردد. ضمن آنکه رویکرد استفاده از افزونگی چرخشی باعث تطبیق بر اساس کانال منتهی به رله می‌شود. نکته‌ی با اهمیت در این طرح، قابل تنظیم بودن ضریب همکاری با شرایط است. روش‌های متنوع دیگری به ویژه با بکارگیری کدگذاری منبع و کانال و چندی کردن در رله نیز وجود دارد [۱۰].

در صورت وجود بیش از یک رله دو امکان وجود دارد. امکان اول اینکه رله‌ها، داده‌ی خود را روی کانال‌های متعامد ارسال کنند به طوری که مقصد بتواند سیگنال آن‌ها را کاملا از هم جدا کند. امکان دوم آنست که رله‌ها همزمان روی یک کانال ارسال نمایند طوری که در مقصد تداخل کنند. نشان داده می‌شود که روش دوم، کارایی طیفی بالاتری دارد. به طور کلی امکانات مختلفی که برای ارسال در فاز دوم توسط رله(ها)، همکاری یا عدم همکاری مبدأ در فاز دوم و به‌کارگیری سیگنال‌های فاز اول و دوم توسط مقصد وجود دارد، طرح‌های متعددی را بر اساس رویکردهای پایه ارائه می‌دهد. در شکل‌های (۱-۳) و (۱-۴)، به ترتیب، ارسال متعامد و متداخل (همزمان) رله-ها نشان داده شده است.



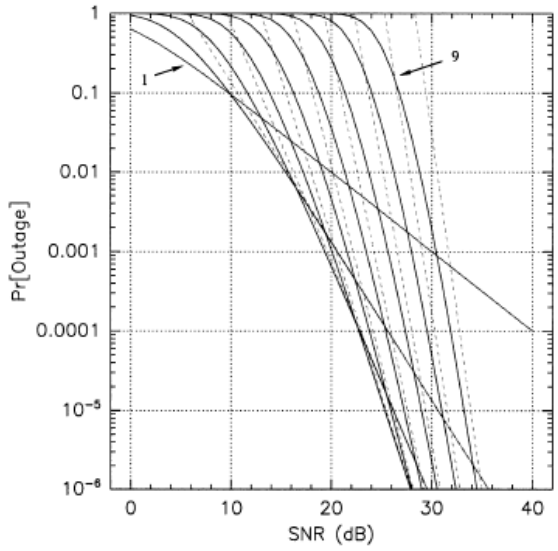
شکل ۱-۳: ساختار ارسال متعامد رله‌ها در دایورسیتی همکارانه [۱۵]



شکل ۱-۴: ساختار ارسال همزمان رله‌ها در دایورسیتی همکارانه [۱۵]

در چیدمان‌های با بیش از یک رله، می‌توان انتظار رسیدن به دایورسیتی با مراتب بالاتر را داشت. در [۱۵] عملکرد ارسال همزمان در یک کانال با بیش از یک رله و استفاده از تصمیم‌گیری-ارسال مورد بررسی قرار گرفته است. احتمال از کارافتادگی چنین طرحی (به کارگیری رله‌های متعدد) در شکل (۱-۵)، بیان‌گر افزایش مرتبه دایورسیتی با

افزایش تعداد کاربران و بالطبع کاهش انرژی ارسالی بر بیت است. مقایسه افزایش کارایی بین حالت یک و دو کاربر نسبت به کاربران بیشتر با توجه به افزایش پیچیدگی سیستم قابل توجه است. همچنین در نسبت سیگنال به نویز و احتمال از کار افتادگی معمول، تعداد کاربران کمتر از پنج، توجیه پذیر است. نکته‌ی دیگر آنکه با افزایش کاربران در سیگنال به نویز پایین عملکرد کاهش می‌یابد. چنین پدیده‌ای در انواع دیگر دایورسیتی نیز مشاهده می‌شود. [۱] دایورسیتی همکارانه با به کارگیری کدهای فضا-زمان[1] روی یک کانال در عمل با مسئله‌ی همزمان‌سازی مواجه است.



شکل ۱-۵ :احتمال از کارافتادگی با وجود رله‌های متعدد [۱۵]

دو اصطلاح "ارسال متعامد با لحاظ همکاری مبدأ" و "ارسال همزمان" در مورد چیدمان‌های همکاری به طور عمده در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار خواهد گرفت. منظور از ارسال متعامد با لحاظ همکاری مبدأ، ارسال توسط کاربر اول در فاز اول و ارسال توأم دو کاربر در فاز دوم است. همین روال با تعویض نقش کاربر اول و دوم برای انتقال اطلاعات کاربر دوم به مقصد با استفاده از یک نوع تعامد انجام می‌شود. ارسال همزمان نیز به معنی آنست که بعد از آنکه دو کاربر از سیگنال‌های یکدیگر باخبر شدند. در فاز همکاری سیگنال‌های یکدیگر را به صورت ضربدری و همزمان ارسال کنند. با در نظر گرفتن چگونگی همکاری به معنی استفاده از تقویت-ارسال یا استفاده از تصمیم-گیری-ارسال چهار طرح در مورد همکاری قابل تصور است که دو مورد ظرفیت و آشکارسازی آنها در فصول آتی بحث خواهد شد.

[1] Space-Time Coding