دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

رساله دکتری مهندسی برق–مخابرات سیستم

کنترل هدفمند، کارآمد و توزیعی توان در شبکه‌های بی‌سیم

مهدی راستی

استاد راهنما:

استاد احمدرضا شرافت

مهر ۱۳۸۸

تقدیم به همسر مهربانم

به پاس صبوری هایش

و

دخترم بهار

تشکر و قدردانی

با سپاس و شکرگزاری به درگاه پروردگار توانا که نگارنده را به انجام این رساله یاری فرمود. بر خود لازم می‌دانم که صمیمانه از استاد گرامی و فرزانه‌ام جناب آقای دکتر شرافت که برای پیشرفت علمی اینجانب از مقطع کارشناسی ارشد تا دکتری تلاشهای بی‌دریغی مبذول داشتند، تشکر و قدردانی نمایم. اگر راهنمایهای راهگشا و سخت‌گیریهای بعضا طاقت فرسا در کنار تشویقهای مکرر و نظارت دقیق، علمی و موشکافانه ایشان نبود، این رساله به این سرانجام رضایت بخش و شیرین نمی‌رسید. خوشحالم که افتخار شاگردی ایشان نصیب من شد و آنچه را از ایشان آموختم، هرگز فراموش نخواهم کرد. از خدای مهربان بابت بهره‌مندی از محضر این استاد عزیز بسیار شاکرم و طول عمر با عزت و پر برکت ایشان را از درگاه خدواند متعال خواستارم.

از اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر قاسمیان، دکتر عزمی، دکتر حکاک، دکتر کبیر از دانشگاه تربیت مدرس، دکتر سیف از دانشگاه شاهد، دکترعارف از دانشگاه صنعتی شریف و دکتر درویش زاده از بخش ریاضی دانشگاه تهران که در مقطع دکتری در محضرشان تلمذ نمودم کمال تشکر و قدردانی را دارم. هم‌چنین از اساتید مدعو داخل جناب آقایان دکتر قاسمیان، دکتر عزمی و دکتر نوایی و اساتید محترم مدعو خارج جناب آقای دکترپاکروان از دانشگاه صنعتی شریف و آقای دکترلاهوتی از دانشگاه تهران که زحمت داوری رساله را متقبل شدند، قدردانی می‌نمایم. از ریاست محترم دانشکده برق و کامپیوتر، جناب آقای دکتر یزدیان که همیشه با رویی گشاده مصاحبت خود را از من دریغ نکردند، تشکر می‌کنم و از درگاه خداوند متعال برای ایشان سرافرازی و شادکامی آرزومندم. از تلاشهای سرکار خانم دکتر اطلس‌باف مدیر محترم گروه مخابرات نیز کمال تشکر و قدردانی را دارم. در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر با دوستان خوبی آشنا شدم که دیدارشان در هر لحظه یادآور خاطرات خوب و شیرین دانشجویی‌ام خواهد بود. سپاسگزار یاری و حمایتهای این دوستان هستم که به دلیل طولانی بودن از ذکر اسامی صرفنظر می‌کنم.

از استاد عزیز جناب آقای پرفسور Zander از دپارتمان Wireless@kth دانشگاه KTH سوئد که با حمایتهای علمی، معنوی و مادی ایشان فرصت بسیار مناسب مطالعاتی به مدت یکسال برای اینجانب فراهم شد، بسیار سپاسگزارم. از دوستان عزیزم در دپارتمان Wireless@kth دانشگاه KTH سوئد، جناب آقایان دکتر Bogdan Timus، دکتر Omer Ileri و دکتر Johan Hultel که اینجانب را از نظرات علمی و بسیار ارزشمند خود بهره‌مند کردند، تشکر می‌نمایم.

از زحمات پدر و مادر مهربانم که در طول دوران تحصیلم متحمل زحمات فراوانی شدند، کمال تشکر و قدردانی دارم. در پایان از همسر مهربان و صبورم بابت دشواریها و رنجهای طاقت فرسایی که به دلیل مشغولیت تمام وقت من به انجام رساله متحمل شدند، تشکر و قدردانی می‌کنم. اگر صبر، شکیبایی، همراهی و حمایتهای معنوی ایشان نبود، بی‌شک موفق به انجام این رساله نمی‌شدم. خدای مهربان را بابت داشتن چنین یار و همراهی شکرگزار هستم.

مهدی راستی، ۱۲ آبان ۸۸

چکیده

موضوع این رساله، کنترل توان ارسالی در فراسو برای شبکه‌های سلولی بی‌سیم با تداخل محدود و دسترسی چندگانه است. در این رساله برای حل مسایل کنترل توان، از دو رهیافت ۱) توزیعی و تعاونی و ۲) غیرتعاونی مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها استفاده می‌کنیم. آلگوریتمهای توزیعی و تعاونی موجود کنترل توان به دو دسته کلی آلگوریتمهای کنترل توان تعقیب‌کننده SIR هدف (TPC) و کنترل توان فرصت طلبانه (OPC) تقسیم می‌شوند. اگر چه OPC منجر به افزایش قابل توجه برون‌دهی سیستم می‌شود، اما قادر به تضمین یک مقدار حداقلی از SIR برای برخی از کاربران نیست (عدم رعایت انصاف). آلگوریتم TPC نیز دو ضعف جدی دارد، ۱) در یک سیستم امکان‌ناپذیر (وقتی مجموعه‌ی SIR هدف مورد نیاز کاربران قابل حصول نیست)، همه کاربرانی که به SIR هدف خود نمی‌رسند (کاربران حمایت‌نشده) با ارسال در بیشینه‌ی توان خود باعث افزایش توان مصرفی کاربران، افزایش تداخل و در نتیجه افزایش نرخ انفصال کاربران (نسبت تعداد کاربران حمایت‌نشده به تعداد کل کاربران) می‌شوند و ۲) در یک سیستم امکان‌پذیر، هر کاربر دقیقا SIR هدف خود را دریافت می‌کند، حتی اگر هم‌چنان منابع اضافی برای افزایش SIR دریافتی کاربران و برون‌دهی سیستم موجود باشد.

در این رساله، برای برطرف کردن نقاط ضعف آلگوریتمهای موجود کنترل توان، پنج مساله مطرح و برای آنها راه‌حلهای مناسب ارایه کرده‌ایم. این پنج مساله عبارتند از ۱) حذف موقت و تدریجی کاربران با هدف بیشینه‌کردن تعداد کاربران حمایت‌شده در یک سیستم امکان‌ناپذیر، ۲) بیشینه کردن برون‌دهی سیستم با لزوم رعایت یک SIR کمینه هدف برای هر کاربر، از طریق تخصیص پویای SIRهای هدف به صورت توزیع‌شده، ۳) کنترل توزیعی توان با هدف بیشینه کردن مجموع SIR دریافتی کاربران، ۴) کنترل توزیعی توان به صورت منصفانه با هدف بیشینه کردن SIR کمینه (max-min SIR) و ۵) تعیین یک تابع هزینه که تعادل نش بازی غیر تعاونی کنترل توان ناشی از آن، قابلیت تعقیب هر یک از اهداف مطرح شده در مسایل ۱ الی ۴ را داشته باشد. مسایل ۱ الی ۴ در دسته رهیافتهای کنترل تعاونی و توزیعی توان و مساله ۵ در دسته رهیافتهای کنترل غیرتعاونی توان مبتنی بر نظریه بازی‌ها قرار می‌گیرند. مساله ۱، برای رفعِ اولین ضعف TPC، مساله ۲، برای رفع دومین ضعف TPC و هم چنین برای رفع ضعف عدم انصاف در OPC مطرح شده‌اند. علاوه بر این، در مساله ۲، بررسی قابل حصول بودن مجموعه SIR هدف کاربران، بطور توزیعی توسط خود کاربران نیز مطرح می‌شود که یک مساله باز و پر اهمیت است. انگیزه‌ی بیان و حل مسایل ۳ الی ۵ نیز عدم توانایی روشهای موجود در حل آنها است.

برای حل مساله ۱، دو آلگوریتم با رویکردهای متفاوت (یک آلگوریتم با قابلیت حذف نرم کاربران (TOPC)، و یک آلگوریتم با قابلیت‌های بررسی امکان‌پذیری سیستم و حذف سخت کاربران (DFC)) ارایه می‌شود. برای آلگوریتم TOPC، ضمن اثبات وجود و یکتایی نقطه‌ی ثابت و همگرایی آلگوریتم به آن، بطور تحلیلی نشان می‌دهیم که در سیستمهای امکان‌ناپذیر، آلگوریتم مذکور در مقایسه با آلگوریتم TPC دارای نرخ انفصال و توان مصرفی کمتری است. برای آلگوریتم DFC، که از مهمترین نوآوری‌های این رساله محسوب می‌شود، ضمن اثبات وجود نقطه‌ی ثابت، بطور تحلیلی نشان می‌دهیم که تمام نقاط ثابت آن هم از منظر Pareto و هم از منظر مصرف توان کارآمد هستند. هم‌چنین برای حالت خاصی که SIR هدف همه کاربران یکسان است، نشان می دهیم که DFC به کمینه‌ی نرخ انفصال کاربران منجر می‌شود. برای حل مساله ۲، یک آلگوریتم توزیعی کنترل توان با تعقیب پویای SIR هدف ارایه داده و نشان می‌دهیم که برون‌دهی سیستم را در مقایسه با TPC افزایش می‌یابد، در حالیکه دریافت مقدار کمینه‌ی SIR هدف برای همه کاربران تضمین می‌شود. برای حل هر یک از مسایل ۳ و ۴، نیز یک آلگوریتم توزیعی کنترل توان ارایه و نشان می‌دهیم که هر یک از آلگوریتمهای پیشنهادی به جواب بهینه‌ی مساله‌ی متناظر خود همگرا می‌شوند. برای حل مساله ۵، نیز با پیشنهاد یک تابع جدید هزینه به صورت یک تابع خطی از SIR، نشان می‌دهیم که چگونه می‌توان با استفاده از آن در یک بازی غیرتعاونی کنترل توان، بر رفتار خودخواهانه کاربران در تنظیم توان ارسالی خود تاثیر گذاشت که در نتیجه آن، تعادل نش بازی کنترل توان، یک هدف در سطح سیستم از قبل تعیین شده از یک مجموعه‌ی اهداف را برآورده کند. در یک جمع‌بندی، ارایه‌ی پنج آلگوریتم توزیعی کنترل توان با توابع هدف متفاوت، و یک تابع جدید هزینه، نوآوریهای این رساله هستند.

کلید واژه‌ها: شبکه های بی‌سیم، کنترل هدفمند و توزیعی توان ارسالی، کارآمدی، بررسی امکان‌پذیری، نظریه‌ی بازی‌ها.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... ه

فهرست جدول‌ها ..... ز

فهرست شکل‌ها ..... ح

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- پیشگفتار ۱

۱-۲- کنترل توان ارسالی در فراسو ۳

۱-۲-۱- رهیافت توزیعی و تعاونی ۴

۱-۲-۲- رهیافت مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها ۷

۱-۳- بیان اهداف تحقیق و نوآوری‌ها (قلمرو رساله) ۱۰

۱-۴- ساختار رساله ۱۲

فصل ۲- پیش‌زمینه، سابقه‌ی تحقیق و بیان مسایل ۱۴

۲-۱- مقدمه ۱۴

۲-۲- مدل سیستمی: شبکه بی‌سیم با دسترسی چندگانه و با تداخل محدود ۱۴

۲-۳- سابقه‌ی تحقیقات مبتنی بر رهیافت متمرکز مبتنی بر حل مساله‌ی بهینه‌سازی ۱۷

۲-۳-۱- مساله‌ی کمینه‌ی مجموع توان مصرفی ۱۸

۲-۳-۲- مساله‌ی کمینه‌ی نرخ انفصال ۱۸

۲-۳-۳- مساله‌ی بیشینه‌کردن مجموع SIR ۱۹

۲-۳-۴- مساله‌ی بیشینه‌کردن SIR کمینه (انصاف) ۱۹

۲-۴- سابقه‌ی تحقیقات مبتنی بر رهیافت توزیعی و تعاونی ۱۹

۲-۴-۱- چارچوبهای نظری برای بررسی همگرایی آلگوریتمهای توزیعی کنترل توان ۲۰

۲-۴-۲- آلگوریتمهای موجود کنترل توزیعی توان ۲۱

۲-۴-۲-۱- آلگوریتم کنترل توان تعقیب‌کننده SIR هدف ۲۱

۲-۴-۲-۲- آلگوریتم کنترل توان تعقیب‌کننده SIR هدف با حذف دایم ۲۲

۲-۴-۲-۳- آلگوریتم کنترل توان تعقیب‌کننده SIR هدف با قابلیت حذف موقت ۲۲

۲-۴-۲-۴- آلگوریتم کنترل فرصت طلبانه‌ی توان ۲۳

۲-۵- سابقه‌ی تحقیقات با رهیافت غیرتعاونی مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها ۲۴

۲-۵-۱- چارچوب نظریه‌ی بازی‌ها غیر تعاونی: تعاریف و مفاهیم ۲۴

۲-۵-۲- سازوکارهای موجود مبتنی بر هزینه ۲۷
۲-۵-۲-۱- دسته‌بندی روشهای موجود کنترل توان مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها در شبکه‌های داده بی‌سیم ۲۹
۲-۶- بیان مسایل ۳۳
۲-۶-۱- مساله‌ی حذف موقت و تدریجی کاربران ۳۳
۲-۶-۲- مساله تخصیص پویای SIRهای هدف به صورت توزیع‌شده به منظور بهبود برون‌دهی سیستم با لزوم رعایت یک کران پایین (قابل حصول) برای SIR دریافتی کاربران ۳۴
۲-۶-۳- مساله‌ی کنترل منصفانه‌ی توان به صورت توزیع‌شده ۳۵
۲-۶-۴- مساله‌ی کنترل توزیعی توان با هدف بیشینه‌سازی مجموع SIR کاربران ۳۶
۲-۶-۵- مساله‌ی تعیین تابع هزینه با قابلیت تعقیب اهداف مختلف برای بازی غیرتعاونی کنترل توان ۳۶
۲-۷- نوآوریها ۳۸

فصل ۳- کنترل توان تعقیب کننده‌ی SIR هدف همراه با قابلیت حذف نرم کاربران به منظور کاهش نرخ انفصال کاربران ۴۰

۳-۱- مقدمه ۴۰
۳-۲- آلگوریتم پیشنهادی برای کاهش نرخ انفصال کاربران: آلگوریتم کنترل توان تعقیب کننده‌ی SIR هدف همراه با قابلیت حذف نرم کاربران ۴۱
۳-۳- وجود نقطه‌ی ثابت و همگرایی آلگوریتم ۴۲
۳-۴- تنظیم توزیعی پارامترهای TOPC به منظور کاهش نرخ انفصال و مصرف توان کاربران ۴۳
۳-۵- نتایج شبیه‌سازی ۴۵
۳-۶- نتیجه‌گیری ۴۸

فصل ۴- کنترل توزیعی توان با کارآمدی از منظر Pareto و انرژی همراه با قابلیت بررسی امکان‌پذیری ۵۰

۴-۱- مقدمه ۵۰
۴-۲- مساله‌ی کنترل توان با کارآمدی از منظر Pareto و مصرف انرژی ۵۲
۴-۳- آلگوریتم پیشنهادی: آلگوریتم DFC ۵۵
۴-۴- ویژگیهای آلگوریتم پیشنهادی ۵۹
۴-۴-۱- وجود نقطه‌ی ثابت در DFC و تحلیل همگرایی آن ۵۹
۴-۴-۲- کارآمدی نقطه‌ی ثابت DFC از منظر Pareto و مصرف انرژی ۶۱
۴-۴-۳- کمینه‌کردن نرخ انفصال به وسیله DFC ۶۱
۴-۵- نتایج شبیه‌سازی ۶۴
۴-۶- نتیجه‌گیری ۷۰

فصل ۵- کنترل توان با تعقیب پویای SIR هدف ۷۱
۵-۱- مقدمه ۷۱
۵-۲- بیان مساله ۷۳
۵-۳- آلگوریتم پیشنهادی برای کنترل توان با تعقیب پویای SIR هدف ۷۳
۵-۴- وجود نقطه‌ی ثابت و همگرایی آلگوریتم DTPC ۷۵
۵-۵- بهبود برون‌دهی سیستم با استفاده از DTPC ۷۵
۵-۶- نتایج شبیه‌سازی ۷۶
۵-۷- نتیجه‌گیری ۸۰
فصل ۶- آلگوریتمهای توزیعی کنترل توان با اهداف رعایت انصاف یا بیشینه‌سازی مجموع SIR کاربران ۸۱
۶-۱- مقدمه ۸۱
۶-۲- کنترل منصفانه‌ی توان به صورت توزیعی ۸۱
۶-۳- کنترل توزیعی توان با هدف بیشینه‌سازی مجموع SIR کاربران ۸۳
۶-۴- کنترل منصفانه‌ی توان به صورت تعدیل یافته ۸۶
۶-۵- نتایج شبیه‌سازی ۸۷
۶-۶- نتیجه‌گیری ۹۰
فصل ۷- تحلیل مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها برای آلگوریتمهای پیشنهادی کنترل توان ۹۱
۷-۱- مقدمه ۹۱
۷-۲- بیان مساله: ارایه‌ی یک سازوکار مبتنی بر هزینه با قابلیت تعقیب اهداف مختلف ۹۲
۷-۳- بازی معمولی (بدون استفاده از تابع هزینه) کنترل توان ۹۳
۷-۴- راه‌حل پیشنهادی: تابع هزینه متناسب با SIR ۹۴
۷-۵- تحلیل تابع هزینه پیشنهادی ۹۵
۷-۶- تنظیم قیمت پایه در تابع هزینه پیشنهادی به منظور تعقیب یک هدف از پیش تعیین شده ۹۸
۷-۷- مثال ۹۹
۷-۸- نتیجه‌گیری ۱۰۱
فصل ۸- نتیجه‌گیری و پیشنهاد ادامه کار ۱۰۲
۸-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۲
۸-۲- پیشنهادهایی برای ادامه کار ۱۰۴
۸-۲-۱- بکارگیری آلگوریتمهای کنترل توان TOPC و DFC در یک شبکه‌ی شناختی رادیویی ۱۰۵

۸-۲-۲- کنترل توام توان و نرخ ارسالی ۱۰۶
۸-۲-۳- کنترل توان در یک شبکه‌ی چند حاملی ۱۰۷
۸-۲-۴- تعمیم تابع هزینه‌ی پیشنهادی مبتنی بر SIR به یک شبکه‌ی شناختی رادیویی یا یک شبکه‌ی چند سلولی ۱۰۸
فهرست مراجع ۱۰۹
واژه نامه فارسی به انگلیسی ۱۱۲
واژه نامه انگلیسی به فارسی ۱۱۵

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
مجموعه ی کاربران فعال	$\mathcal{M}$
توان ارسالی کاربر i	p_i
توان بیشینه‌ی ارسالی کاربر i	$\overline{p}_i$
دامنه‌ی مقادیر توان ارسالی برای کاربر i	$P_i = [0, \overline{p}_i]$
بردار توان ارسالی کاربران	$\mathbf{p}$
توان سیگنال دریافتی از کاربر i در گیرنده‌ی ایستگاه پایه	φ_i
بهره‌ی مسیر از کاربر i تا ایستگاه پایه متناظر خود	h_i
بیشینه‌ی توان سیگنال دریافتی از کاربر i در گیرنده‌ی ایستگاه پایه	$\overline{\varphi}_i$
پهنای باند	W
بهره‌ی پردازش	g_i
نرخ ارسال داده کاربر i	r_i
نرخ تراشه	r_{c}
توان نویز	σ^2
تداخل برون‌سلولی	I^{ext}
مجموع تداخل برون‌سلولی (I^{ext}) و نویز	ν
تداخل ایجاد شده برای کاربر i در ایستگاه پایه	I_i
تداخل موثر ایجاد شده برای کاربر i در ایستگاه پایه	R_i
SIR دریافتی کاربر i	γ_i
مجموعه‌ی کاربران حمایت‌شده (کاربرانی که به SIR هدف خود می‌رسند)	$\mathcal{S}$
مجموعه‌ی کاربران حمایت‌نشده (کاربرانی که به SIR هدف خود نمی‌رسند)	$\mathcal{S}'$
مجموعه‌ی کاربران در حال ارسال	$\mathcal{A}(\mathbf{p})$
اندازه‌ی مجموعه‌ی (تعداد اعضای) A	$\lvert\mathcal{A}\rvert$
نرخ انفصال (نسبت تعداد کاربران حمایت نشده به تعداد کل کاربران)	$O(\mathbf{p})$
برون‌دهی هر کاربر بازاء تخصیص بردار توان ارسالی $\mathbf{p}$	$T_i(\mathbf{p})$
برون‌دهی کل سیستم بازاء تخصیص بردار توان ارسالی $\mathbf{p}$	$T(\mathbf{p})$
مقدار SIR هدف کاربر i	$\widehat{\gamma}_i$

بردار SIR هدف	$\widehat{\gamma}$
تابع توزیعی تنظیم توان	$p_i(t+1) = f_i(\mathbf{p}(t))$
تابع توزیعی تنظیم توان در TPC	$f_i^{(\mathrm{T})}(\mathbf{p}(t))$
تابع توزیعی تنظیم توان در OPC	$f_i^{(\mathrm{O})}(\mathbf{p}(t))$
تابع توزیعی تنظیم توان در TOPC	$f_i^{(\mathrm{c})}(\mathbf{p}(t))$
توزیعی تنظیم توان در DFC	$f_i^{(\mathrm{E})}(\mathbf{p}(t))$
مجموعه‌ی کاربرانی که توسط ایستگاه پایه kام سرویس داده می‌شوند	$\mathcal{C}_k$
حد آستانه‌ی تداخل موثر	R_i^{th}
حاصلضرب سیگنال-تداخل هدف (SIP)	η_i
تابع بهره‌ی بازیگر i	u_i
مجموعه استراتژی‌های (انتخابهای) ممکن برای بازیگر i	A_i
بردار استراتژی	$\mathbf{a}$
تابع بهترین پاسخ	b_i
تابع QoS	q_i
تابع هزینه	c_i
واحد هزینه	α_i

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: ویژگیهای آلگوریتمهای موجود کنترل توزیعی و تعاونی توان ارسالی در فراسو..... ۲۴
جدول ۲-۲- دسته‌بندی روشهای موجود کنترل غیرتعاونی توان مبتنی بر رهیافت نظریه‌ی بازی‌ها..... ۳۲
جدول ۲-۳: اهداف و رهیافتهای موردنظر در مسایل مطرح شده در رساله..... ۳۳
جدول ۲-۴: مسایل مطرح شده در این رساله، تابع هدف متناظر، محدودیتها، رهیافت حل هر یک از مساله‌ها، نوآوریها و مقالات مستخرج از رساله..... ۳۷

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۳-۱: توان ارسالی و SIR دریافتی هر کاربر بر حسب هر گام در آلگوریتم TPC ۴۶

شکل۳-۲: توان ارسالی و SIR دریافتی هر کاربر بر حسب هر گام در آلگوریتم TOPC ۴۷

شکل ۳-۳: نرخ انفصال کاربران در یک شبکه‌ی بی‌سیم تک‌سلولی بر حسب مقدار SIR هدف مشترک برای آلگوریتمهای TPC، TOPC و برای جواب بهینه ۴۸

شکل ۳-۴: مجموع توان مصرفی در یک شبکه‌ی تک‌سلولی بر حسب مقدار SIR هدف مشترک ۴۹

شکل ۴-۱: توان ارسالی در یک سیستم با دو کاربر ۵۱

شکل ۴-۲ :توان ارسالی کاربران و SIR دریافتی هر کاربر بر حسب هر گام در آلگوریتم TPC ۶۵

شکل ۴-۳: توان ارسالی کاربران و SIR دریافتی هر کاربر بر حسب هر گام در آلگوریتم TR ۶۵

شکل ۴-۴: توان ارسالی کاربران و SIR دریافتی هر کاربر بر حسب هر گام در آلگوریتم DFC ۶۶

شکل ۴-۵: نرخ انفصال کاربران در یک شبکه بی‌سیم تک‌سلولی بر حسب SIR هدف مشترک برای آلگوریتمهای TPC، DFC، TOPC و جواب بهینه ۶۶

شکل ۴-۶: مجموع توان مصرفی کاربران در یک شبکه بی‌سیم تک‌سلولی بر حسب SIR هدف مشترک برای آلگوریتمهای TPC، DFC، TOPC و جواب بهینه ۶۷

شکل ۴-۷: نرخ انفصال کاربران در یک شبکه بی‌سیم چهارسلولی بر حسب تعداد کاربران برای آلگوریتمهای TPC، DFC ، TOPC و جواب بهینه ۶۸

شکل ۴-۸: مجموع توان مصرفی کاربران در یک شبکه‌ی بی‌سیم چهارسلولی بر حسب تعداد کاربران برای آلگوریتمهای TPC، DFC، TOPC و جواب بهینه ۶۹

شکل ۵-۱: مقدار پویای SIR هدف بر حسب تداخل موثر در آلگوریتم DTPC ۷۴

شکل ۵-۲: توان ارسالی کاربران و SIR دریافتی هر کاربر بر حسب هر گام در آلگوریتم TPC ۷۷

شکل ۵-۳: توان ارسالی کاربران و SIR دریافتی هر کاربر بر حسب هر گام در آلگوریتم DTPC ۷۷

شکل ۵-۴: میانگین Throughput هر کاربر در یک Hz بر حسب SIR هدف مشترک ۷۸

شکل ۵-۵: نمونه‌ایی از چیدمان یک شبکه چهارسلولی ۷۹

شکل ۵-۶: میانگین برون دهی هر کاربر در هر هرتز بر حسب تعداد کاربران فعال ۸۰

شکل ۶-۱: توان ارسالی و SIR دریافتی هر کاربر بر حسب هر گام تکرار در آلگوریتم DOFGD-PC ۸۸

شکل ۶-۲ :توان ارسالی و SIR دریافتی هر کاربر بر حسب هر گام تکرار در آلگوریتمDOASGD-PC ۸۹

شکل ۶-۳: توان ارسالی و SIR دریافتی هر کاربر بر حسب هر گام تکرار در آلگوریتم DOLFGD-PC ۹۰

شکل ۷-۱: تابع QoS، تابع هزینه و تابع بهره مبتنی بر هزینه ۹۵

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

امروزه شبکه‌های بی‌سیم نقش بسیار مهمی در زندگی بشر ایفا می‌کنند. کاربرد بسیار گسترده نظامی، اقتصادی و صنعتی این گونه شبکه‌ها باعث شده است که تصور دنیای امروز بدون حضور آنها مشکل باشد. عدم نیاز به سیم، پیاده‌سازی سریع، امکان برقراری ارتباط راه دور و پوشش تحرک کاربران از مزایای شبکه‌های بی‌سیم در مقابل شبکه‌های سیمی است. در حال حاضر شبکه‌های بی‌سیم سلولی پرکاربردترین نوع شبکه‌های بی‌سیم است. در شبکه های بی‌سیم سلولی، با توجه به محدودیت طیف مجاز برای ارسال، ناحیه‌ی جغرافیایی تحت پوشش به سلولهایی تقسیم می‌شود. در این سلولها فرکانسهای مرکزی ارسال اطلاعات با رعایت فاصله مورد نیاز مجددا استفاده می‌شوند که این باعث افزایش کارآمدی طیفی می‌شود. این نوع شبکه‌ها غالبا شبکه‌های بی‌سیم با تداخل محدود[۱] نیز نامیده می‌شوند که متضمن این نکته است که تعداد کاربران تحت پوشش که منجر به تداخل[۲] روی لینکهای ارتباطی همدیگر می‌شوند همیشه محدود هستند حتی اگر توان ارسالی[۳] آنها نامحدود باشد.

با رشد روزافزون شبکه‌های بی‌سیم، تنوع کاربردها و هم‌چنین افزایش قابل توجه کاربران آن، تخصیص (مدیریت) منابع[۴] در این نوع از شبکه‌ها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار شده است. به دلیل محدودیت منابع و نقش مستقیم آنها در کیفیت سرویس دریافتی کاربران، تخصیص منابع از مسائل و مشکلات اساسی در هر نوع شبکه داده بی‌سیم محسوب می‌شود، خصوصا هنگامی که تعداد کاربران زیاد است و سرویسهای متنوعی مانند داده، متن، تصویر و یا فیلم در یک محیط با دسترسی چندگانه[۵] ارایه می‌شود.

در یک مساله‌ی مدیریت منابع چهار مورد ۱) منبع یا منابع مورد نظر برای کنترل، ۲) تابع هدف[۶]، ۳) محدودیتهای[۷] حل مساله و ۴) رهیافت حل مساله باید بطور مشخص روشن شود. توان ارسالی، نرخ ارسالی، پهنای باند و ایستگاه پایه از مصادیق منابع در شبکه‌های بی‌سیم به شمار می‌آیند که تخصیص آنها به صورت جداگانه یا توام (به عنوان مثال، کنترل توام توان و نرخ ارسالی، تخصیص توام ایستگاه پایه و توان ارسالی و مانند اینها) صورت می‌گیرد. تابع هدف، مشخص‌کننده‌ی هدف تخصیص منابع است، یعنی منابع مورد نظر قرار است به منظور بهینه‌سازیِ آن تابع هدف تخصیص یابند. در مسایل مدیریت منابع، محدودیتهایی وجود دارند که در فرایند تخصیص منابع بایستی رعایت شوند. این محدودیتها شامل

---

[1]- Interference-limited wireless network

[2]- Inteference

[3]- Transmit power

[4]- Resource allocation (management)

[5]- Multiple-access environment

[6]- Objective function

[7] - Constraints

محدودیتهای فنآوری[1] و تنظیم مقررات[2] (نظیر محدودیت توان ارسالی بیشینه، مجموع توان، نرخ ارسالی و یا ایستگاه پایه تخصیص یافته) یا محدودیتهای مربوط به نیازمندیهای کاربران (نظیر کمینه‌ی قابل قبول برای نسبت سیگنال به تداخل[3] (SIR) دریافتی یا نرخ ارسالی هر کاربر) است. پس از مشخص نمودن منابعی که قرار است با تخصیص آن، یک تابع هدف با رعایت محدودیتهایی مشخص بهینه شود، باید رویکرد تخصیص منابع را نیز مشخص نمود. تخصیص منابع می‌تواند با رویکرد متمرکز، توزیع‌شده و یا مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها انجام پذیرد. در رویکرد متمرکز، منبع یا منابع توسط یک نقطه‌ی مرکزی (به عنوان مثال، ایستگاه پایه) تخصیص داده می‌شود. در رویکرد توزیعی، منبع یا منابع به صورت توزیع‌شده و تعاونی و بر اساس یک آلگوریتم از پیش‌تعریف‌شده تخصیص داده می‌شود. در رویکرد مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها، هر کاربر به صورت غیرتعاونی و خودخواهانه منبع در اختیار خود را به نحوی کنترل می‌کند که تابع بهره‌ی خود را (که تابعی از منبع در اختیار خود و منابع در اختیار دیگر کاربران است) بهینه کند.

ظرفیت شبکه‌های سیمی را می‌توان با افزودن تعداد وسایل ارتباط سیمی نظیر کابلها و فیبرهای نوری افزایش داد. اما پهنای باند موجود برای ارتباطات بی‌سیم به راحتی قابل افزایش نیست. یکی از روشهای اساسی برای افزایش ظرفیت موثر شبکه‌های بی‌سیم در یک پهنای باند مشخص، مدیریت تداخل کاربران است. تداخل را می‌توان توسط آلگوریتمهای کنترل توان ارسالی کاربران و ایستگاه‌های پایه در سمت‌های فراسو[4] و فروسو[5] مدیریت کرد.

در این رساله بطور خاص به موضوع کنترل توان ارسالی در فراسو برای شبکه‌های بی‌سیم سلولی با تداخل محدود و با استفاده از رهیافت توزیعی و تعاونی و رهیافت غیرتعاونی مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها متمرکز می‌شویم. در بسیاری از مسایل، کنترل توان ارسالی در سمت فراسو از اهمیت بیشتری در مقایسه با فروسو برخوردار است و در عین حال دشوارتر و پیچیده‌تر نیز است [۱]. دلیل اول این است که مصرف توان در کاربران سیار در مقایسه با ایستگاه‌های پایه اهمیت بیشتری دارد. دوم این که تداخل درون-سلولی[6] در سمت فروسو بسیار کمتر از فراسو است، زیرا حفظ تعامد در تخصیص منابع در سمت فروسو (تخصیص کد در CDMA، تخصیص Tone در OFDM، تخصیص شیار زمان و فرکانس در GSM) به راحتی توسط ایستگاه‌های پایه انجام می‌شود [۱]. دلیل سوم نیز مکان ثابت ایستگاه‌های پایه است که باعث می‌شود تداخل برون-سلولی[7] در سمت فروسو در مقایسه با فراسو از یکنواختی بیشتری برخوردار باشد و کمتر دارای افزایش لحظه‌ای[8] باشد [۱].

---

[1] - Technology

[2]- Regulatory

[3]– Signal-to-interference ratio (SIR)

[4]- Uplink

[5] -Downlink

[6]- Intra-cell Interference

[7]- Inter-cell Interference

[8]- Bursty

۱-۲- کنترل توان ارسالی در فراسو

کنترل مناسب توان ارسالی به دلیل تاثیر آن در افزایش عمر باتری و کاهش تداخل در شبکه‌های بی‌سیم از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در شبکه‌های بی‌سیم مبتنی بر CDMA، کاربران در زمان و پهنای باند فرکانسی مشترک، داده‌ی خود را ارسال می‌کنند. عدم کنترل توان ارسالی در این نوع شبکه‌ها باعث خواهد شد که سیگنال ارسالی کاربران نزدیک به ایستگاه پایه در مقایسه با کاربرانی که دورتر هستند با قدرت بیشتری به گیرنده رسیده و بنابراین مقدار بزرگتری برای نسبت سیگنال به تداخل (SIR)[1] برای کاربران نزدیکتر به ایستگاه پایه حاصل می‌شود. این مساله که به اثر دوری-نزدیکی[2] معروف است باعث می‌شود که کاربران نزدیک به ایستگاه پایه (در مقایسه با کاربران دورتر) در حالی که در محیط مشترک انتقال باعث تداخل بیشتری می‌شوند، از سطح QoS بیشتری نبز برخوردار شوند [۲]. برای جلوگیری از اثر دوری-نزدیکی در شبکه‌های بی‌سیم، کنترل توان ارسالی کاربران یک نیاز ضروری است[۳].

در روشهای سنتی کنترل توان، ایستگاه پایه با ارسال دستوراتی توان ارسالی کاربران را تنظیم می‌کند که به صورت حلقه-بسته[3] یا حلقه-باز[4] است. در روش حلقه-باز، هر کاربر توان سیگنال ارسالی خود به ایستگاه پایه (ارتباط فراسو) را متناسب با عکس توان سیگنال دریافتی از ایستگاه پایه (ارتباط فروسو) تنظیم می‌کند. در این روش، اگر توان سیگنال دریافتی کاربر از ایستگاه پایه زیاد باشد، کاربر توان سیگنال ارسالی خود به ایستگاه پایه را کاهش و اگر کم باشد، افزایش می‌دهد. این روش هنگامی مناسب است که کانال فراسو و فروسو از نظر فرکانس و تداخل یکسان باشند که همیشه این گونه نیست. در روش حلقه-بسته، فرمانهای مناسبی از طرف ایستگاه پایه به هر کاربر برای تنظیم توان خود داده می‌شود. چنانچه توان دریافتی کاربر در ایستگاه پایه کم باشد، فرمان افزایش توان و چنانچه زیاد باشد، دستور کاهش توان توسط ایستگاه پایه به کاربر داده می‌شود.

در روشهای سنتی کنترل توان [۴]، [۵]، [۶]، رسیدن کاربران به یک SIR ثابت هدف[5] از پیش‌تعیین‌شده (متناظر با یک نرخ هدف برای خطای بیت) مورد نظر است [۷]. روشهای مبتنی بر دریافت یک SIR ثابت هدف، بیشتر برای سرویس صوت مناسب است. در یک شبکه سلولی بی‌سیم برای سرویس صوت، بسته به شرایط کانال، SIR هدف بطور نوعی حدود ۶ الی ۷ dB است [۷]. در سرویس صوت، رسیدن SIR به این حد آستانه (مقدار هدف) کفایت می‌کند، چون گوش انسان برای مقادیر بیشتر از آن تفاوت قابل ملاحظه‌ای قایل نمی‌شود. اما مقادیر کمتر از این حد آستانه برای SIR، کیفیت صوت دریافتی را خراب می‌کند. سرویس داده در مقایسه با سرویس صوت به SIR با مقدار بیشتری نیاز دارد، زیرا سرویسهای داده در برابر خطای بیت حساسیت قابل توجهی دارند. سرویس داده هرچه با SIR بیشتر

---

[1]- Signal-to-Interferene Ratio (SIR)

[2]- Near-far effect

[3]- Closed-loop

[4]- Open-loop

[5]- Fixed target SIR

(و در نتیجه نرخ خطای بیت کوچکتر) در گیرنده دریافت شود، از کیفیت بهتری برخوردار است. به عبارت دیگر بر خلاف سرویس صوت که کیفیت سرویس آن را می‌توان بوسیله یک تابع پله نشان داد [۸]، کیفیت سرویس برای سرویسهای داده یک تابع پیوسته و صعودی از SIR است [۹]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]. در نتیجه در مورد سرویس داده، رسیدن به یک SIR هدف که در هر لحظه باید حفظ شود (مانند آنچه در مورد سرویس صوت صادق است) مدنظر نیست و در واقع به یک SIR هدف دینامیک نیاز است. در روشهای سنتی کنترل توان از منابع بطور کارآمد[1] استفاده نمی‌شود [۸]، [۱۰] (یعنی گاهی منابعی وجود دارند که بدون استفاده باقی می‌مانند). در حالی که از یک سازوکار[2] کنترل توان برای شبکه‌های داده بی‌سیم انتظار می‌رود که از منابع بطور کامل و کارآمد استفاده نماید [۸]، [۱۰]، یعنی تا آنجا که منابع موجود اجازه می‌دهند، بایستی SIR کاربران داده، بسته به QoS مورد نیاز آنها، افزایش یابد. بنابراین، روشهای سنتی کنترل توان برای سرویس داده مناسب نیست و با محدودیتهای جدی از قبیل عدم استفاده کارآمد از منابع و نیاز سرویسهای داده به یک SIR دینامیک مواجه است.

راه‌حلهای ارایه شده برای حل مسایل کنترل توان را می‌توان مبتنی بر سه رهیافت کلی ۱) *رهیافت متمرکز*، ۲) رهیافت توزیعی و تعاونی و ۳) رهیافت غیرتعاونی مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها دسته‌بندی کرد. در رهیافت متمرکز مبتنی بر حل یک مساله‌ی بهینه‌سازی یک تابع هدف در سطح سیستم، با استفاده از روشهای متنوع بهینه‌سازی، توان ارسالی بهینه‌ی هر کاربر بدست می‌آید. در این روشها فرض می‌شود که اطلاعات کامل نظیر ماتریس بهره‌ی مسیر و محدودیتهای مساله از قبیل محدودیت توان ارسالی و مانند اینها در دسترس است. هر کاربر در رهیافت توزیعی و تعاونی، توان ارسالی خود را با استفاده از کمترین اطلاعات فیدبک از سمت ایستگاه پایه و به صورت تعاونی تنظیم می‌کند. در رهیافت مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها از مدل بازی‌های استراتژیک غیرتعاونی برای مدلسازی و تحلیل کنترل توان استفاده می‌شود.

در این رساله، با توجه به مزیت روشهای توزیعی و مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها در مقایسه با روشهای سنتی کنترل متمرکز توان، تنها دو رهیافت توزیعی و تعاونی و رهیافت غیرتعاونی مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها بکارگرفته خواهند شد. تفاوت کلیدی دو رهیافت مذکور این است که در رهیافت توزیعی و تعاونی، فرض می‌شود که کاربران توان ارسالی خود را با استفاده از یک آلگوریتم از پیش تعیین شده تنظیم می‌کنند و در رهیافت غیرتعاونی فرض می‌شود کاربران خودخواه هستند و توان ارسالی خود را تنها بر اساس بیشینه‌کردن بهره‌ی خود تنظیم می‌کنند.

۱-۲-۱- رهیافت توزیعی و تعاونی

بطور کلی، رهیافت توزیعی در کنترل توان به رهیافت متمرکز ترجیح داده می‌شود. زیرا در آلگوریتمهای توزیعی کنترل توان، هر کاربر توان ارسالی خود را با استفاده از کمترین اطلاعات فیدبک از

[1] -Efficient

[2] - Mechanism

سمت ایستگاه پایه و به صورت تعاونی تنظیم می‌کند و در آن به اطلاعات وسیعی که در رهیافت متمرکز قابل دسترس فرض می‌شود، نیازی نیست. علاوه بر این، برای حل برخی از مسایل کنترل توان، به دلیل NP-Complete بودن، راه حل توزیعی تنها راه حل ممکن است (همانطور که در فصل ۴ خواهیم دید). همگرایی آلگوریتم و تابع هدف برآورده شده، از پارامترهای مهم مقایسه آلگوریتمهای توزیعی کنترل توان است. برای بررسی همگرایی آلگوریتمهای توزیعی کنترل توان چارچوبهایی در [۲۹] و [۳۰]، معرفی شده است که در فصل دوم به آن خواهیم پرداخت. این که نقطه‌ی ثابتی که یک آلگوریتم توزیعی کنترل توان به آن همگرا می‌شود جواب بهینه یا زیر-بهینه کدام مساله‌ی بهینه‌سازی است از معیارهای مهم بررسی و مقایسه آلگوریتمهای توزیعی کنترل توان است.

از نظر تابع هدف، آلگوریتمهای موجود کنترل توزیعی توان را می‌توان به دو دسته کلی آلگوریتمهای کنترل توان تعقیب‌کننده SIR هدف[1] (TPC) که در سال ۱۹۹۴ توسط Foschini و Milijanic [۳۲] پیشنهاد شد و سپس در [۶]، [۲۶] و [۳۳] مورد بررسی بیشتری قرار گرفت، و کنترل توان فرصت طلبانه[2] (OPC) که در سالهای ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ توسط Leung و Sung [۳۰] و [۳۱] پیشنهاد شد، تقسیم کرد. تابع هدف در آلگوریتمهای TPC و OPC به ترتیب مصرف کمینه‌ی مجموع توان مصرفی با لزوم رعایت یک SIR کمینه برای هر کاربر، و بیشینه‌سازی برون‌دهی کل سیستم است. در آلگوریتم TPC، هر کاربر تلاش می‌کند تا SIR دریافتی خود در گیرنده را در یک سطح ثابت هدف نگه دارد. به همین دلیل با افزایش تداخل موثر (نسبت تداخل به بهره‌ی مسیر)، هر کاربر نیز توان ارسالی خود را افزایش می‌دهد. در آلگوریتم OPC، سطح توان ارسالی کاربران با روشی متضاد با آلگوریتم TPC تنظیم می‌شود، یعنی هنگامی که تداخل موثر برای آن کاربر افزایش (کاهش) می‌یابد، توان ارسالی یک کاربر کاهش (افزایش) می‌یابد. هر دو آلگوریتم TPC و OPC دارای نقطه‌ی ثابت یکتا و همگرا هستند. هنگامی که مجموعه SIRهای هدف کاربران قابل حصول است، آلگوریتم TPC به نقطه‌ی ثابت یکتای خود همگرا می‌شود که در آن، همه کاربران با مصرف کمترین مجموع توان‌های مصرفی به SIRهای هدف خود می‌رسند [۳۲]. در [۳۰] نشان داده شده است که آلگوریتم OPC به نقطه‌ی ثابت یکتای متناظر خود همگرا می‌شود و با تخصیص سطح زیادتری از توان به کاربران دارای کانال مناسب و تخصیص سطح بسیار کمی از توان به دیگر کاربران (کاربران با کانال ضعیف)، برون‌دهی کل سیستم را بطور قابل توجهی افزایش می‌دهد (اگر چه بیشینه‌ی برون‌دهی سیستم تضمین نمی‌شود).

آلگوریتمهای TPC و OPC در کنار مزیتهای ذکر شده در بالا، دارای نقاط ضعفی نیز هستند که برطرف کردن آنها بخشی از نوآوریهای مدنظر در این رساله است. اگر چه آلگوریتم‌های کنترل فرصت‌طلبانه‌ی توان منجر به افزایش قابل توجه برون‌دهی سیستم می‌شود، اما قادر به تضمین یک مقدار حداقلی از SIR برای همه کاربران نیست (عدم رعایت انصاف). زیرا بوسیله آن، تنها کاربران با وضعیت کانال بهتر، منتفع می‌شوند (SIR بالایی را دریافت می‌کنند). این عدم رعایت انصاف برای کاربرانی که

[1]- Target-SIR tracking power control (TPC)

[2]- Opportunistic power control (OPC)

تحرک کمتری دارند (و در نتیجه کانال‌های آنها تغییرات اندکی دارند) بیشتر نمود دارد و ممکن است منجر به عدم رعایت انصاف به صورت طولانی شود، زیرا کاربران با بهره‌ی مسیر کم ممکن است برای مدت‌زمان طولانی به صورت حمایت نشده باقی بمانند. آلگوریتم TPC نیز دو ضعف جدی دارد. ۱) هنگامی که بردار SIR هدف کاربران قابل حصول نیست (که اصطلاحا در این حالت گفته می‌شود سیستم امکان‌ناپذیر است)، هر کاربری که قادر به دریافت SIR هدف خود نیست (که اصطلاحا یک کاربر حمایت‌نشده نامیده می‌شود)، با بیشینه‌ی توان خود ارسال می‌کنند که این خود باعث افزایش توان مصرفی کاربران، افزایش تداخل و در نتیجه افزایش بیش از حد کاربران حمایت نشده می‌شود و ۲) در یک سیستم امکان‌پذیر، هر کاربر دقیقا SIR هدف خود را دریافت می‌کند، حتی اگر هنوز منابع اضافی برای افزایش SIR دریافتی کاربران (و در نتیجه افزایش برون‌دهی سیستم) موجود باشد. این دو نقطه ضعف را در ادامه شرح می‌دهیم.

استفاده از TPC در یک سیستم امکان‌ناپذیر باعث می‌شود که تعدادی از کاربران به SIR هدف خود نرسند (کاربران حمایت نشده). در چنین حالتی، تمام کاربران حمایت نشده با بیشینه‌ی توان خود ارسال می‌کنند، زیرا در TPC، هر کاربر SIR هدف خود را تحت هر شرایطی دنبال می‌کند. این باعث مصرف بی‌رویه باتری برای کاربران حمایت نشده و هم‌چنین افزایش تداخل برای دیگر کاربران می‌شود. علاوه بر این همانطور که در فصول دوم و سوم خواهیم دید، ارسال با توان بیشینه توسط کاربران حمایت‌نشده در یک سیستم امکان‌ناپذیر، باعث افزایش تعداد کاربران حمایت‌نشده نیز می‌شود. به عبارت دیگر، چنانچه بخشی از کاربران حمایت‌نشده توان ارسالی خود را کاهش دهند و یا حتی به صفر برسانند (به جای آنکه با مقدار بیشینه ارسال کنند)، تداخل کاهش می‌یابد که این خود می‌تواند باعث شود بعضی از کاربران حمایت‌نشده، حمایت شوند (یعنی به SIR هدف خود برسند). برای برطرف کردن اولین ضعف TPC در یک سیستم امکان‌ناپذیر (ارسال در بیشینه‌ی توان ارسالی توسط کاربران حمایت نشده با محدودیت توان ارسالی و افزایش تعداد کاربران حمایت‌نشده)، در [۳۳] یک آلگوریتم کنترل توان تعقیب‌کننده SIR هدف با قابلیت حذف موقت (TPC-TR) که برای اختصار آلگوریتم TR نامیده می‌شود، پیشنهاد شد که در آن آلگوریتم TPC به روش زیر اصلاح شده است. هر کاربر در زمانی که نمی‌تواند به SIR هدف خود برسد، به جای ارسال با بیشینه‌ی توان، خود را بطور موقت حذف می‌کند (یعنی توان ارسالی خود را صفر تنظیم می‌کند)، در غیر این صورت توان ارسالی خود را مطابق TPC تنظیم می‌کند و SIR هدف خود را دریافت می‌کند. بر خلاف TPC که وجود نقطه‌ی ثابت و همگرایی آلگوریتم به نقطه‌ی ثابت تضمین شده است، تابع تنظیم توان TR ممکن است فاقد نقطه‌ی ثابت باشد و آلگوریتم واگرا شود. اگر آلگوریتم TR همگرا شود، در مقایسه با TPC مجموع توان مصرفی و نرخ انفصال[1] کاربران (نسبت تعداد کاربران حمایت‌نشده به تعداد کل کاربران) در یک سیستم امکان ناپذیر، کاهش می‌یابد. اما وجود نقطه‌ی ثابت و همگرایی در آلگوریتم TR تضمین‌شده نیست و برخی از کاربران ممکن است بین وضعیت‌های خاموش و روشن نوسان کنند. چنین نوسانی به این دلیل است که هنگامی که تداخل موثر برای یک کاربر از یک حد آستانه

[1]- Outage ratio (outage probability)

بیشتر می‌شود، آن کاربر خاموش می‌شود و بنابراین تداخل موثر برای دیگر کاربران کاهش یافته و این در نوبه خود باعث کاهش توان ارسالی دیگر کاربران و در نتیجه منجر به کاهش تداخل موثر برای آن کاربر شود. در این حالت چنانچه تداخل موثر برای کاربر مذکور از حد آستانه کمتر شود، آن کاربر مجدداً شروع به ارسال می‌کند و به همین ترتیب این نوسان ادامه می‌یابد.

در یک سیستم امکان‌پذیر، آلگوریتم TPC منجر به رسیدن کاربران به SIRهای هدف خود با مصرف کمینه‌ی مجموع توان مصرفی می‌شود، یعنی هر کاربر دقیقا SIR هدف خود را دریافت می‌کند، حتی اگر هنوز منابع اضافی برای افزایش SIR دریافتی کاربران (و درنتیجه افزایش برون‌دهی سیستم) موجود باشد. تخصیص ثابت SIR هدف تنها برای سرویس صوت مناسب است. زیرا در سرویس صوت به دلیل مشخصات گوش انسان، رسیدن به SIR بیشتر از یک مقدار ثابت تاثیری روی کیفیت سرویس (و در نتیجه برون‌دهی سیستم) ندارد. اما برای سرویسهای داده، هر چه SIR دریافتی کاربران بزرگتر باشد، کیفیت سرویس نیز افزایش می‌یابد و درنتیجه برون‌دهی سیستم افزایش می‌یابد. بنابراین به یک آلگوریتم کنترل توان نیاز است که بوسیله آن یک مقدار کمینه‌ی SIR برای هر کاربر (که قابل حصول فرض می‌شوند) تضمین شود و در عین حال تا آنجا که منابع اجازه می‌دهند، برون‌دهی سیستم با افزایش SIR دریافتی برای برخی از کاربران افزایش یابد.

۱-۲-۲- رهیافت مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها

می‌دانیم که SIR دریافتی هر کاربر با افزایش توان ارسالی آن کاربر و کاهش تداخل دریافتی آن کاربر در گیرنده افزایش می‌یابد. بنابراین، در یک شبکه با دسترسی چندگانه، افزایش SIR یک کاربر، SIR دریافتی دیگر کاربران را کاهش می‌دهد [۸]. بنابراین رفتار هر کاربر (در افزایش SIR خود) بر رفتار و میزان رضایت دیگر کاربران در استفاده از منابع اثر می‌گذارد. وجود این برهم کنشی و تعامل میان کاربران، رهیافت مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها را برای تحلیل و مدلسازی مساله‌ی کنترل توان در شبکه‌های داده بی‌سیم (برای وضعیتی که کاربران، خودخواه فرض می‌شوند) بسیار مناسب می‌سازد [۸]- [۱۶]. علاوه بر این، با توجه به صدور مجوز برای فعالیت شرکتهای جدید به منظور ارایه سرویسهای مخابراتی و ایجاد رقابت، و توسعه‌ی صنعت مخابرات که در آن هر یک از فراهم‌کنندگان سرویس و یا کاربران در یک محیط رقابتی، هدف خود (هدف در سطح سیستم یا هدف در سطح کاربر) را تعقیب می‌کنند، به کارگیری مدلهای اقتصادی مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها در مخابرات بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۷] (رهیافت غیر تعاونی[1]). یکی از دلایل انتخاب این رویکرد، محدودیت بکارگیری رهیافت تعاونی در زمینه اختصاص منابع و هزینه‌گذاری در یک محیط رقابتی است [۱۷].

اخیرا از رهیافت غیرتعاونی مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها برای مدل‌سازی و حل مساله کنترل توان ارسالی در شبکه‌های بی‌سیم استفاده‌ی فراوانی شده‌است. نظریه‌ی بازی‌ها یک مجموعه ابزار ریاضی قدرتمند برای مدل‌سازی و تحلیل پدیده‌های تصمیم‌گیری برهم‌کنشی به حساب می‌آید. منظور از یک پدیده

[1] -Non-cooperation-based approach

تصمیم‌گیری برهم‌کنشی آن است که تعدادی تصمیم گیرنده (بازیگر) وجود دارند که هر یک دارای یک تابع بهره (سود) هستند که مقدار آن نه تنها به تصمیم خودشان بلکه به تصمیم دیگران نیز وابسته است. در اکثر تحقیقاتِ مرتبطِ موجود از مدل بازی‌های استراتژیک غیرتعاونی استفاده‌شده است. یک بازی استراتژیک شامل سه عنصر است: مجموعه‌ای از بازیگران، مجموعه‌ای از توابع بهره (یک تابع بهره به ازاء هر بازیگر) و مجموعه‌ای از فضای استراتژی (یک فضای استراتژی به ازاء هر بازیگر). در یک بازی استراتژیک، همه‌ی بازیگران بطور همزمان یک استراتژی را از فضای استراتژی خود انتخاب می‌کنند، به نحوی که بهره‌ی خود (هدف در سطح کاربر) را بیشینه کنند. در یک راهکار کنترل توان مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها، هر کاربر (بازیگر) توان سیگنال ارسالی (استراتژی) خود را انتخاب می‌کند، سپس بهره‌ای دریافت می‌کند که تابعی از توان ارسالی خود و توان ارسالی دیگران است که مقدار آن، میزان رضایت کاربر را از استفاده از منابع شبکه و دریافت سرویس نشان می‌دهد. در این رهیافت هر کاربر در مقام پاسخ به انتخاب توان ارسالی دیگران، تلاش می‌کند توان ارسالی خود را طوری انتخاب (تنظیم) کند که بهره‌ی خود را بیشینه کند.

در یک فرایند تصمیم‌گیری برهم‌کنشی، بازیگران (تصمیم‌گیرندگان) به یک وضعیت تعادلی به نام تعادل نش می‌رسند که در آن هیچ بازیگری به تغییر یکجانبه استراتژی خود متمایل نیست. تعادل نش اساسی‌ترین و پرکاربردترین مفهوم در نظریه‌ی بازی‌ها است [۱۸]. تعادل نش در یک بازی استراتژیک غیرتعاونی، برداری از استراتژی بازیگران است که به ازاء آن هیچ بازیگری با فرض ثابت بودن استراتژی دیگران، با تغییر استراتژی خود بهره بیشتری بدست نمی‌آورد. در واقع در تعادل نش هیچ بازیگری (چنانچه استراتژی دیگران را ثابت فرض کنیم) به تغییر استراتژی خود تمایلی ندارد. به همین دلیل، این وضعیت که قابل پیش بینی است، یک نقطه تعادلی نامیده می‌شود.

در یک بازی غیرتعاونی کنترل توان[۱] (NPCG) در یک شبکه داده بی‌سیم، هر کاربر بطور خودخواهانه[۲] به دنبال بیشینه‌کردن تابع بهره‌ی خود است (هدف در سطح کاربر). اما انتظار ما از یک راهکار کنترل توان در یک شبکه داده بی‌سیم حصول یک هدف از قبل تعیین شده نیز هست. این اهداف از پیش تعیین شده برای کنترل توان را اهداف در سطح سیستم[۳] می‌نامیم که معمولا با هدفی که هر یک از کاربران دارند (هدف در سطح کاربر[۴]) متفاوت و بعضا متضاد است. اهداف متنوع مورد نظر در سطح سیستم که در مقالات موجود برای یک راهکار کنترل توان ارسالی ذکر گردیده است، شامل بهینه‌سازی مجموع SIR کاربران، بیشینه کردن SIR کمینه (به عنوان معیاری از انصاف[۵])، کمینه کردن نرخ انفصال کاربران و هم چنین بهینه‌سازی برون‌دهی سیستم است.

---

[1] -Non-cooperative Power Control Game (NPCG)

[2] -Selfishly

[3]- System-level goal

[4]- User-level goal

[5]- Fairness